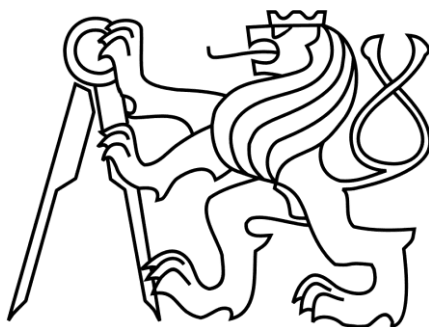


ČESKÉ VYSOKÉ ÚČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



Měření tloušťky materiálu a detekce svarů s využitím vířivých proudů

BAKALÁŘSKA PRÁCE

Vypracoval: Danil Merzlov
Vedoucí: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Radislavu Šmídovi za odborné vedení, za pomoc a cenné rady při zpracování této práce.

Abstrakt (Český)

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a vytvořit měřič tloušťky kovového neferomagnetického plechu a detektor svaru s využitím moderního obvodu LDC1000 od firmy Texas Instruments (tzv. převodník indukčnost - číslo). Vyhodnotit reprodukovatelnost, rozlišení a nejistotu.

Pro realizaci této práce je naprogramována vývojová deska STM32F429IDISCOVERY ve vývojovém prostředí KEIL uVision. V režimu měření tloušťky na displeji se ukazuje vzdálenost plechu od každého senzoru a tloušťka plechu. V režimu detekce svaru se vykresluje graf výstupních dat z obvodu podle času, programově je nastavena úroveň, při které bude detekován svar.

Abstract (English)

The aim of this work is to design and build the thickness measurement device of non-ferromagnetic metal and the weld detector with the use of modern circuit LDC1000 (Inductance to digital converter) from Texas Instruments. Evaluate reproducibility, resolution and uncertainty.

STM32F429IDISCOVERY development board programmed in KEIL uVision was chosen for project realization. In the thickness measurement mode, device shows on display the distance from each sensor and thickness of material. In the detection mode, device plots a graph of output data from LDC1000. The level at which the weld is detected sets programmatically.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Danil Merzlov**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Měření tloušťky materiálů a detekce svarů s využitím vířivých proudů**

Název tématu anglicky: **Thickness Measurement and Weld Detection Using Eddy Currents**

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte měřič tloušťky kovového neferomagnetického plechu s využitím obvodu TI LDC1000 (tzv. převodník indukčnost - číslo). Použijte vývojové moduly LDC1000EVM a USB rozhraní. Vyhodnoťte rozsah měření, vliv teploty, reprodukovatelnost, rozlišení a nejistotu. Experimentálně vyhodnoťte použitelnost obvodu pro detektor svarů pohybujícího se ocelového pásu.


Seznam odborné literatury:

- [1] LDC1000 Inductance to Digital Converter (Rev. A), katalogový list, TI.com 2013
- [2] LDC1000 Temperature Compensation, aplikační zpráva, TI.com 2013
- [3] Jacob Fraden, Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications, Springer-Verlag, ISBN 0-387-00750-4.2003

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radislav Šmíd, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 13. listopadu 2014

Platnost zadání do¹: 31. srpna 2016


Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 11. 2014

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Obsah:

Prohlášení	i
Poděkování	ii
Abstrakt (Český)	iii
Abstract (English)	iv
Seznam obrázků	1
Seznam tabulek	2
1 Úvod	3
1.1 Motivace.....	3
1.2 Blokové schéma přístroje	3
2 Teorie.....	5
2.1 Principy bezdotykového měření vzdálenosti	5
2.2 Vířivý proud	5
2.2 Senzor pro měření tloušťky.....	6
2.3 Diferenční senzor pro detekci svaru	7
3 Využití součástky	8
3.1 Vývojová deska STM32F429IDISCOVERY	8
3.2 Modul LDC1000EVM a převodník LDC1000	9
3.2.1 Modul LDC1000EVM.....	9
3.2.2 Převodník LDC1000.....	9
3.2.3 Komunikace s obvodem LDC1000	10
3.2.4 Režimy převodníku	11
3.2.5 Rychlost měření	12
3.2.6 Měření vzdáleností	12
3.2.7 Teplotní kompenzace	13
3.3 Teplotní čidlo LM35CZ.....	13
3.4 USB - TTL konvertor.....	14

4	Návrh senzorů	15
4.1	Sensor pro měření tloušťky	15
4.2	Senzor pro detekci svaru	15
5	Obslužný software v Matlabu.	17
5.1	Určení převodní charakteristiky v Matlabu.....	17
6	Hardwarová realizace.	18
6.1	Zapojení pro měření tloušťky	18
6.2	Zapojení pro detekce svarů	19
7	Programování vývojové desky.....	20
7.1	Použité knihovny	20
7.2	Spolupráce s displejem.....	20
7.3	Komunikace LDC1000 s STM32F429ZI	20
7.4	Komunikace STM32F429ZI s počítačem přes UART	23
7.5	AD převodník a měření teploty	23
7.6	Programování menu.....	23
8	Výsledky.....	25
8.1	Spolupráce s programem TI LDC1000 EVM GUI.	25
8.2	Zpracování výstupních dat z LDC1000 EVM.	25
8.3	Měření vzdálenosti modulem LDC1000EVM	27
8.4	Konstrukce pro měření a kalibrace	28
8.5	Kalibrace přístroje	29
8.6	Měření tloušťky	31
8.7	Detekce svarů	32
9	Foto přístroje.....	33
10	Závěr	34
11	Literatura	35
12	Obsah přiloženého CD.	36

Seznam obrázků

Obrázek 1 Bloková schéma přístroje pro měření tloušťky.	3
Obrázek 2 Bloková schéma přístroje pro detekci svaru	3
Obrázek 3 Generování vířivých proudů na povrchu kovu.	5
Obrázek 4 Měření tloušťky metodou vířivých proudů.	7
Obrázek 5 Zkoumání plechu diferenčním senzorem.	7
Obrázek 6 Vývojová deska STM32F429I DISCOVERY	8
Obrázek 7 Blokové uspořádání Jádra ARM	8
Obrázek 8 Modul LDC1000EVM.....	9
Obrázek 9 Bloková schéma převodníku LDC1000.	10
Obrázek 10 Časový diagram komunikace s obvodem LDC1000	11
Obrázek 11 Chování INTB terminálu v DRDYB módu.	12
Obrázek 12 Blokové schéma teplotního čidla LM35CZ	13
Obrázek 13 Teplotní čidlo LM35CZ.	14
Obrázek 14 USB-TTL konvertor CH340.	14
Obrázek 15 Cívka senzoru pro měření tloušťky. Pohled plošného spoje shora a zdola	15
Obrázek 16 Tvar cívky použité v diferenčním senzoru.	16
Obrázek 17 Struktura skriptu pro kalibraci přístroje.	17
Obrázek 18 Zapojení pro měření tloušťky.	18
Obrázek 19 Zapojení pro detekce svarů.	19
Obrázek 20 Příklad grafu závislosti indukčnosti na čísle vzorků	25
Obrázek 21 Příklad histogramu výstupních dat	26
Obrázek 22 Příklad grafu závislosti výstupních dat na čísle vzorků	26
Obrázek 23 Proložená funkce v Curve Fitting Toolboxu.....	27
Obrázek 24 Příklad histogramů pro různé vzdálenosti.....	28
Obrázek 25 Konstrukce pro kalibrace a měření.....	29
Obrázek 26 Identifikovaná funkce pro 1 senzor.	30
Obrázek 27 Identifikovaná funkce pro 2 senzor.	30
Obrázek 28 Histogram pro tloušťku hliníkového plechu 1.07 mm.....	31
Obrázek 29 Foto přístroje.	33

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry senzoru pro měření tloušťky.....	15
Tabulka 1 Nastavení obvodů LDC1000 pro měřič tloušťky a detektor svaru.....	21

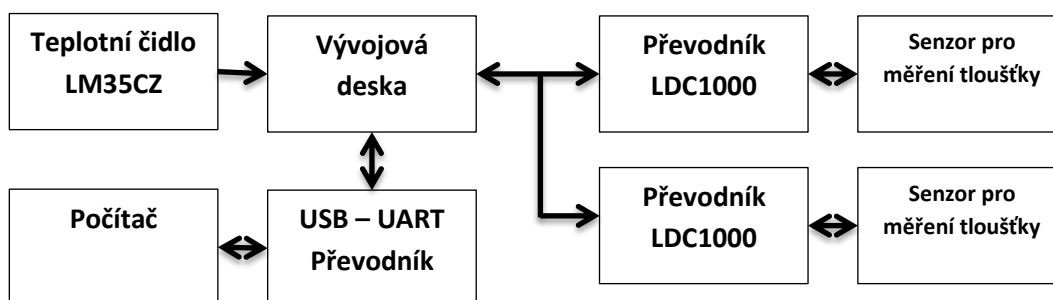
1 Úvod

1.1 Motivace

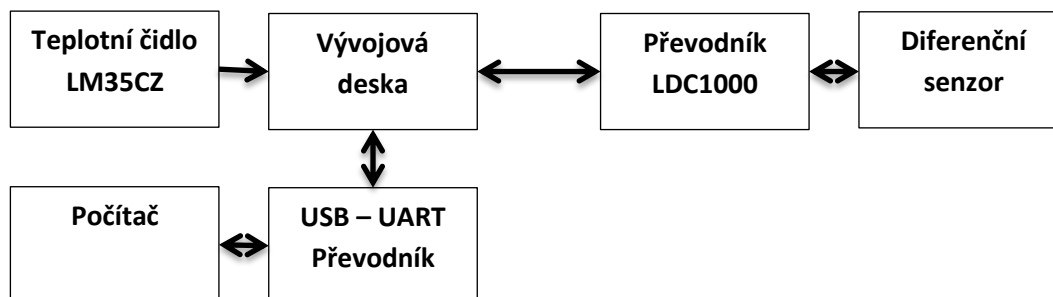
Cílem této bakalářské práce je navrhnout a vytvořit průmyslový měřič tloušťky kovového neferomagnetického plechu a detektor svarů. Tento měřič se může používat pro měření tloušťky listu kovu, v procesech válcování pro regulaci vzdálenosti válců nebo jako detektor svaru a vad v lisování a vystřihování, kde je detekce nutná pro zvětšení kvality výrobku.

Tento přístroj má využívat moderní obvod LDC1000 od firmy Texas Instruments (tzv. převodník indukčnost - číslo), musí mít dotykový displej pro ovládání a také pracovat autonomně. Měřič musí mít vysoké rozlišení pro měření tloušťky a vysokou rychlost při detekci svaru.

1.2 Blokové schéma přístroje



Obrázek 1 Bloková schéma přístroje pro měření tloušťky.



Obrázek 2 Bloková schéma přístroje pro detekci svaru

Pro řešení jsou použité 2 vývojové moduly LDC1000EVM a vývojová deska STM32F429IDISCOVERY. Pro detekci svarů je jeden z modulu připojen k diferenčnímu senzoru (LC obvod 2 cívky v protifázi). Návrh a výroba diferenčního senzoru jsou také součástí bakalářské práce. Pro měření tloušťky jsou použité dva moduly LDC1000EVM a senzory pro měření tloušťky upevněné vůči sobě na koncích rámu tvaru C. Obvod LDC1000 komunikuje s vývojovou deskou pomocí SPI rozhraní. Řízení přístroje probíhá pomocí dotykového displeje na vývojové desce. Kalibrace se dělá v Matlabu a komunikace s Matlabem je realizovaná pomocí rozhraní UART (pro komunikaci s počítačem je využit UART – USB převodník). Měření teploty okolí pro teplotní kompenzaci je realizovaná pomocí teplotního čidla LM35CZ a AD

převodníku na vývojové desce. Prozkoumaná stabilita údaje (udělané grafy a histogramy toho, jak se chová obvod na různých nastaveních a vzdálenostech), vysvětlená volba doporučených nastavení - konkrétně pro měření tloušťky a pro detekci svaru.

2 Teorie

2.1 Principy bezdotykového měření vzdálenosti

Existují tři základní principy bezdotykového měření vzdálenosti založené na využití indukčnostních, kapacitních a optoelektronických senzorů polohy.

Indukčnostní senzory polohy jsou pasivní senzory, v nichž je měřená veličina převáděna na změnu indukčnosti nebo vzájemné indukčnosti. Magnetický obvod senzorů může být uzavřený nebo otevřený, uspořádání jednoduché nebo diferenciální.

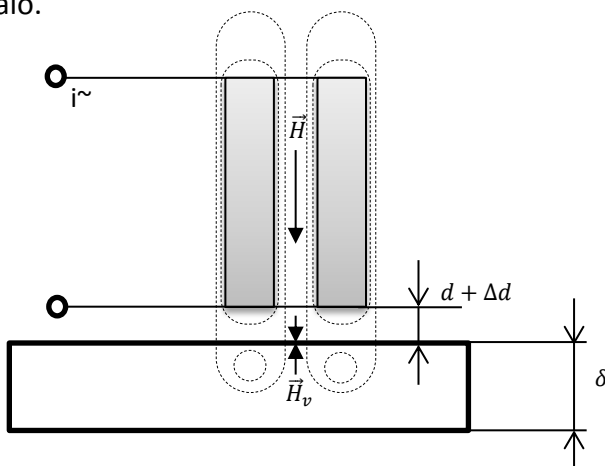
Kapacitní senzory jsou vhodné pro měření veličin ovlivňujících kapacitu kondenzátoru, tj. geometrii elektrod a permitivitu prostoru, v němž se uzavírá elektrické pole kondenzátoru.

Optoelektronické senzory polohy se používají závislost mezi výstupní veličinou detektoru a parametry zdroje optického záření. V této práci se budeme zabývat indukčnostními senzory na principu vířivých proudů.

2.2 Vířivý proud

Vířivé proudy - jsou elektrické proudy vznikající v plošných a objemových vodičích, když se v jejich okolí mění magnetický indukční tok. Indukované proudy mají v takových případech charakter proudových smyček.

Podstata indukčnostních senzorů na vířivých proudech je znázorněna na obr. 3. Vířivé proudy jsou vyvolány střídavým magnetickým polem cívky $\vec{H}(j\omega)$ vyvolají v materiálu s resistivitou ρ a permeabilitou μ sekundární („odražené“) magnetické pole o intenzitě $\vec{H}_v(j\omega)$ působící proti poli, které je vyvolalo.



Obrázek 3 Generování vířivých proudů na povrchu kovu.

Nejvyšší hustota vířivých proudů je na povrchu a s hloubkou exponenciálně klesá. Toto se nazývá povrchový jev „skin efekt“. Velikost poklesu hustoty proudů v závislosti na podpovrchové hloubce je charakterizována hloubkou vniku δ .

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

kde ρ rezistivita vodiče

ω kruhový kmitočet proudu v budicí cívce.

μ absolutní magnetická permeabilita vodiče

Vířivé proudy produkují své vlastní magnetické pole, to působí společně s primárním magnetickým polem cívky. Měřením změn v odporu a impedanci cívky, můžeme shromažďovat informace o zkoušeném materiálu. Tato informace zahrnuje elektrickou vodivost a magnetickou permeabilitu materiálu a stav materiálu.

Vzdálenost cívky od vodivého materiálu ovlivní vzájemný indukční odpor okruhů. Toto může být užito pro měření tloušťky nevodivého nátěru jako je barva. Ten totiž udrží sondu v jisté vzdálenosti od povrchu vodivého materiálu. Pomocí magnetické permeability lze také rozlišovat materiály jako železo, nikl, a kobalt.

Diagnostika vodivých materiálů vířivými proudy je jedna z metod nedestruktivního testování, která využívá principy elektromagnetismu jako základ pro zkoumání vodivosti.

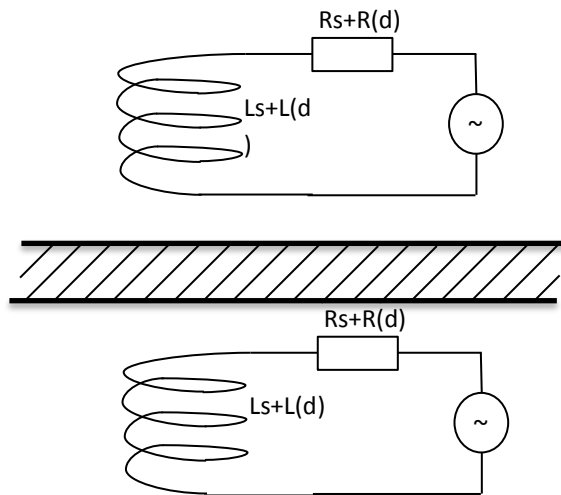
Metoda je založena na principu vzniku vířivého proudu na povrchu vodivého materiálu, který je skrze sondu je schopen detekovat vadu na povrchu materiálu.

V této práci se budeme zabývat měřením tloušťky a detekováním svaru. Pro tyto účely je nejlépe použít 2 druhy senzorů: senzor pro měření tloušťky a diferenční senzor pro detekci svaru.

2.2 Senzor pro měření tloušťky

Senzory pro měření tloušťky obvykle mají jednu zkušební cívku, která je užívána pro generování vířivých proudů. Střídavý proud prochází cívkou, díky čemuž se generuje kolem cívky magnetické pole. Když je senzor umístěn vedle vodivého materiálu, změny magnetického pole vytváří vířivé proudy uvnitř materiálu. Vytváření vířivých proudů zmenší energii v cívce a to se projeví jako vzrůst elektrického odporu cívky. Vířivé proudy generují svoje vlastní magnetické pole, které má opačnou orientaci než magnetické pole cívky. To ovlivňuje induktivní reaktanci cívky. Měřením absolutní změny v impedanci zkušební cívky se dá získat informace o zkoušeném materiálu. Tyto senzory jsou citlivé k věcem jako vodivost, permeabilita a teplota.

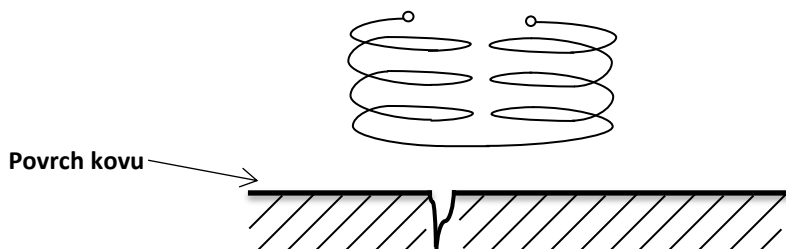
Pro měření tloušťky se dá použít 2 takových senzorů upevněné vůči sobě na určité vzdálenosti. Pokud mezi nimi umístít list kovu můžeme změřit vzdálenost mezi každým senzorem a listem a tím pádem vyhodnotit tloušťku kovu.



Obrázek 4 Měření tloušťky metodou vířivých proudů.

2.3 Diferenční senzor pro detekci svaru

Diferenční senzory mají dvě činné cívky vinuté v protifázi. Když jsou obě cívky nad oblastí bezvadného zkušební vzorku, tak není žádný rozdíl v signálech, vyvolaných cívkami. Když se jedna cívka nachází nad defektem a druhá je nad materiálem bez vady, pak vznikne rozdíl v signálech.



Obrázek 5 Zkoumání plechu diferenčním senzorem.

Výhodou je velká citlivost na defekty a poměrně malá citlivost k pomalu proměnným vlastnostem jako je například kolísání teploty. Nevýhodou použití diferenční sondy je, že může být obtížné interpretovat signály. Například, když je vada delší než vzdálenost mezi oběma cívkami, tak budou odhaleny pouze čelní a zadní hrany. Střed poruchy nebude odhalen, protože oba signály budou stejné.

3 Využité součástky

3.1 Vývojová deska STM32F429IDISCOVERY

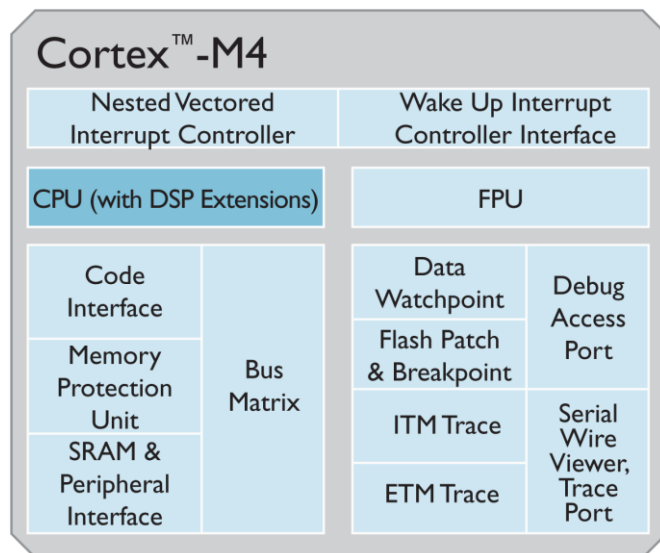
Pro realizaci projektu byla zvolena vývojová deska STM32F429I DISCOVERY, postavená na jednojádrovém 32-bitovém procesoru STM32F429ZIT6 ve 144-pinovém pouzdru LQFP144. Procesor obsahuje jednotku FPU (floating point unit) – která umožňuje práce s čísly s plavoucí desetinnou čárkou.

Výběr této desky byl dán:

- Kompaktností zařízení.

V desce už jsou základní periferie (tlačítka, LED), datový konektor, HW debugging (ST-LINK/V2 debugger umožňuje programovat a debugovat program a nese rovněž konektory pro Serial Wire Debug(SWD)).

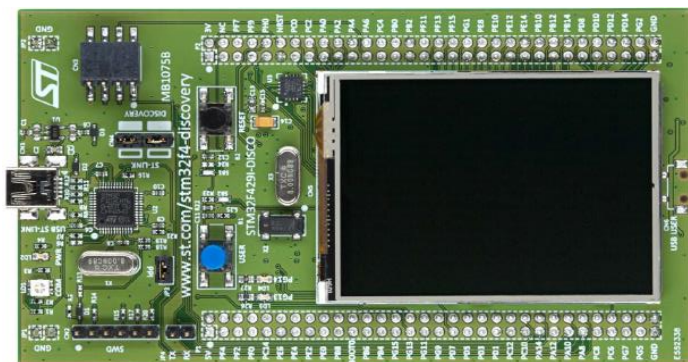
- Deska má na sobě LCD dotykový displej, který je vhodně použit pro ovládání přístroje.
- Kvalitní SW podporou (knihovny, ovladače, IDE) pro programování.
- Tuto desku lze napájet z rozhraní USB nebo externě ze zdroje stejnosměrného 5V napětí.



Obrázek 7 Blokové uspořádání Jádra ARM

Hlavní vlastnosti této desky jsou:

- Frekvence MCU 180MHz
- Vnitřní paměť: Flash 2MB, RAM 256kB
- Velké pouzdro se 144 piny
- 64Mbit vestavěné paměti SDRAM
- 2.4" QVGA (320x240) barevný dotykový TFT LCD displej.
- 24 kanálů ADC, 4 USARTs/4 UARTs
- 6 SPI portů (45 Mbits/s), 3 × I2C rozhraní atd.

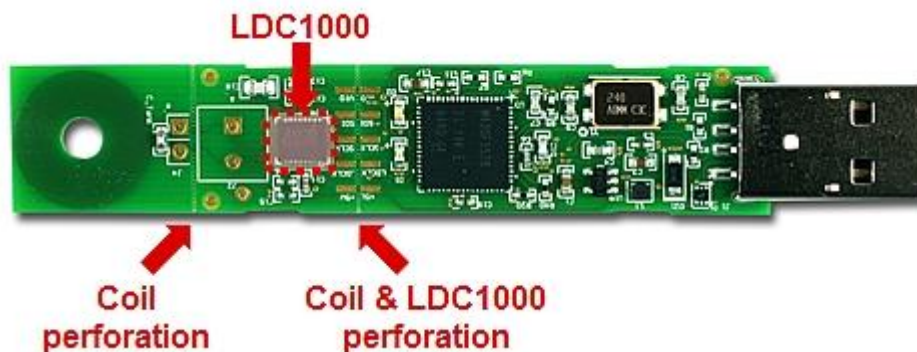


Obrázek 6 Vývojová deska STM32F429I DISCOVERY

3.2 Modul LDC1000EVM a převodník LDC1000

3.2.1 Modul LDC1000EVM

Modul LDC1000EVM je plošný spoj, výrobek společnosti Texas Instruments, který má na sobě LC obvod (senzor vířivých proudů), převodník LDC1000 a USB rozhraní které umožňuje připojení tohoto obvodu k počítači.



Obrázek 8 Modul LDC1000EVM

3.2.2 Převodník LDC1000

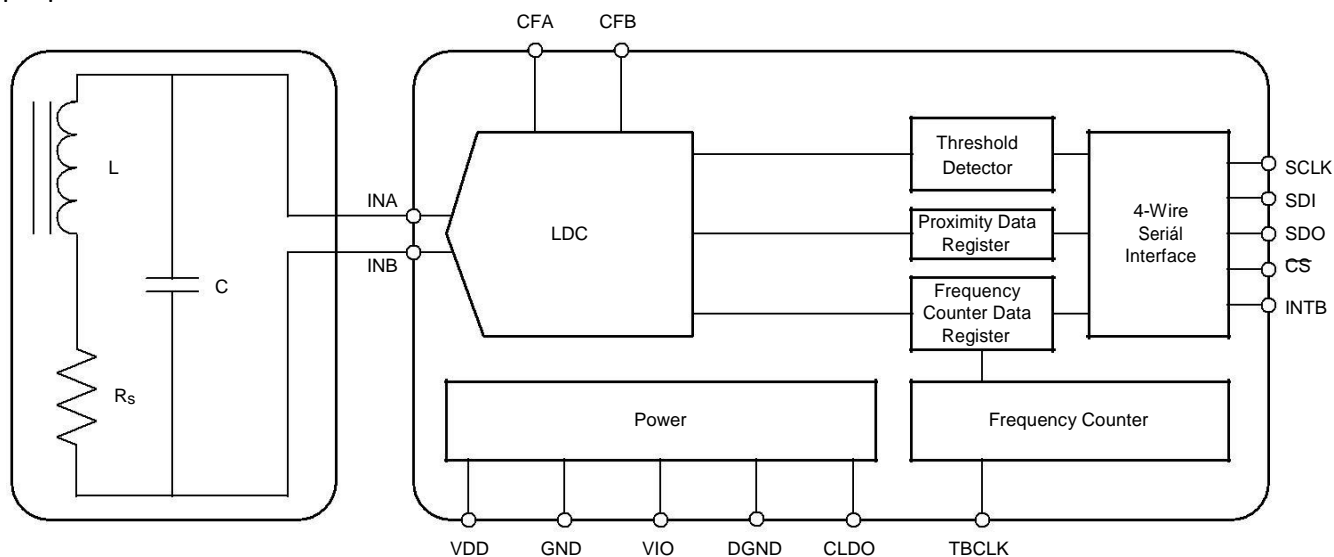
LDC1000 je převodník „indukčnost – číslo“, který je schopen provozovat indukční snímání.

LDC1000 Hlavní vlastnosti:

- Frekvence oscilátoru (Oscillation frequency) - 5 kHz to 5 MHz
- Amplituda oscilátoru (Oscillation amplitude) - 1,2,4 V
- Měření parazitního odporu R_p :
- Rozsah: 798 Ω to 3.93 M Ω .
- R_p rozlišení: 16-bit.
- Měření indukčnosti L: L rozlišení 24-bit
- Maximální rychlost měření (Maximum output data rate) - 78 kHz
- Rozhraní pro práci s obvodem: SPI

Převodník LDC 1000 současně měří impedance a rezonanční frekvence LC oscilátoru. K tomu dochází regulováním amplitudy oscilátoru na konstantní úroveň a měřením energie rozptýlené na rezonátoru. Monitorováním výkonu dodaného do rezonátoru, LDC 1000 může zjistit hodnotu parazitního odporu R_p . Na výstupu obvodu dostaneme číslicovou hodnotu, která je inverzně proporcionalní R_p . Převodník také měří frekvence oscilací LC obvodu, ta frekvence se používá

pro zjištění indukčnosti LC obvodu. V tom případě jsou výstupní data z převodníku inverzně proporcionalní frekvence.

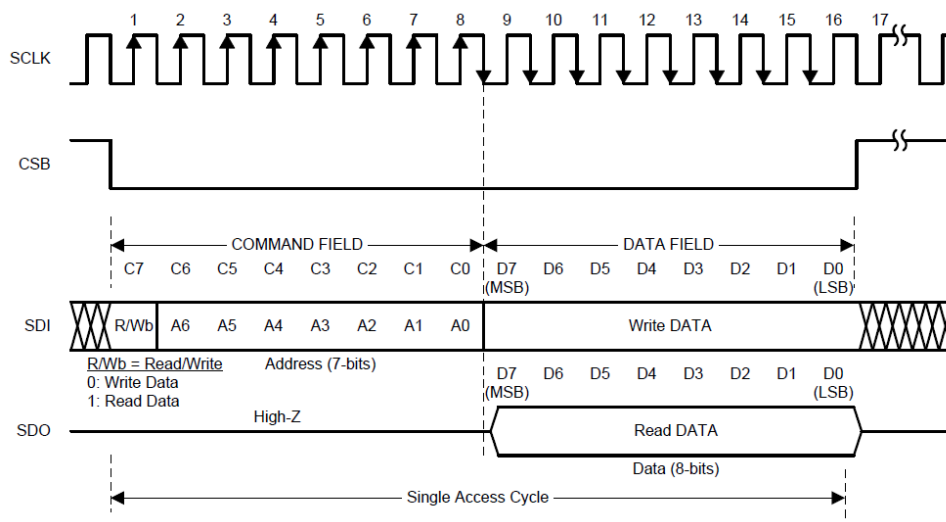


Obrázek 9 Bloková schéma převodníku LDC1000.

3.2.3 Komunikace s obvodem LDC1000

Převodník má standardní SPI rozhraní. Veškerá komunikace jako je nastavení tohoto převodníku a čtení dat se provádí pomocí 4 pinů: SCLK signál hodin, SDI – vstupní data, SDO – výstupní data a \overline{CS} – signál „chip select“.

Každá spádová hrana \overline{CS} (pin CSB u LDC1000) začíná nový přístup k registru. R/Wb bit zadává směr přístupu, pokud je to „0“ (úroveň „low“) tak pak následuje zápis do příslušného registru, pokud je to „1“ (úroveň „high“) MCU čte adresu která jde hned po rozhodovacím bitu. Po R/Wb bitu jde 7 bitová adresa ze které MCU bude číst nebo do které bude zapisovat. Dál následuje 8 bitové pole pro zápis dat do LDC1000. První bit v datovém poli (D7) je MSB. Všechna výstupná data jsou řízená na spadovou hranu, všechny vstupní na náběžnou hranu signálu synchronizačních hodin SCLK. Signál \overline{CS} po každých 16 bitech třeba vracet do původního stavu (úroveň „high“). Maximální povolená frekvence synchronizačních hodin je 4MHz.



Obrázek 10 Časový diagram komunikace s obvodem LDC1000

3.2.4 Režimy převodníku

Režimy napájení (Power Modes).

a. Active Mode: V tomto režimu je konverzace dat povolena. Nastavení tohoto módu se dělá zápisem 0x01 na adresu 0x0B převodníku.

b. Stand-by Mode: Je implicitní nastavení převodníku při zapnutí. V tomto módu je konverzace dat zakázána. Nastavení tohoto módu se dělá zápisem 0x00 na adresu 0x0B převodníku.

INTB Pin režimy (INTB Pin Modes).

INTB terminál je nastavitelný výstupní terminál, který může být použit pro řízení přerušení na MCU. LDC1000 má 3 režimy INTB terminálu.

a. Comparator Mode

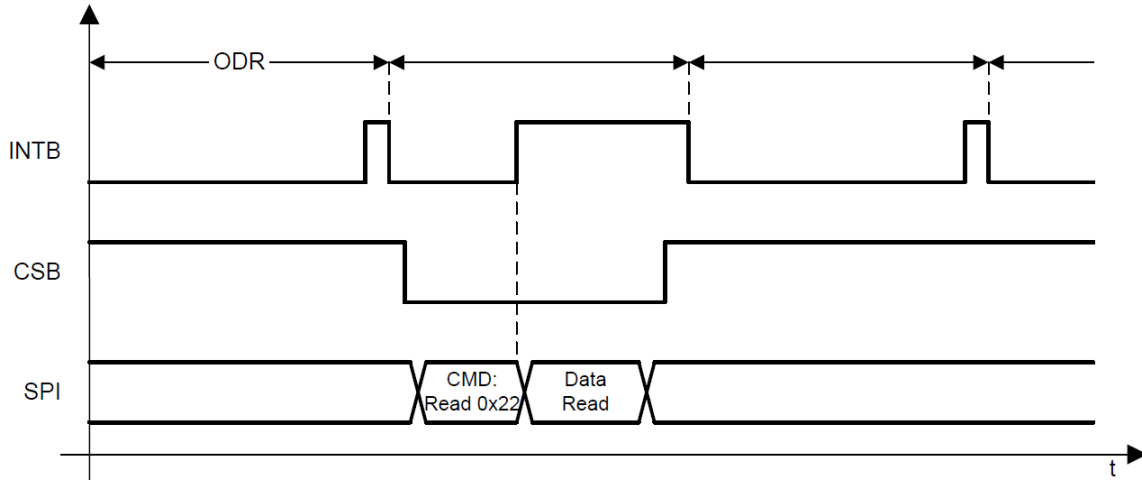
Prahový detektor v převodníku LDC1000 je prováděn komparátorem s hysterezí a možností programování registru – threshold registr (prahová úroveň, enable, disable). Naměřená data s „Proximity Data“ registru se porovnávají s prahovou úrovní a INTB pin indikuje výstup. Pokud hodnota v „Proximity Data“ registru je větší než hodnota v „Threshold Low“ registru – INTB pin má úroveň „low“, naopak – „high“.

b. Wake-Up Mode

V tomto módu INTB pin vyvolá přerušení na MCU (bude mít nízkou úroveň) když hodnota v „Proximity Data“ registru překročí hodnotu uloženou v „Threshold High“ registru. Po přerušení obvod přejde do DRDY Módu.

c. DRDYB Mode

V DRDYB módu (Data Ready mode) INTB pin slouží jako „signální“ pin: pokud konverze proběhla úspěšně a data jsou hotová k vysílání – INTB změní svou úroveň na „1“ (úroveň „high“).



Obrázek 11 Chování INTB terminálu v DRDYB módu.

Nastavení těchto módů probíhá zápisem příslušné hodnoty na adresu 0x0A (0x01 pro Wake-Up Mode, 0x02 pro Comparator Mode a 0x04 pro DRDYB Mode).

3.2.5 Rychlost měření

Změnou parametrů F_{sens} (frekvence oscilátoru) a Response time (čas potřebný pro ustálení filtru) se dá měnit rychlost měření (Output Data Rate).

$$ODR = \frac{3 * F_{sens}}{Response\ time} \quad (2)$$

3.2.6 Měření vzdáleností

Neexistuje přímý fyzikální vzorec na přepočítání výstupních dat na vzdálenost. Je to ovlivněno tím, že každý materiál má svou vodivost. Proto pro výpočet vzdálenosti je třeba provést identifikaci převodní charakteristiky (výstupní data na vzdálenost) pro každý materiál a každé nastavení.

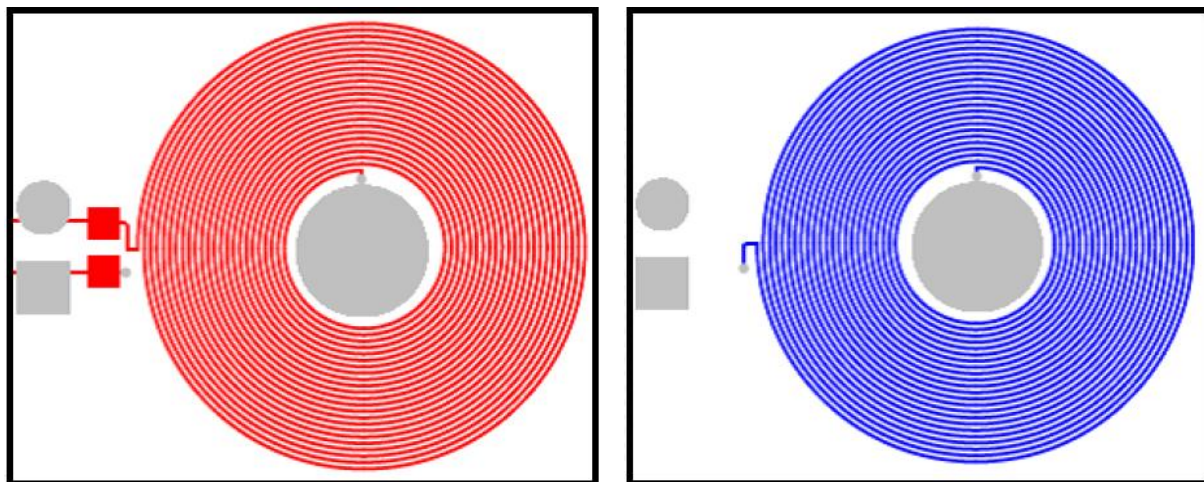
4 Návrh senzorů

4.1 Sensor pro měření tloušťky

Pro měření tloušťky jsou použité standartní senzory od modulu LDC1000EVM.

Tabulka 1 Parametry senzoru pro měření tloušťky.

Parametr	Hodnota
Vrstvy	2
Tloušťka mědi	1 Oz
Typ mědi	FR4
Tvar cívky	Kruh
Číslo závitů	23
Nominální indukčnost	18uH
Kapacita kondenzátoru	100pF



Obrázek 15 Cívka senzoru pro měření tloušťky. Pohled plošného spoje shora a zdola

Protože při měření tloušťky potřebujeme vysoké rozlišení - pro tento senzor zvolíme frekvence oscilátoru 1MHz. Čas ustálení filtru zvolíme 6144 cyklů. V tom případě podle vzorce (2) rychlost měření by měla být 0.49KSPS.

4.2 Senzor pro detekci svaru.

Diferenční senzory mají dvě činné cívky vinuté v protifázi. Zvolíme nominální indukčnost tohoto senzoru 18uH – to znamená, že potřebujeme vypočítat jednovrstvou cívku s nominální indukčností 9uH. Pro jádra cívek jsou použité plastové trubičky o průměru 7mm. Na vinutí je použit měděný drát o průměru 0.2mm bez izolace, 0.22mm s izolací. Zanedbáváme vzájemnou indukčnost.

Pro výpočet používám program Coil32, který vypočítá počet závitů podle Weaverova vzorce:

$$L = 0.0002\pi d N^2 \left(\ln \left(1 + \frac{\pi d}{2l} \right) + \frac{1}{2.3004 + 3.437 \frac{l}{d} + 1.7636 \left(\frac{l}{d} \right)^2 - \frac{0.47}{(0.755 + d/k)^{1.44}}} \right) \quad (7)$$

Kde d – průměr jádra

l – délka cívky

N – počet závitů.

Počet závitů se počítá numerickou úpravou tohoto vzorce.

Zadáme následující parametry:

One-layer coil with close winding

Coil inductance $9 \mu\text{H}$

Diameter of former D : 7 mm

Diameter of a wire d : 0.2 mm

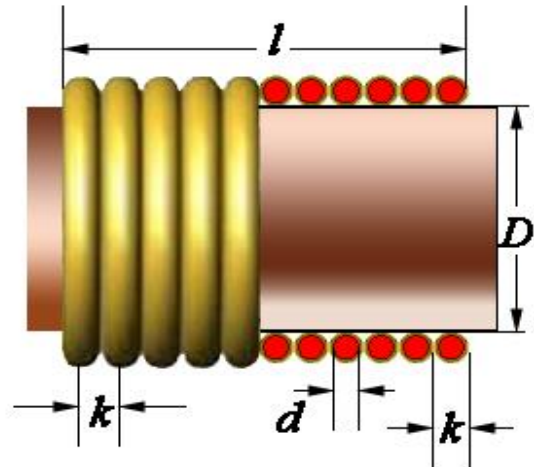
Wire diameter with isolation k : 0.22 mm

Výsledek:

=>Length of winding l : 11.429 mm

=>Length of wire without ends 1.156 m

=>Number of turns of the coil: 50.952



Obrázek 16 Tvar cívky použité v diferenciálním senzoru.

Pro tento senzor potřebujeme dvě 51 závitové cívky o délce 11.426mm. Nakonec, zvolíme kondenzátor s kapacitou 100pF (stejnou kapacitu pro LC obvod využívá modul LDC1000EVM).

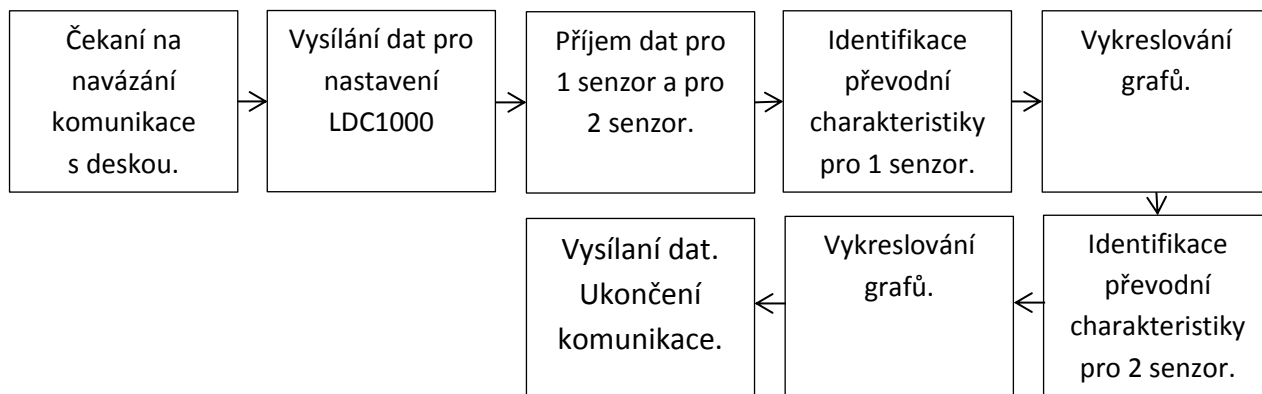
Pro tyto parametry v LDC1000 je nastavená rezonanční frekvence oscilátoru, která se vypočítá dle vzorce:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 3751.318\text{kHz} \quad (8)$$

5 Obslužný software v Matlabu.

5.1 Určení převodní charakteristiky v Matlabu

Skript calibration.m se používá pro kalibraci měřiče. Před zahájením činnosti se musí nejdřív navázat komunikace s přístrojem, vyslat nastavení pro obvody LDC1000 aby MCU nastavil tyto senzory pro kalibraci, pak přijat a zpracovat identifikační data a nakonec vyslat zpracovaná data i potřebná nastavení zpátky do vývojové desky.

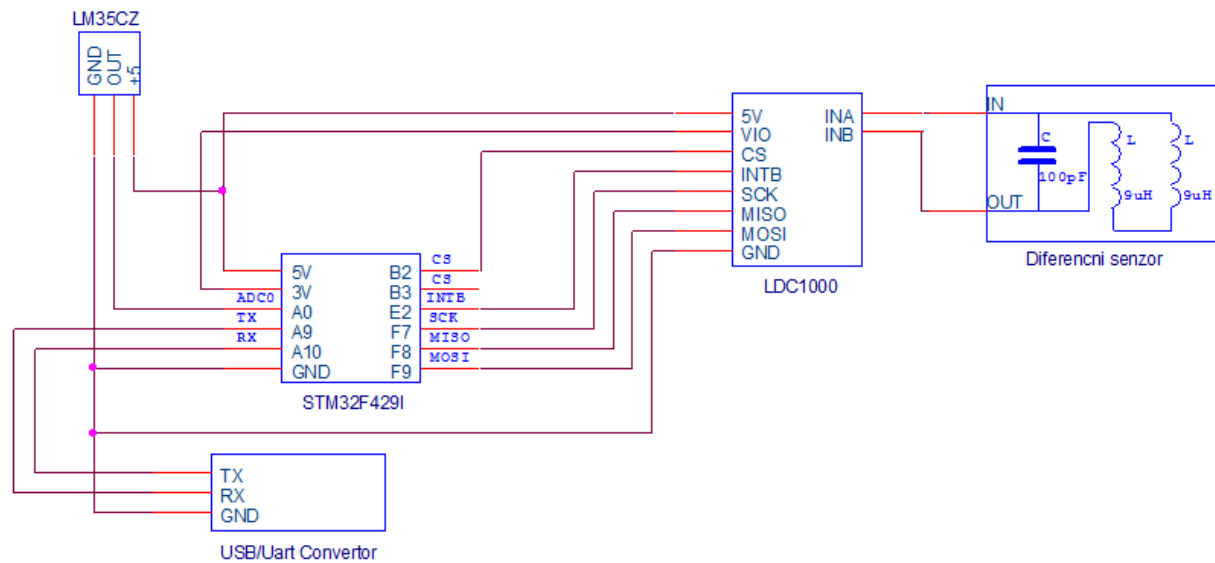


Obrázek 17 Struktura skriptu pro kalibraci přístroje.

Komunikace s přístrojem probíhá přes UART terminál Matlabu pomocí COM Port 4 počítače. Skript přijme 200 vzorků a najde střední hodnotu pro každou vzdálenost, z toho identifikuje Gaussovu funkci 7 stupně a nakonec vykreslí grafy.

Do vývojové desky se vysílají koeficienty Gaussovy funkce, data pro nastavení registru LDC1000 (frekvence a amplituda oscilátoru, čas potřebný pro ustálení, maximální a minimální parazitní odpor pro měření tloušťky a detektování svaru), prahová úroveň pro detektování svaru, maximální i minimální parazitní odpor pro výpočet teploty. Tyto data ve formátu „double“. Všechna data kromě koeficientů Gaussovi funkci jsou vstupní parametry skriptu calibration.m.

6.2 Zapojení pro detekce svarů



Obrázek 19 Zapojení pro detekce svarů.

V režimu detekci svaru stačí pouze jeden převodník LDC1000 a diferenční senzor. Pro toto zapojení budeme využívat převodník číslo 1.

7 Programování vývojové desky

7.1 Použité knihovny

Pro realizaci projektu je naprogramována vývojová deska STM32F429IDISCOVERY ve vývojovém prostředí KEIL uVision IDE.

Byly použity standartní knihovny od firmy STM:

STSW-STM32065 STM32F4 DSP and standard peripherals library

<http://www.st.com/web/en/catalog/tools/PF257901>

Pro práci s dotykovým displejem byly použité tyto knihovny:

Peripheral library for programming STM32F429 Discovery by Tilen Majerle

<http://stm32f4-discovery.com/2014/05/all-stm32f429-libraries-at-one-place/>

7.2 Spolupráce s displejem

Pro ověření funkčnosti vývojové desky byl napsán jednoduchý program – „Reakce na tlačítko“. Po stisku nakresleného tlačítka na dotykovém displeji - se na desce rozsvítí led dioda, a po opakovaném stisku zhasne. Zdrojový kód tohoto programu se dá najít v příloze k této bakalářské práci.

7.3 Komunikace LDC1000 s STM32F429ZI

1. Inicializace SPI rozhraní

Obvod LDC1000 komunikuje s vývojovou deskou pomocí SPI rozhraní. Kvůli tomu že SPI umožňuje připojení několika přístrojů na jednu sběrnici mikrořadič využívá jeden SPI port č. 5 a jemu příslušné piny: MOSI – PF9, MISO – PF8, SCKL – PF7, \overline{CS} – PB2 a PB3.

SPI port v MCU STM32F429ZI je nastaven následujícím způsobem:

SPI Mode – Master, čtení na spadovou, zápis na náběžnou hranu (CPOL = 0, CPOH = 0), První bit k pročení je MSB. SPI BaudRatePrescaler 32 – dělička na 32, SPI5 využívá zdroj hodin 45MHZ, hodiny 4MHz jsou maximálně povolené, $45\text{MHz}/32= 1.40625\text{MHz}$ což bohatě stačí.

Signál „chip select“ (\overline{CS}) je řízený z pinů PB2 a PB3 STM32F429ZI, každý obvod LDC1000 má svůj \overline{CS} .

2. Inicializace DRDYB Módu

Pro měření využíváme DRDYB Mód LDC1000, nastavíme ho zápisem hodnoty 0x04 na adresu 0x0A. Tento mód potřebuje externí přerušovací pin INTB, který zapojíme na pin PE2

STM32F429ZI. V tomto módu INTB pin slouží jako signální pin: pokud konverzace proběhla úspěšně a data jsou připravená k vysílání – INTB změní svou úroveň na „1“ (úroveň „high“).

3. Důležité nastavení

Pro korektní práci obvodu LDC1000 v tomto přístroji je třeba nastavit důležité parametry jako:

- Maximální hodnota Rp
- Minimální hodnota Rp
- Frekvence oscilátoru
- Amplituda oscilace
- Čas ustálení filtru
- Zvolit INTB režim tohoto obvodu.

Všechny parametry se nastavují zápisem příslušné hodnoty do určitého registru. Následující tabulka popisuje volbu těchto nastavení:

Tabulka 2 Nastavení obvodů LDC1000 pro měřič tloušťky a detektor svaru

Jméno registru	Adresa	Popis	Volba nastavení
Rp_MAX	0x01	Maximální hodnota Rp, kterou LDC1000 potřebuje pro měření. Tuto hodnotu se dá nastavovat od nejmenší 798Ω do největší 3.93MΩ. Podrobná tabulka těchto hodnot viz manuál.	Nejjednodušší volba těchto parametrů se provádí v programu LDC1000 EVM GUI. Nastavit Rp_MIN na minimální hodnotu = 0.798 kΩ. Nastavit Rp_MAX na maximální hodnotu = 3926.991 kΩ.
Rp_MIN	0x02	Minimální hodnota Rp, kterou LDC1000 potřebuje pro měření. Tuto hodnotu se dá nastavovat od nejmenší 798Ω do největší 3.93Ω. Podrobná tabulka těchto hodnot viz manuál.	Spustit měření a zkontrolovat „Proximity Data“. Přiblížit zkoumaný plech na minimální požadovanou vzdálenost. Nastavit Rp_MIN co nejbliž k hodnotě 32768(2 ¹⁵). Proximity Data musí být menší než 32768. Přiblížit zkoumaný plech na maximální požadovanou vzdálenost. Nastavit Rp_MAX co nejbliž k hodnotě 0. Proximity Data musí být větší než 0. Prakticky bylo vyzkoušeno, že pro měření tloušťky nejlíp sedí hodnoty RpMAX = 21547Ω (0x13) a RpMIN = 2394Ω (0x3B), pro detekci svaru: RpMAX = 21547Ω (0x13) a RpMIN = 9235Ω (0x36).

Watchdog Timer Frequency	0x03	Nastavuje watchdog timer. Změnou této hodnoty měníme frekvence oscilátoru. $N = 68.94 * \log_{10} \left(\frac{F}{2500} \right)$ kde F – frekvence senzoru.		V případě měření tloušťky nás nezajímá rychlost měření ale potřebujeme vysoké rozlišení, proto zvolíme frekvenci senzoru kolem 1MHz a Response time 6144 cyklů. Tím pádem hodnota N, kterou
LDC Configura- tion	0x04	bit	Popis:	V případě detekování svarů, nás naopak nezajímá rozlišení, ale potřebujeme rychle detektovat svar. Tady Response time bude 192 cyklů a frekvence senzoru zvolíme rezonanční frekvence diferenčního LC obvodu 3751.318 kHz. Hodnota N, kterou posíláme do převodníku se rovná 0xDB.
		7:5	Reserved	
		4:3	Nastavení Amplitudy oscilátoru: 00: 1V 01: 2V 10: 4V 11: Reserved	
		2:0	Nastavení času, potřebného pro ustálení filtru (Response Time) 000: Reserved 001: Reserved 010: 192 011: 384 100: 768 101: 1536 110: 3072 111: 6144	
INTB Terminal Configura- tion	0x0A	bit	Popis:	Jak pro měření tloušťky tak i pro detekce svarů zvolíme DRDYB mód.
		7:3	Reserved	
		2:0	000: Všechny mody jsou zakázané 001: Wake-up mode 010: Comparator mode 100: DRDYB mode	
Power Configura- tion	0x0B	bit	Popis:	Zápisem 0x01 do tohoto registru povolíme konverzací. Pro změnu nastavení, zapíšeme tam 0x00 – změníme nastavení a znovu se vrátíme do aktivního módu zápisem 0x01.
		7:1	Reserved	
		0	0:Stand-By mode 1:Active Mode. Konverzace je povolená.	

4. Čtení hodnoty parazitního odporu.

Čtení hodnoty v „Proximity data“ registru probíhá postupným čtením adresy 0x21 a adresy 0x22.

7.4 Komunikace STM32F429ZI s počítačem přes UART

V režimu kalibrace přístroj komunikuje s počítačem přes UART port mikrořadiče. STM32F429ZI využívá UART port č. 1 a jemu příslušné piny PA9 – RX, PA8-TX. Tyto piny jsou zapojené na „USB to TTL serial convertor“.

UART nastaven standartním způsobem: 8-bit délka dat, bez parity, 1 stop bit, Baud Rate 9600.

7.5 AD převodník a měření teploty.

Teplotní čidlo LM35CZ je zapojeno na vstup AD převodníku kanál číslo 1 (pin PA0). STM32F429ZI využívá 12 bitový AD převodník s postupnou aproximací. Data po převodu se nachází v data registru ve tvaru 12 - bitové hodnoty. To znamená, že maximální hodnota (která odpovídá 3V) se rovná hodnotě 0xFFF. Podle datasheetu napětí 0.25V na výstupu teplotního čidla odpovídá teplotě 25C°. To znamená, že pro měření teploty je třeba pročíst data registr, pak tuto hodnotu upravit podle tohoto vzorce:

$$T = \frac{DR*3V}{0.25V*4095} C^{\circ} \quad (9)$$

Pro přesnější výsledek změříme teplotu 100 krát a najdeme střední hodnotu.

7.6 Programování menu.

Při startu vývojové desky se na displeji zobrazuje menu pro výběr režimu měření. Režim se dá zvolit pomocí tlačítek na dotykovém displeji. Před volbou je nutné připojit správný senzor pro konkrétní měření.

Režim měření tloušťky.

Pro měření tloušťky se používají dva moduly LDC1000 a senzory pro měření tloušťky. Senzory jsou upevněné vůči sobě na koncích dielektrického C-rámu. Po startu měření přístroj nejdřív načte data potřebné pro kalibraci převodníků a pro výpočet vzdálenosti z flash paměti mikrořadiče, pak nastaví oba převodníky (probíhá nastavení frekvence a amplitudy oscilátoru, času potřebného pro ustálení, maximálního a minimálního parazitního odporu a nakonec MCU převede každý převodník do DRBYB módu a povolí konverzace). Potom obvody zahájí měření. Měření probíhá postupně, nejdřív změří jeden obvod, vypočítá vzdálenost (senzor - kov) s ohledem na teplotu, pak to samý udělá druhý obvod. Tloušťka se počítá jako rozdíl vzdáleností mezi senzory (což je 7mm) a součtem vzdálenosti kovu od prvního a druhého senzoru.

Na displeji přístroje se v tomto režimu zobrazují vypočítané vzdálenosti kovu od prvního a druhého senzoru a tloušťka zkoumaného materiálu. Ukončit tento režim se dá dotknutím do obrazovky.

Režim detekce svaru.

Pro detekci svaru se používá jen jeden modul LDC1000 a k němu připojený diferenční senzor. Po startu přístroj nejdřív čte data pro kalibraci z flash paměti, kalibruje převodník a pak začíná vykreslovat graf závislosti výstupu z obvodu podle času s ohledem na teplotu. Během tohoto cyklu se dá vizuálně pozorovat, jak se mění kvalita zkoumaného plechu, zda jsou tam vady nebo svary. Při překročení maximální povolené úrovně (programově se dá nastavit v režimu kalibrace) – se na vývojově desce během 2s rozsvítí led dioda LD13 (analogie - pošle signál-hlášení do dalšího zařízení).

Na displeji přístroje v tomto režimu se zobrazují výstupné data z obvodu a graf závislosti vzdálenosti podle času. Skončit tento režim se dá dotknutím do obrazovky.

Režim kalibrace.

V tomto režimu se na displeje vypíší pokyny pro kalibraci, je potřeba nastavit plech na první vzdálenost a postupovat podle těchto pokynů. Kalibrace se dělá pro oba senzory najednou. Nejdřív obvod čeká na komunikaci s Matlabem. Při navázání komunikace (spouštění skriptu v Matlabu) přístroj dostane nastavení pro obvody LDC1000 a nastaví příslušné registry. Pak obvod vysílá naměřená data a čeká, pokud se plech posune operátorem na další pozici a tak dále. Po skončení tohoto cyklu Matlab zpracuje data, vytvoří převodní funkci, vykreslí grafy pro kontrolu a vyšle kalibrační data do vývojové desky.

Na displeji přístroje se v tomto režimu zobrazují pokyny pro operátora.

Kalibrační data: 21 koeficient Gaussovy funkce pro každý senzor, frekvence a amplituda oscilátoru, čas potřebný pro ustálení, maximální a minimální parazitní odpor pro měření tloušťky a detektování svaru (pro inicializace obvodu LDC1000), prahová úroveň pro detektování svaru, maximální i minimální parazitní odpor pro výpočet teploty. Všechny kalibrační data se uloží do paměti flash po přijetí. Teplota se změří až nakonec a také se uloží do paměti flash.

8 Výsledky

8.1 Spolupráce s programem TI LDC1000 EVM GUI.

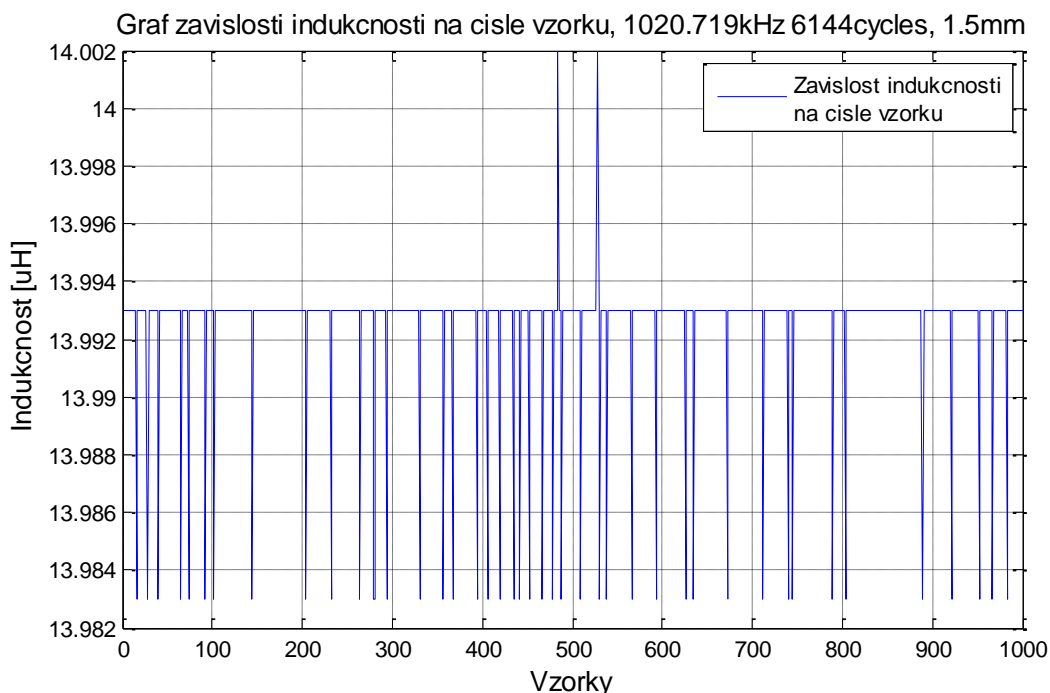
Pro zkoumání možnosti obvodu LDC1000 (stabilita údajů, možné nastavení atd.) bylo proděláno několik měření pomocí modulu LDC1000EVM a LDC 1000 EVM 1.0.4.1 GUI aplikace.

Měření se provádělo na několika různých vzdálenostech a nastaveních, cílem těchto měření bylo získat optimální nastavení pro použití LDC1000 při měření tloušťky a detektování svarů. Výsledky měření se dají logovat. Výsledný soubor obsahuje výstupní data z převodníku a vypočtenou indukci a také je plně kompatibilní s Matlabem.

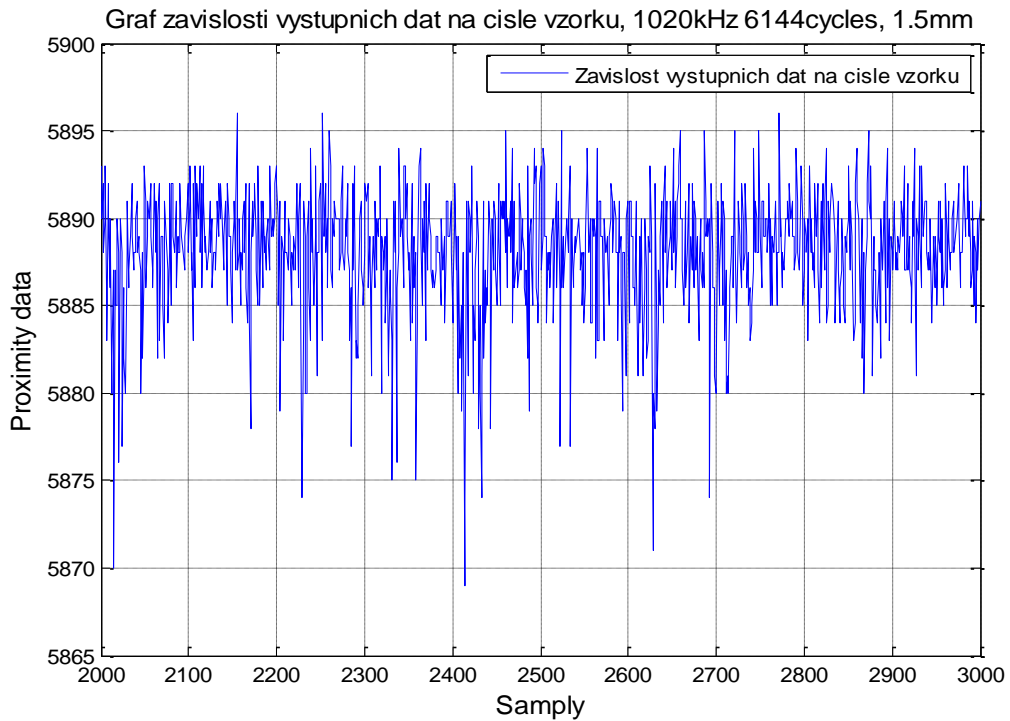
Při každém měření kus hliníkového plechu byl upevněn na určité vzdálenosti, bylo naměřeno a nalogováno několik tisíc vzorků a pak byl výsledný soubor konvertován do Matlabu.

8.2 Zpracování výstupních dat z LDC1000 EVM.

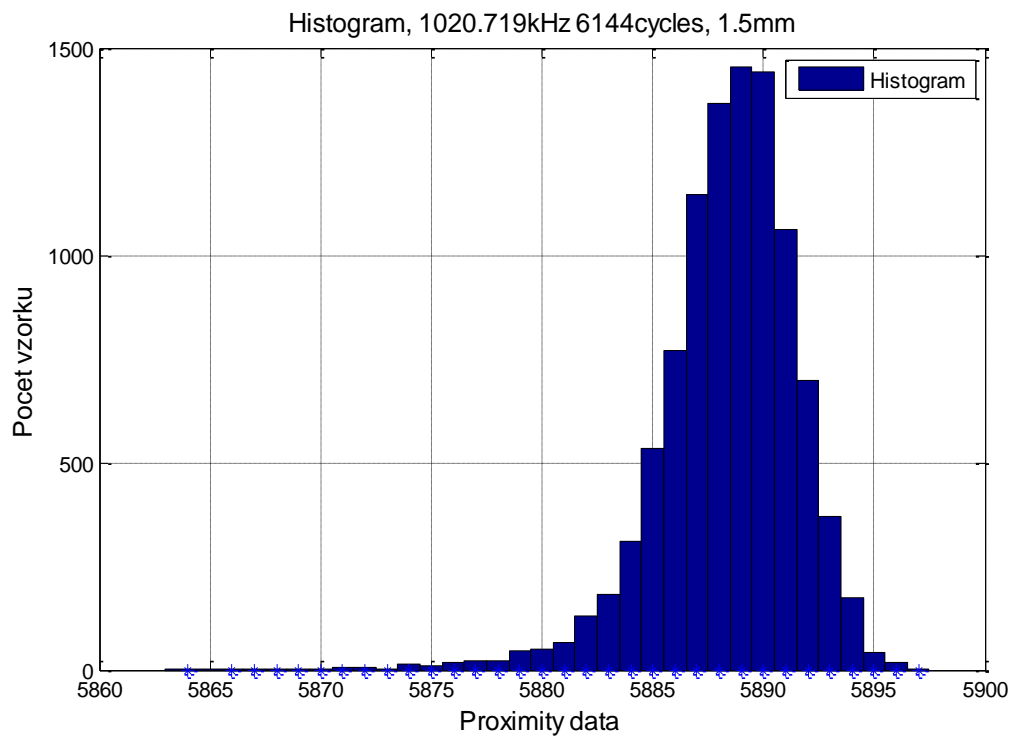
Z naměřených výsledků pro každé měření byly udělané následující grafy:



Obrázek 20 Příklad grafu závislosti indukčnosti na čísle vzorků



Obrázek 22 Příklad grafu závislosti výstupních dat na čísle vzorků



Obrázek 21 Příklad histogramu výstupních dat

8.3 Měření vzdálenosti modulem LDC1000EVM

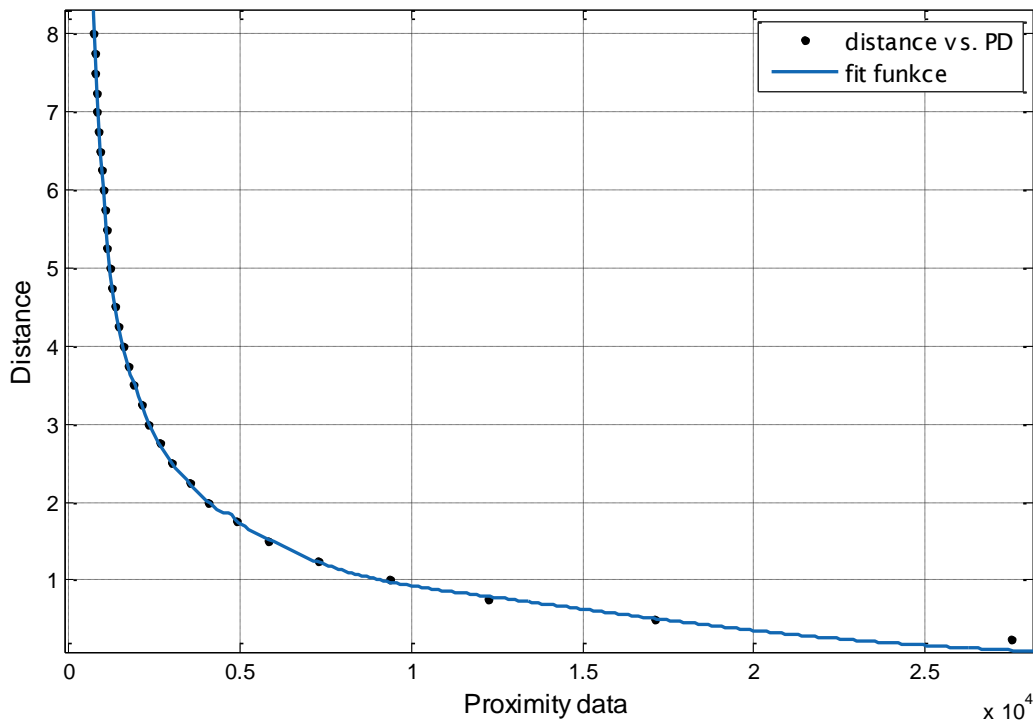
Kvůli tomu, že každý materiál má svou vodivost je pro přesnější měření vzdálenosti třeba provádět identifikace převodní charakteristiky (výstupní data z obvodu na vzdálenost). To se musí dělat tak, že se naměří 200 vzorků pro stejný plech na několika různých vzdálenostech. Výsledky měření se pro každou vzdálenost logují a pak pomocí skriptu „calculate_data.m“ zpracuje identifikační data (soubor identifikation.mat který obsahuje 2 sloupce dat – výstupní data a příslušné vzdálenosti).

Tento soubor je nutný pro práci s Curve Fitting Toolboxem který je bude používat tyto data pro identifikaci příslušné funkce (výstupní data z obvodu – vzdálenost). Prakticky bylo vyzkoušeno, že ve většině případu líp sedí Gaussova funkce sedmého stupně:

$$Distance = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 e^{-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2} + a_4 e^{-\left(\frac{x-b_4}{c_4}\right)^2} + a_5 e^{-\left(\frac{x-b_5}{c_5}\right)^2} + a_6 e^{-\left(\frac{x-b_6}{c_6}\right)^2} + a_7 e^{-\left(\frac{x-b_7}{c_7}\right)^2} \quad (10)$$

kde $a_1 \dots a_7, b_1 \dots b_7, c_1 \dots c_7$ jsou koeficienty které vygeneruje Curve Fitting toolbox.
 x jsou výstupní data z obvodu LDC1000.

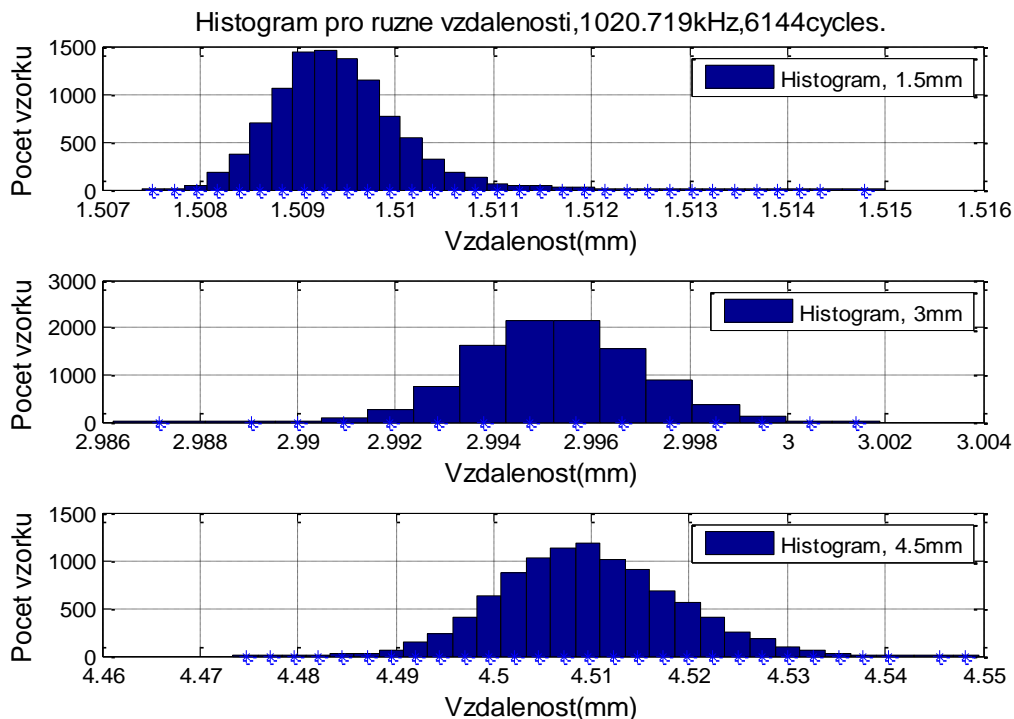
Pro lepší identifikaci je třeba změřit zkoumaný plech ve 30 až 35 bodech (minimálně v 21 bodech).



Obrázek 23 Proložení funkce v Curve Fitting Toolboxu.

Tím pádem Curve Fitting Toolbox najde funkci, která odpovídá závislosti výstupních dat na vzdálenosti. Pak když použijeme tuto funkci na zpracování dat – dostaneme vzdálenost.

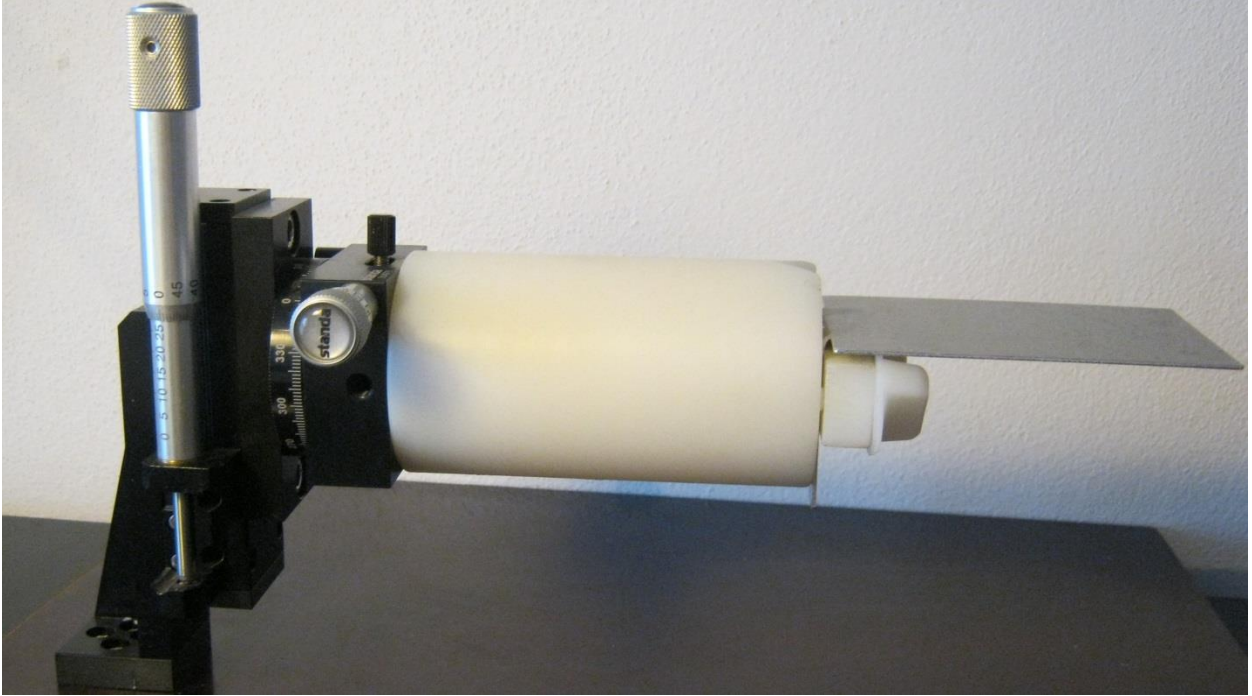
Skript `idendist.m` načte identifikační data a pak proloží je příslušnou funkcí pomocí fitting toolboxu (`fitttype('gauss7')`), a nakonec přepočítá vstupní data této funkce (data z převodníku) na vzdálenost. Z několika různých vzdáleností byly udělané histogramy pro každé zkoumané nastavení:



Obrázek 24 Příklad histogramů pro různé vzdálenosti.

8.4 Konstrukce pro měření a kalibrace

Pro identifikaci převodní charakteristiky (výstupní data z převodníku – vzdálenost) je třeba změřit kus plechu na několika různých vzdálenostech. Pro tyto účely byla použita tato konstrukce:



Obrázek 25 Konstrukce pro kalibrace a měření.

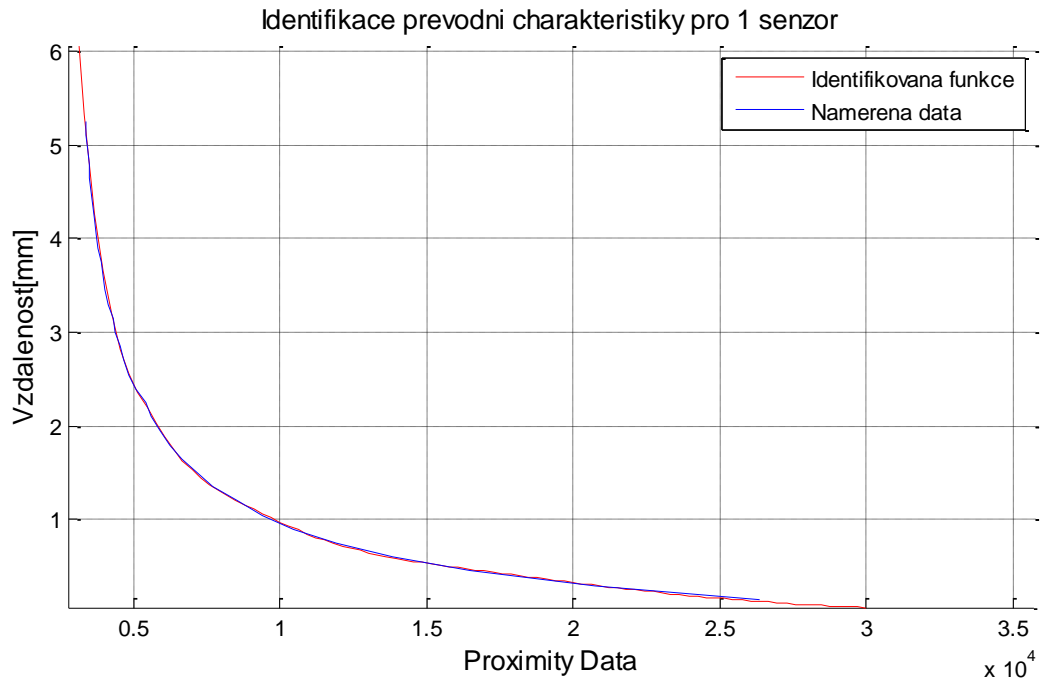
Zkoumaný vzorek se upevní na dialektickém držáku. Otáčením knoflíku posouváme plech buď nahoru, nebo dolů a pozorujeme vzdálenost.

8.5 Kalibrace přístroje

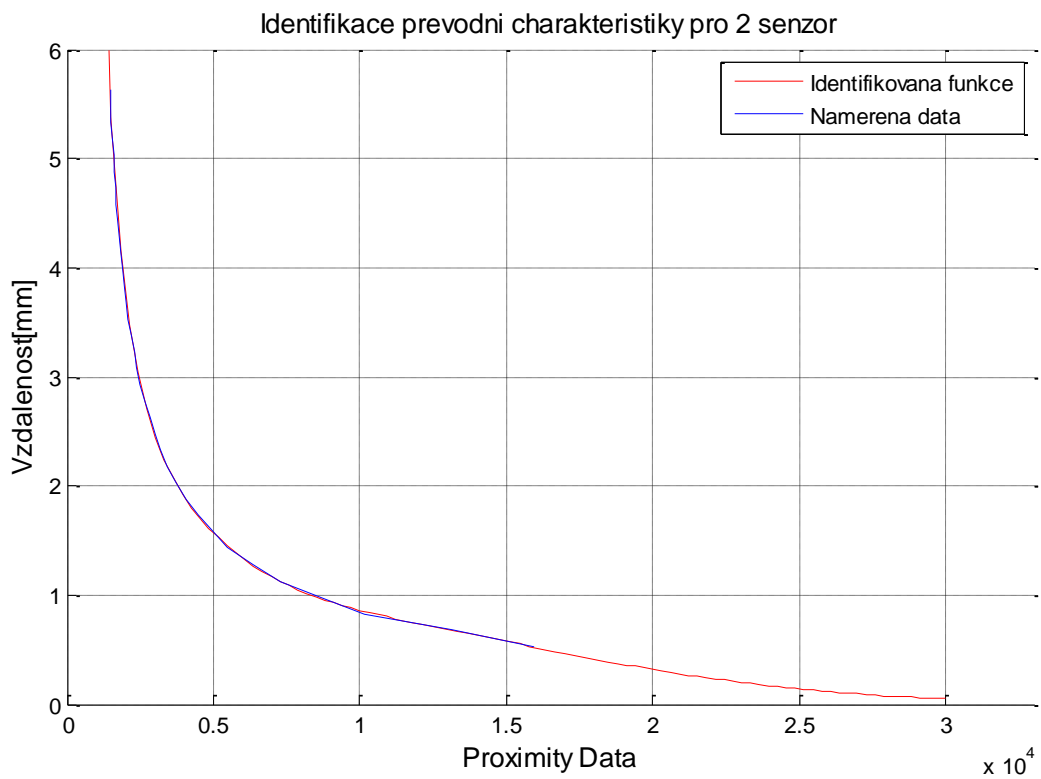
Pro přesnější měření tloušťky třeba provádět kalibraci. To se dělá tak, že se změří převodní charakteristika mezi vzdáleností a výstupními daty z obvodu pro každý senzor. Pak tato data přístroj vyšle do Matlabu, který je zpracuje - Curve Fitting toolboxem identifikuje funkce převodní charakteristiky, pak koeficienty této funkce vyšle zpátky do přístroje.

Kalibrace se provádí ve 35 bodech s krokem 0.15 mm. V každém kroku přístroj měří dvěma senzory současně. Po kalibraci se vykreslí grafy – pokud tvar těchto grafů neodpovídá tvaru exponenciály, nebo je Curve Fitting Toolbox proložil chybně – třeba zopakovat proces kalibrace. Špatný výsledek může vzniknout buď chybou operátora, nebo rušením senzoru při současném měření.

Grafy převodních charakteristik po kalibraci měřiče musí vypadat takto:



Obrázek 26 Identifikovaná funkce pro 1 senzor.



Obrázek 27 Identifikovaná funkce pro 2 senzor.

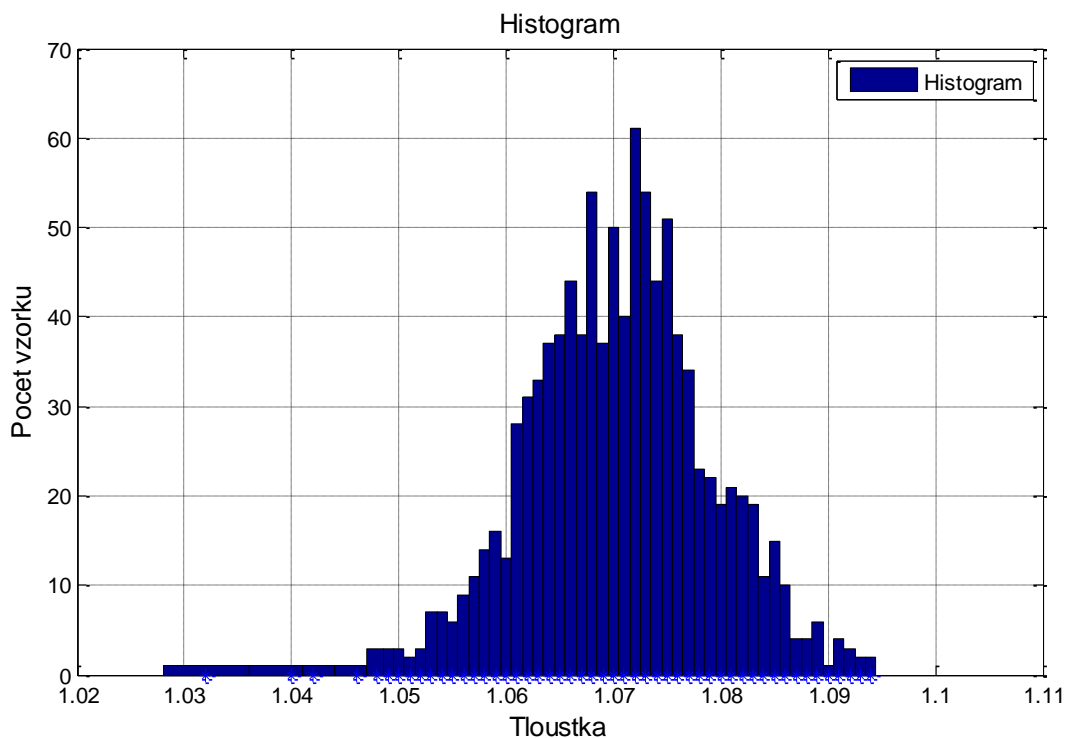
Nastavení prahové úrovně pro detekci probíhá v režimu detekování svaru, pozorováním grafu a hodnoty výstupných dat z obvodu. Nejdřív zjistíme hodnotu výstupných dat nad bezvadným povrchem plechu a nad svarem. Zapišeme tyto hodnoty a zvolíme úroveň, po které tento obvod zareaguje na změnu. Tato data budeme používat spolu s ostatními kalibračními daty pro vstup skriptu Matlabu který používáme při identifikaci.

8.6 Měření tloušťky

Tloušťka se měří jako rozdíl vzdálenosti mezi senzory (6.85mm) a součet vzdálenosti plechu od každého senzoru.

$$Tloušťka = 6.85 - dis1 - dis2 \quad (11)$$

Přístroj v tomto režimu vysílá spočítané tloušťky. Z toho byl udělán histogram pro kus testovaného hliníkového plechu.



Obrázek 28 Histogram pro tloušťku hliníkového plechu 1.07 mm.

Absolutní chyba pro měřič se vypočítá dle vzorce:

$$\Delta_X = X_M - X_S \quad (12)$$

kde X_M - naměřená hodnota

X_S - skutečná hodnota.

Pak relativní chyba se počítá takto:

$$\delta_{(x)} = \frac{\Delta(x)}{x_s} 100 \% \quad (13)$$

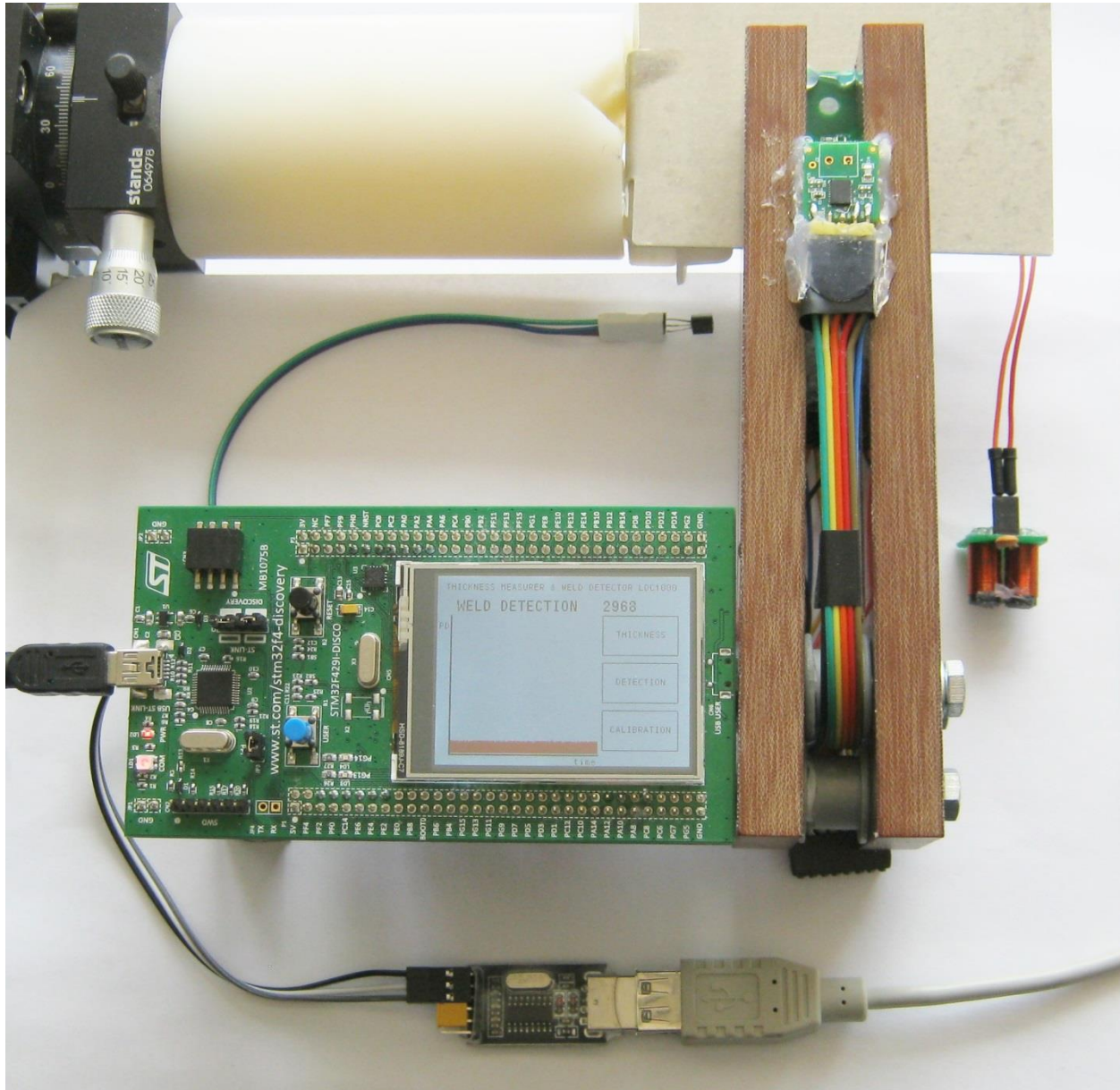
V současnosti za nedostatkem jiných kalibračních vzorků se nedá vypočítat absolutní a relativní chyby, ale můžeme vypočítat standardní nejistotu typu A:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 2.64 * 10^{-4} \text{ mm} \quad (14)$$

8.7 Detekce svarů

Byl otestován kus svařeného ocelového plechu. Při kalibraci bylo zjištěno, že se nad povrchem bez vad výstupní data pohybují kolem 13400, nad svarem kolem 15800 – proto byla zvolena prahová úroveň výstupních dat při které je detekován svar – 15000. Procházením senzoru nad svarem se rozsvítí zelená led dioda na vývojové desce.

9 Foto přístroje



Obrázek 29 Foto přístroje.

10 Závěr

V této práci byl navržen přístroj pro měření tloušťky a detekci svaru s využitím moderních obvodů LDC1000 od firmy Texas Instruments (tzv. převodník indukčnost - číslo).

Na začátku této práce jsem se seznámil s metodou měření tloušťky a detekci svaru pomocí vířivých proudů. Pak jsem se také seznámil s obvodem LDC1000 a vývojovou deskou STM32F429IDISCOVERY. Ověřil jsem možnosti převodníku LDC1000, zda se dá použít pro účely této práce. Proto jsem využil modul LDC1000EVM a GUI aplikace: LDC1000EVM_GUI. Také jsem prozkoumal možnosti vývojové desky. Napsal jsem jednoduchý program - reakce na tlačítko na dotykovém displeji. Zpracování dat pro ověření možnosti přístroje probíhala v Matlabu. Pro identifikaci převodní charakteristiky (výstup z obvodu na vzdálenost) byl využit Curve Fitting Toolbox. Programování vývojové desky jsem dělal ve vývojovém prostředí KEIL uVision IDE v jazyce C.

Přístroj má tři základní režimy: měření tloušťky, detekci svaru a kalibraci. Využívá dotykový displej pro ovládání, teplotní čidlo LM35CZ pro teplotní kompenzaci a USB-TTL konvertor pro komunikaci tohoto přístroje s počítačem. Pro měření tloušťky se používají 2 obvody LDC1000 a senzory od modulů LDC1000EVM. Pro detekci svaru se používá 1 obvod LDC1000 a diferenční senzor, který byl také navržen v této práci.

Pro kalibraci byl využit kus hliníkového plechu o tloušťce 1.07 mm. Byla nalezená převodní charakteristika (výstup z obvodu na vzdálenost) pro každý senzor. Data potřebná pro měření tloušťky a detekci svaru byla uložena v paměti přístroje.

Přístrojem byla změřena tloušťka hliníkového plechu použitého pro kalibraci. Z výsledků měření byl udělán histogram pro tloušťku (Obrázek č. 27 Histogram pro tloušťku hliníkového plechu 1.07 mm.).

Pro detekci svaru byl využit svařený ocelový plech. Pohybem senzoru nad ním byl detekován svar. Toto bylo možné pozorovat grafem výstupných dat na displeji přístroje a rozsvícením zelené led diody na vývojové desce.

Budoucí práce by spočívala v přesnějším ověření funkce tohoto přístroje, využití kalibrovaných vzorků plechu, přesnějších měřidel a také využití jiných materiálů pro měření.

11 Literatura

[1] LDC1000 Inductance to Digital Converter (Rev. A) [online] [cit. 2015-03-16] Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1000.pdf>>

[2] LDC1000 Temperature Compensation [online]. [cit. 2015-03-16] Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.ti.com/lit/an/snaa212/snaa212.pdf>>

[3] FRADEN Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. New York: 2003 Springer-Verlag, ISBN 0-387-00750-4.

[4] SHULL Peter. *Nondestructive Evaluation - Theory, Techniques, and Applications*. New York 2001 Marcel Dekker, ISBN: 0-8247-8872-9.

[5] WEAVER Robert. *Numerical Methods for Inductance Calculation*. [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://electronbunker.ca/CalcMethods3b.html>>

[6] ĎAĎO Stanislav, KREIDL Marcel, *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT 1996. ISBN 80-01-01500-9.

[7] STM32F4 Reference Manual. [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné na World Wide Web:

<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf>

[8] Teplotní čidlo LM35CZ Data Sheet. [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné na World Wide Web:

<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>

12 Obsah příloženého CD.

- BP_Merzlov_Danil.pdf - Elektronická verze bakalářské práce uložené ve formátu PDF
- Složka BUTTON - Projekt „Reakce na tlačítko“ v KEIL uVision 4.0
- Složka TMDS - Projekt „Měřič tloušťky a detektor svaru“ v KEIL uVision 4.0
- Složka 00-STM32F429_LIBRARIES
- Složka 00-STM32F4xx_STANDARD_PERIPHERAL_DRIVERS – Knihovny pro práce s vývojovou deskou
- Soubor calibration.m - soubor pro kalibraci přístroje
- Soubor thickness_histogram.m – soubor pro kreslení histogramu v režimu měření tloušťky
- Soubor Grafy.pdf – grafy závislosti indukčnosti na čísle vzorků, histogramy výstupních dat a histogramy pro vzdálenost pro různé nastavení senzoru.
- Složka LDC1000EVM – soubory pro měření a nalezení převodní charakteristiky (výstupní data - vzdálenost) pomocí modulu LDC1000EVM. Naměřené data a skripty pro různá nastavení obvodu LDC1000.