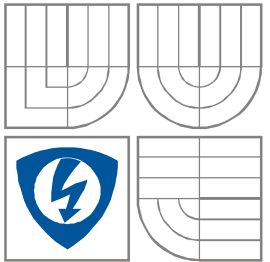


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU SENZORU PROUDU  
S VYUŽITÍM MIKROKONTROLÉRU  
CURRENT SENSOR SIGNAL PROCESSING USING MICROCONTROLLER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Luboš Tlustoš

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Martin Friedl, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Luboš Tlustoš

**ID:** 134641

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Zpracování signálu senzoru proudu s využitím mikrokontroléru**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši zabývající se mikrokontroléry a jejich využití pro jednoduché zpracování signálů. Stanovte požadavky a vyberte vhodný mikrokontrolér, například z rodiny ATmega, který bude splňovat naše požadavky. Navrhněte obvodové zapojení a desku plošného spoje.

Vytvořte program pro mikrokontrolér. Zkonstruujte prototyp podle požadavků na připojení a experimentálně ověřte jeho funkčnost.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] OPPENHEIM, A. V., SCHAFER R. W., Discrete-Time Signal Processing, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.

[2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR Pascal: základy programování mikrokontrolérů ATMEL AVR v jazyce E-LAB Pascal. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 135 s. ISBN 80-7300-113-6.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Friedl, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

V práci je popsán Wiegandův drát, senzor proudu využívající efektu Wiegandova drátu a zpracování výstupních signálů ze senzoru pomocí mikrokontroléru. Dokument je členěn do jednotlivých kapitol, ve kterých jsou obecně popsány mikrokontroléry a jejich využití pro zpracování signálů. Je zde také popsán návrh obvodů pro generování sinusového průběhu, obvodů pro vhodné upravení výstupních signálů ze senzoru proudu a návrh napájecího zdroje.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Senzor proudu, Wiegandův drát, Mikrokontrolér, Generátor sinusového průběhu

## **ABSTRACT**

In this thesis is described Wiegand wire, current sensor using Wiegand wire effect and processing the output signal from the current sensor using a microcontroller. The document is divided into chapters, each of which are generally described microcontrollers and their applications to signal processing. It also describes the design of circuits for generating sine wave, circuits for appropriate adjustment of the output signals from the sensor current and a draft power source.

## **KEYWORDS**

Current sensor, Wiegand wire, Microcontroller, Sinewave generator

TLUSTOŠ, L. *Zpracování signálu senzoru proudu s využitím mikrokontroléru.*  
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních  
technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 46 s., 7 s. příloh. Bakalářská práce.  
Vedoucí práce: Ing. Martin Friedl, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Zpracování signálu senzoru proudu s využitím mikrokontroléru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních anebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Friedlovi, Ph.D. a také Doc. Ing. Radkovi Kubáskovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 SENZOR PROUDU</b>	<b>2</b>
1.1 Popis senzoru proudu.....	2
1.2 Wiegandův drát.....	5
1.3 Metody měření proudu pomocí senzoru .....	7
1.4 Převodní charakteristika .....	8
<b>2 MIKROKONTROLÉRY</b>	<b>10</b>
2.1 Obecný popis .....	10
2.2 Využití pro zpracování signálů.....	12
2.3 Výběr vhodného mikrokontroléru .....	13
<b>3 NÁVRH ZAPOJENÍ</b>	<b>17</b>
3.1 Sinusový generátor .....	17
3.2 Úprava vstupních signálů.....	20
3.3 Komunikace s uživatelem.....	22
3.4 Napájecí zdroj .....	24
<b>4 REALIZACE ZAPOJENÍ</b>	<b>26</b>
4.1 Deska plošného spoje.....	26
4.2 Program pro mikrokontrolér .....	27
4.3 Převodní charakteristiky .....	32
4.4 Pohled ze strany uživatele.....	36
<b>5 PŘESNOST MĚŘENÍ PROUDU</b>	<b>39</b>
5.1 Naměřené odchylky .....	39
<b>6 Závěr</b>	<b>46</b>
<b>Literatura</b>	<b>47</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>48</b>

<b>A</b>	<b>Návrh zařízení</b>	<b>49</b>
A.1	Obvodové zapojení zdroje .....	49
A.2	Obvodové zapojení sinusového generátoru .....	50
A.3	Obvodové zapojení řídicí logiky.....	51
A.4	Deska plošného spoje.....	52
A.5	Osazení desky plošného spoje – top (strana součástek) .....	52
A.6	Osazení desky plošného spoje – bottom (strana spojů) .....	53
<b>B</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>54</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Struktura senzoru .....	2
Obrázek 1.2	Cívky navinuté na jádře .....	3
Obrázek 1.3	Zalitý senzor proudu .....	3
Obrázek 1.4	Výstupní impuls ze senzoru proudu a výstupní impuls z tvarovače.....	4
Obrázek 1.5	Senzor na plošném spoji s tvarovačem .....	4
Obrázek 1.6	Hysterezní smyčka Wiegandova drátu .....	5
Obrázek 1.7	Závislost výstupního impulsu na velikosti resetovacího pole .....	5
Obrázek 1.8	Závislost toku na délce drátu .....	6
Obrázek 1.9	Závislost napětí pulsu na délce .....	6
Obrázek 1.10	Budící signál senzoru a výstupní impulsy ze senzoru .....	7
Obrázek 1.11	Změřené grafické závislosti převodní charakteristiky senzoru proudu ....	9
Obrázek 2.1	Von Neumannova architektura s jednou pamětí a systémovou sběrnicí	10
Obrázek 2.2	Harvardská architektura s dvěma sběrnicemi a oddělenou pamětí.....	11
Obrázek 2.3	Vzorkování a kvantování spojitého signálu.....	12
Obrázek 2.4	Blokové schéma AVR architektury .....	13
Obrázek 2.5	Registr GICR a bity používané k povolení externích přerušení .....	14
Obrázek 2.6	Registr MCUCR a bity k nastavení události pro přerušení .....	14
Obrázek 2.7	Registr MCUCSR a bit k nastavení události pro přerušení INT2.....	15
Obrázek 2.8	Registr GIFR a příznakové bity externích přerušení .....	15
Obrázek 2.9	RegistrTCCR0 a bity pro spuštění a nastavení předděličky .....	15
Obrázek 2.10	RegistrTCCR1B a bity pro spuštění a nastavení předděličky.....	16
Obrázek 2.11	Registr TIMSK a bity pro nastavení přerušení od časovače TIMER1 ...	16
Obrázek 3.1	Schéma generátoru sinusového průběhu.....	17
Obrázek 3.2	Výstupní signál z D/A převodníku a posunutý a zesílený signál .....	19
Obrázek 3.3	Sinusový průběh za koncovým zesilovačem a vyhlazený průběh.....	19
Obrázek 3.4	Vlevo neinvertující zapojení komparátoru s OZ pro kladný impuls, vpravo invertující zapojení pro úpravu záporného impulsu .....	20
Obrázek 3.5	Výstupní impuls senzoru proudu a výstupní impuls z komparátoru .....	21
Obrázek 3.6	Schéma detekce průchodu nulou .....	21
Obrázek 3.7	Generovaný signál a signál z detektoru průchodu nulou.....	22



Obrázek 3.8	Instrukční sada řadiče HD44780.....	23
Obrázek 3.9	Znaková sada implementovaná v řadiči HD44780.....	24
Obrázek 3.10	Schéma spínaného zdroje +15V /1A .....	25
Obrázek 3.11	Schéma spínaného zdroje -15V/0,33A .....	25
Obrázek 3.12	Schéma lineárního zdroje +5V a -5V .....	25
Obrázek 4.1	Osazený plošný spoj (strana TOP).....	26
Obrázek 4.2	Osazený plošný spoj (strana BOTTOM) .....	27
Obrázek 4.3	Vývojový diagram hlavní smyčky programu .....	29
Obrázek 4.4	Vývojový diagram obsluhy přerušení.....	30
Obrázek 4.5	Převodní charakteristika pro 6 závitů .....	32
Obrázek 4.6	Převodní charakteristika pro 2 závitů .....	33
Obrázek 4.7	Převodní charakteristika pro 1 závit .....	34
Obrázek 4.8	Převodní charakteristika pro 8 závitů .....	35
Obrázek 4.9	Podoba uživatelského menu na LCD.....	37
Obrázek 4.10	Zobrazení výsledného proudu na LCD.....	37
Obrázek 4.11	Diagram uživatelského menu.....	38
Obrázek 5.1	Gafická závislost naměřených odchylek pro jeden závit měřící cívky... 40	
Obrázek 5.2	Graf odchylek naměřeného proudu pro dva závitů měřící cívky..... 41	
Obrázek 5.3	Graf odchylek proudu pro šest závitů měřící cívky .....	43
Obrázek 5.4	Graf odchylek proudu pro osm závitů měřící cívky .....	44

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1	Naměřené hodnoty převodní charakteristiky .....	8
Tabulka 2.1	Přehled událostí na které reaguje externí přerušení .....	14
Tabulka 2.2	Nastavení zdroje signálu pro TIMER0 .....	16
Tabulka 3.1	Postup inicializace alfanumerického LCD .....	23
Tabulka 5.1	Naměřené odchylky pro jeden závit měřicí cívky .....	39
Tabulka 5.2	Naměřené odchylky proudu pro dva závity měřicí cívky .....	40
Tabulka 5.3	Naměřené odchylky proudu pro šest závitů měřicí cívky .....	42
Tabulka 5.4	Naměřené odchylky proudu pro osm závitů měřicí cívky .....	43

# ÚVOD

V tomto dokumentu je popsán použitý senzor proudu využívající Wiegandova efektu, který je výsledkem bakalářské práce s názvem Bezkontaktní proudový senzor DC a AC proudu nízkých kmitočtů s využitím Wiegandova efektu, od mého kolegy Bc. Martina Štefánka.

Dále jsou v dokumentu popsány obecně mikrokontroléry a jejich využití pro zpracování slaboproudých nízkofrekvenčních signálů. Jsou zde stanoveny požadavky kladené na potřebný mikrokontrolér a následně je vybrán vhodný mikroprocesor. Dokument se také zabývá možnostmi generování sinusového průběhu pomocí mikroprocesoru a je zde zvolen vhodný způsob pro naše řešení. Dále je popsán způsob úpravy výstupních signálů ze senzoru proudu.

V dokumentu je navrženo obvodové zapojení včetně napájecího zdroje, generátoru sinusového průběhu a obvodů zpracovávajících signály ze senzoru. Práce dále popisuje samotnou realizaci prototypu experimentálního zařízení a program psaný v jazyce C potřebný pro použitý mikrokontrolér.

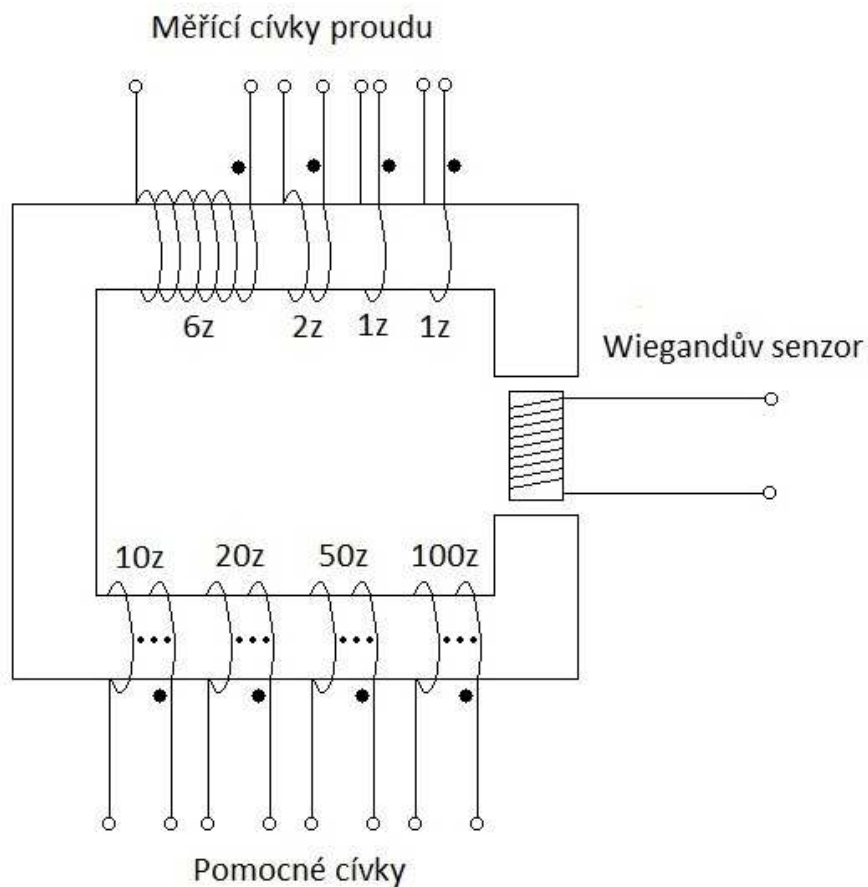
Na závěr jsou proměřeny odchylky proudu měřeného ampérmetrem, který je výsledkem této práce.

# 1 SENZOR PROUDU

V následujícím textu je stručně popsán použitý senzor proudu, pracující na základě Wiegandova efektu a je zde popsán i samotný Wiegandův efekt. Obsáhlejší popis této problematiky naleznete v práci mého kolegy Martina Štefánka s názvem Bezdrátový proudový senzor DC a AC proudu nízkých kmitočtů s využitím Wiegandova efektu. V závěru kapitoly jsou popsány metody měření proudu a převodní charakteristika senzoru.

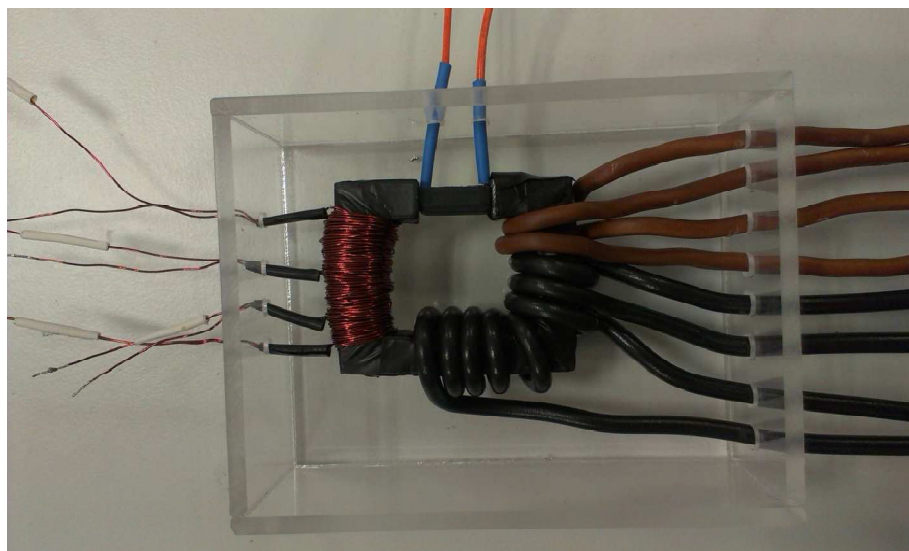
## 1.1 Popis senzoru proudu

Jedná se o magnetický obvod, jehož jádro je složeno z transformátorových plechů, na něm jsou navinuty měřicí cívky, kterými protéká měřený proud a pomocné cívky, které jsou buzeny sinusovým průběhem. Pomocné cívky se využívají pouze při měření stejnosměrného proudu, protože Wiegandův senzor pracuje pouze se střídavými magnetickými poli. V jádře je vytvořená vzduchová mezera, do které je vložen Wiegandův senzor. Na obrázku 1.1 je tento senzor názorně vyobrazen. [1]



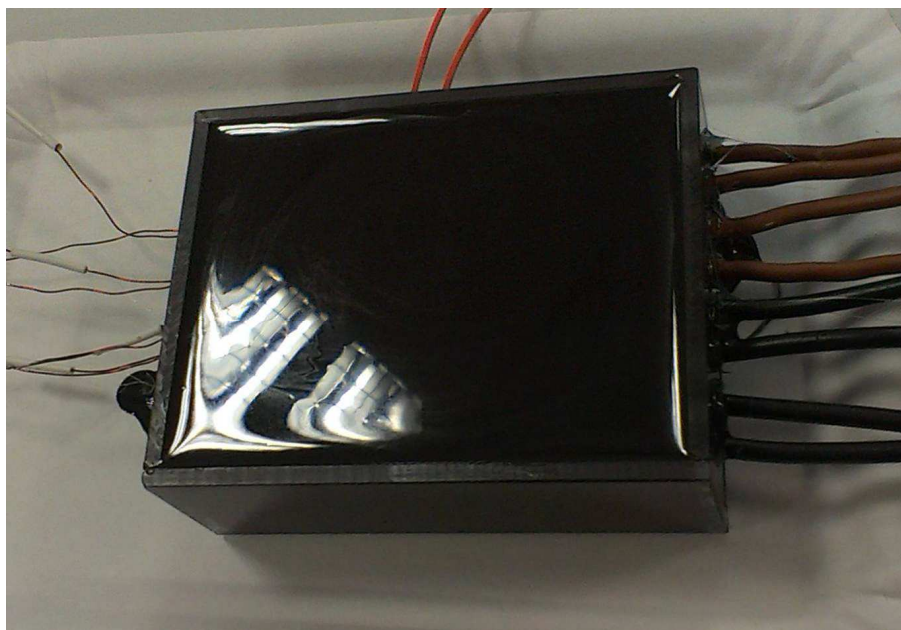
Obrázek 1.1 Struktura senzoru

Měřicí cívky v senzoru jsou čtyři a to s počtem závitů 6, 2 a dvakrát jeden závit, které umožňují přepínání měřících rozsahů proudu. Taktéž pomocná cívka není v senzoru pouze jedna, ale jsou tam opět čtyři s počty závitů 10, 20, 50 a 100. Měřicí cívky jsou navinuty drátem průřezu  $2,5\text{mm}^2$ , což umožňuje měřit proud až do 20A. Pomocné cívky jsou navinuty lakovaným drátem průměru 0,35mm, viz. obrázek 1.2. [1]



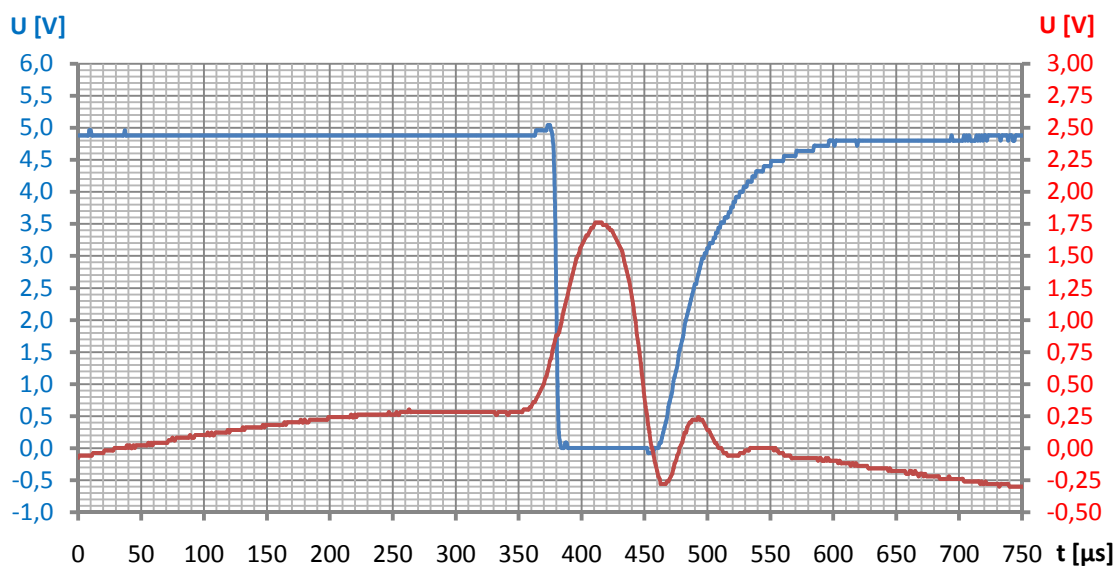
Obrázek 1.2 Cívky navinuté na jádře [1]

Celý senzor je umístěn do krabičky z plexiskla a je zalit hmotou pro elektrotechniku ELCHEMCO PU 501 LR, jak je vidět na obrázku 1.3, což zvyšuje jeho mechanickou stabilitu a dielektrickou pevnost. [1]



Obrázek 1.3 Zalitý senzor proudu [1]

Součástí senzoru je tvarovač výstupních impulsů, protože výstupní impulsy Wiegandova senzoru nejsou optimální pro další zpracování. Jako tvarovač bylo použito schéma doporučené výrobcem senzoru. Výstupní impulsy ze senzoru a z tvarovače jsou patrné na obrázku 1.4. Finální verze senzoru včetně tvarovače je na obrázku 1.5. [1]



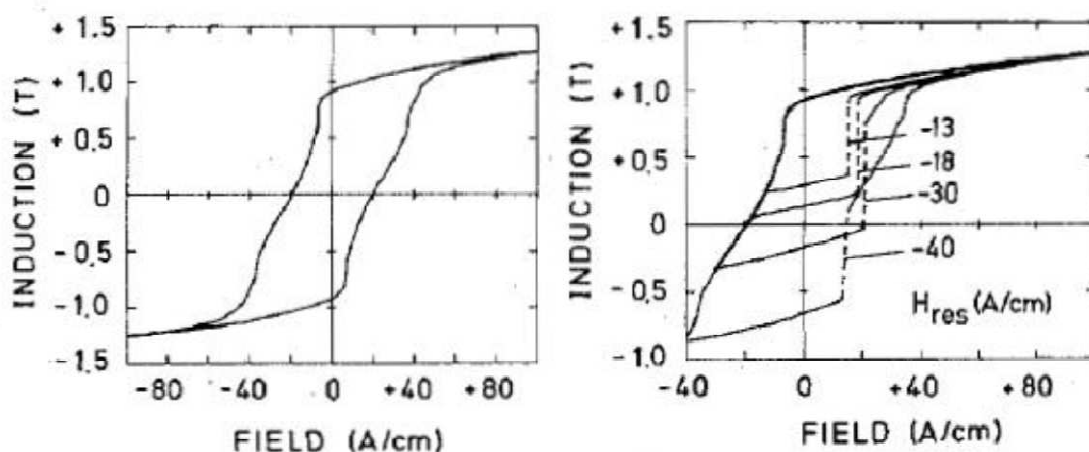
Obrázek 1.4 Výstupní impuls ze senzoru proudu (červený průběh) a výstupní impuls z tvarovače (modrý průběh)



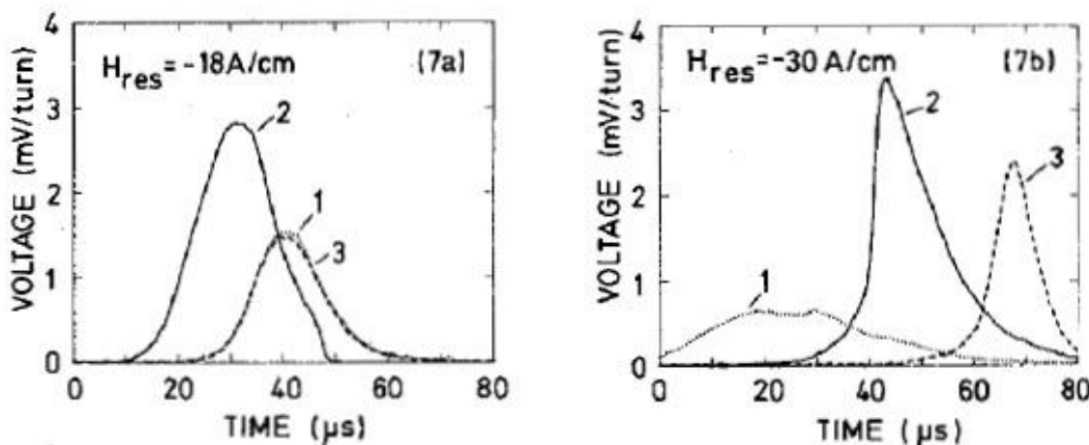
Obrázek 1.5 Senzor na plošném spoji s tvarovačem

## 1.2 Wiegandův drát

Hysterezní smyčka Wiegandova drátu je na obrázku 1.6 vlevo, v případě symetrického řízení se nezobrazí žádná velká diskontinuita. V případě asymetrického řízení nastane velký Barghausenův skok, který je zobrazen na obrázku 1.6 vpravo. V důsledku pulzního napětí bude do jisté míry záviset na resetovacím poli. Optimální podmínky jsou pro malý rozsah resetovacího pole od  $-18$  do  $-22$  A/cm, poté je obrácení toku ve středu drátu, toto je vidět na obrázku 1.7 vlevo. [1]

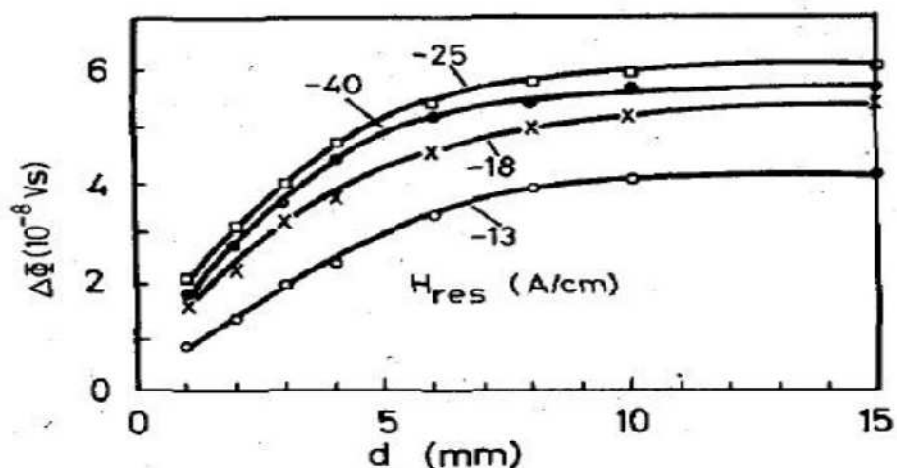


Obrázek 1.6 Hysterezní smyčka Wiegandova drátu [4]



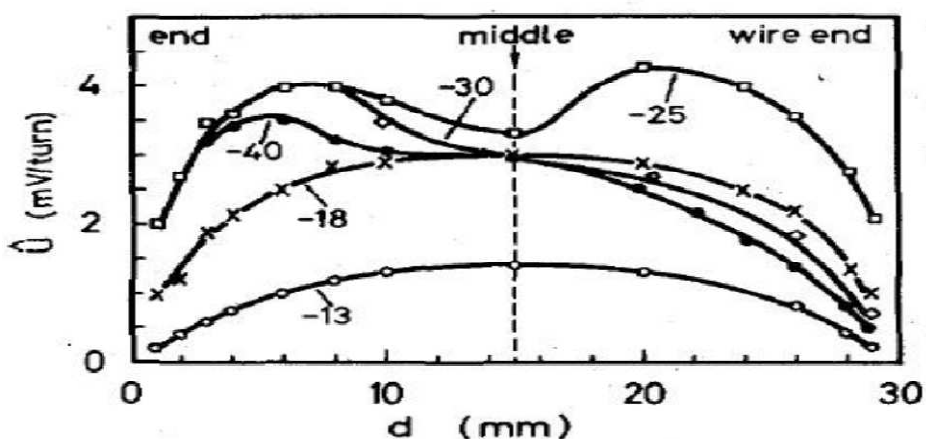
Obrázek 1.7 Závislost výstupního impulsu na velikosti resetovacího pole [4]

Chování se zcela změní, když pole vzroste až na  $-30$  A/cm nebo více. Puls začne náhodně od konce drátu, jak je vidět na obrázku 1.7 vpravo. Typické chování Wiegandova drátu a jeho velká závislost na resetovacím poli je vidět na obrázcích. Na obrázku 1.8 je závislost toku na délce drátu. [1]



Obrázek 1.8 Závislost toku na délce drátu [4]

Změna magnetického toku podél Wiegandova drátu, v závislosti na poloze, se mění s aplikováním resetovacího pole. Optimální stav, kdy špičkové napětí dosahuje svého maxima je v polovině drátu, jak je patrné z obrázku 1.9. [1]



Obrázek 1.9 Závislost napětí pulsu na délce [4]

Pro resetovací pole od - 30 do - 40A/cm zvrát toku je na konci a dosahuje nejvyšší hodnoty v blízkosti opačného konce, ale s nestabilní amplitudou. Pomocí kroucení tento vodič získá povrch s vyšší koercivitou než jádro, ale bez ostrého ohraničení. Pro tento drát je spínací jádro magneticky stabilizované pláštěm, pokud je resetovací pole menší, než koercivita pláště, dosáhne optimálního stavu při  $B = 0$ . To jen v případě pokud se  $H_{res}$  nachází v oblasti -18 až - 22A/cm. Zvyšující se resetovací pole neustále odmagnetizovává plášť, rychlé obracení toku začíná na konci drátu a je zanedbatelné ve vyšších oblastech resetování. [1]

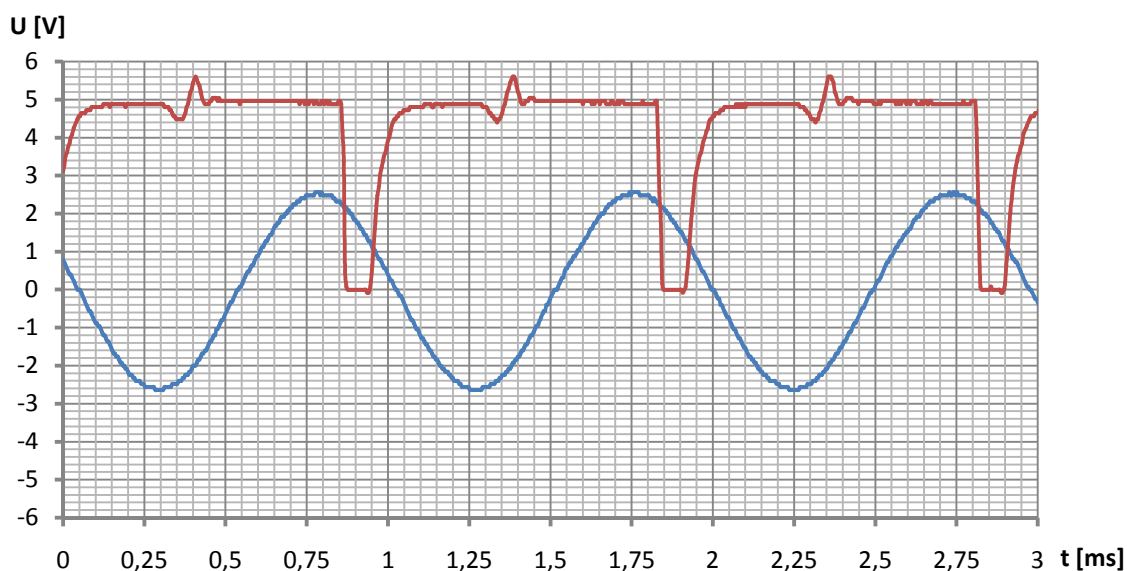


### 1.3 Metody měření proudu pomocí senzoru

Při měření střídavých proudů nejsou buzeny pomocné cívky senzoru, pouze protéká měřený střídavý proud měřicími cívkami. Ten vytváří střídavý magnetický proud v magnetickém obvodu a Wiegandův senzor generuje impulsy, čas mezi tím kdy proud projde nulou a generovaným impulsem je úměrný protékajícímu proudu. [1]

Druhou metodou měření střídavých proudů je použití pomocné cívky a měřený proud vzorkovat s periodou signálu na pomocné cívce. Při navzorkování dostatečného množství period měřeného proudu může být dosaženo určité přesnosti měření. Z naměřených vzorků je možné spočítat efektivní hodnotu střídavého proudu. Tato metoda je zde použita, protože velkou předností toho senzoru je jeho galvanické oddělení. A použitím předchozí metody a nutnosti detekovat průchod nulou měřeného proudu, by byla tato výhoda znehodnocena.

Při měření stejnosměrného proudu je pomocná cívka buzena sinusovým průběhem. Ta vytváří v jádře obvodu střídavé magnetické pole a Wiegandův senzor každou půlperiodu generuje impuls. Měřený stejnosměrný proud protéká měřicí cívkou a vytváří v jádře obvodu stejnosměrné magnetické pole. Toto pole posouvá střídavé pole o stejnosměrnou složku. Čas mezi průchodem nulou pomocného sinusového signálu a vygenerováním impulsu je úměrný protékajícímu stejnosměrnému proudu při konstantním budícím proudu. Tato závislost je v určitém rozsahu měřeného proudu lineární. Průběh z měření stejnosměrného proudu je na obrázku 1.10. Modrým průběhem je buzena pomocná cívka a červený průběh jsou kladné impulsy ze senzoru proudu při měřeném stejnosměrném proudu 2A. [1]



Obrázek 1.10 Budící signál senzoru (modrý průběh) a výstupní impulsy ze senzoru (červený průběh)

## 1.4 Převodní charakteristika

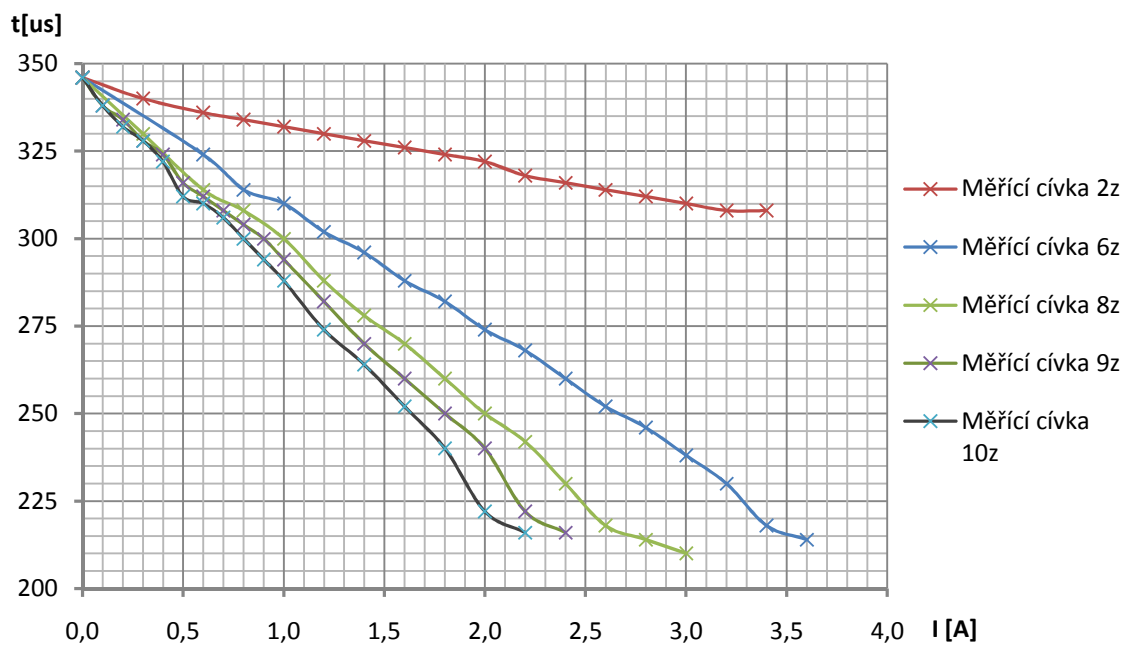
Pro hrubý přehled toho o jaké časy a závislosti se bude u daného snímače proudu jednat je před samotným návrhem zapojení změřena převodní charakteristika senzoru.

Převodní charakteristika je změřena pro stejnosměrný proud, kde bylo přivedeno na sériové spojení pomocných cívek 100z a 50z sinusové napětí z generátoru o frekvenci 1kHz a amplitudě  $20V_{p-p}$  na doporučení autora senzoru, protože při těchto parametrech je dosaženo nejlepších výsledků. Měřicí cívky byly přepínány v rozsahu 2z až 10z.

Výsledné časy mezi průchodem pomocného sinusového napětí nulou a vygenerovaným impulsem byly odečítány pomocí osciloskopu. Tyto časy jsou zaznamenány v tabulce 1.1 a vyneseny do grafické závislosti na obrázku 1.11. Je vidět, že závislost je v určité části rozsahu téměř lineární, proto bude snaha o využití těchto rozsahů s lineární závislostí.

Tabulka 1.1 Naměřené hodnoty převodní charakteristiky

Pomocná cívka 150z 1kHz 20Vpp sinus									
Měřicí cívka 6z		Měřicí cívka 2z		Měřicí cívka 8z		Měřicí cívka 9z		Měřicí cívka 10z	
I [A]	t[us]	I [A]	t[us]	I [A]	t[us]	I [A]	t[us]	I [A]	t[us]
0,0	346	0,0	346	0,0	346	0,0	346	0,0	346
0,6	324	0,3	340	0,3	330	0,1	338	0,1	338
0,8	314	0,6	336	0,6	314	0,2	334	0,2	332
1,0	310	0,8	334	0,8	308	0,3	328	0,3	328
1,2	302	1,0	332	1,0	300	0,4	324	0,4	322
1,4	296	1,2	330	1,2	288	0,5	316	0,5	312
1,6	288	1,4	328	1,4	278	0,6	312	0,6	310
1,8	282	1,6	326	1,6	270	0,7	308	0,7	306
2,0	274	1,8	324	1,8	260	0,8	304	0,8	300
2,2	268	2,0	322	2,0	250	0,9	300	0,9	294
2,4	260	2,2	318	2,2	242	1,0	294	1,0	288
2,6	252	2,4	316	2,4	230	1,2	282	1,2	274
2,8	246	2,6	314	2,6	218	1,4	270	1,4	264
3,0	238	2,8	312	2,8	214	1,6	260	1,6	252
3,2	230	3,0	310	3,0	210	1,8	250	1,8	240
3,4	218	3,2	308	3,2		2,0	240	2,0	222
3,6	214	3,4	308	3,4		2,2	222	2,2	216
3,8						2,4	216	2,4	
4,0						2,6			



Obrázek 1.11 Změřené grafické závislosti převodní charakteristiky senzoru proudu

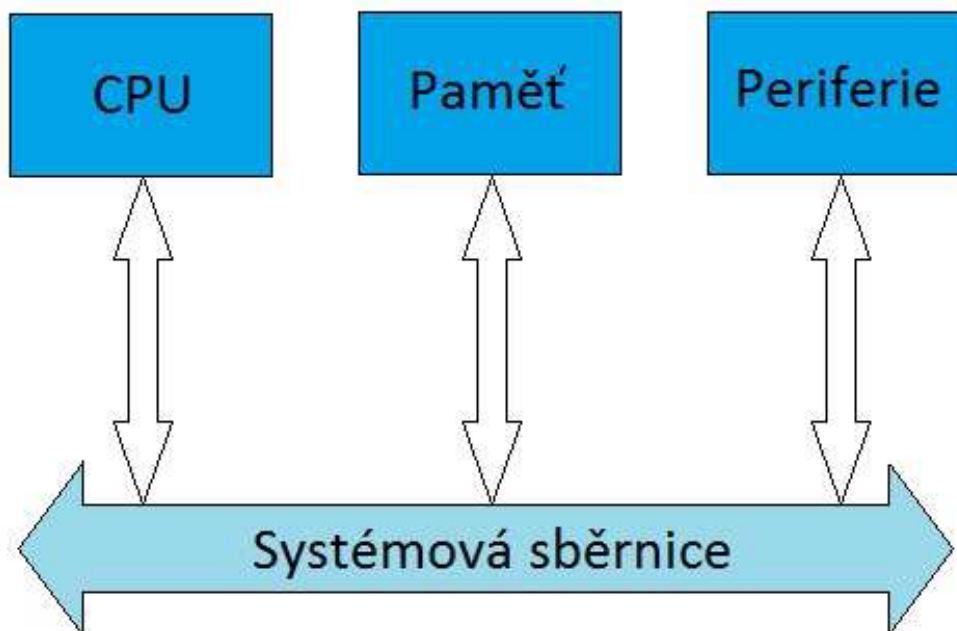
## 2 MIKROKONTROLÉRY

V této kapitole jsou obecně popsány mikrokontroléry a jejich využití pro zpracování slaboproudých nízkofrekvenčních signálů. V závěru kapitoly jsou stanoveny požadavky na mikrokontrolér a je zvolen vhodný obvod.

### 2.1 Obecný popis

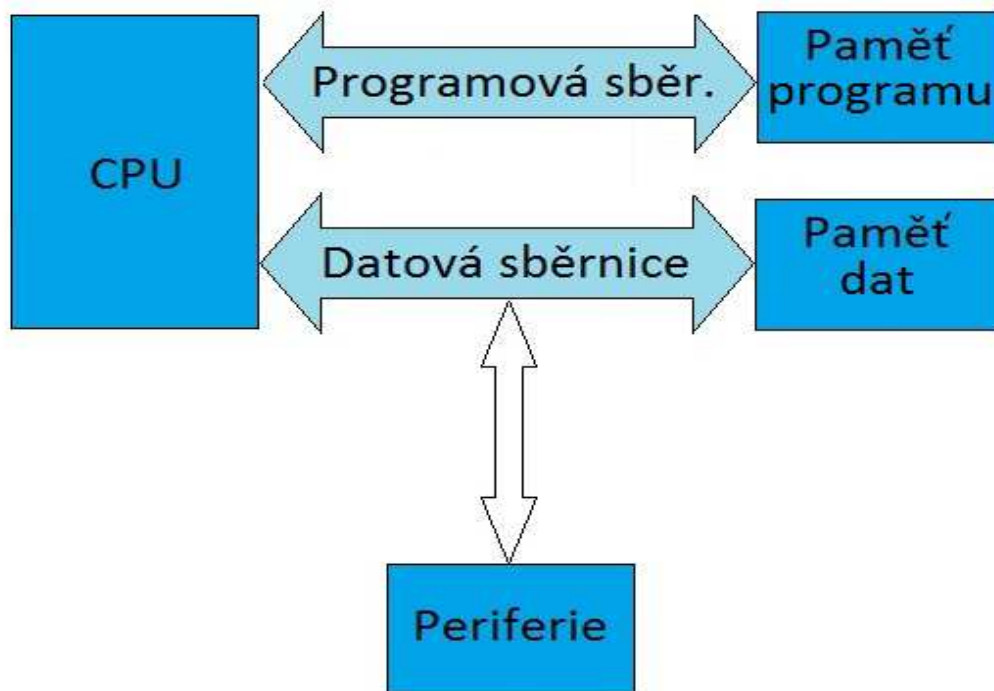
Mikrokontrolér, neboli MCU (Microcomputer Unit), vznikne spojením všech částí mikropočítače tj. řídicí jednotky, aritmetickologické jednotky, paměti FLASH, RAM, EEPROM, vstupně/výstupních periférií, časovačů a čítačů na jediný čip. Jedná se o sekvenční obvod taktovaný hodinovým signálem z oscilátoru. [2]

Mikrokontroléry se dělí podle šířky sběrnice na 8, 16, případně 32bitové. Dále se dělí podle architektury na Von Neumannovu a Harvardskou architekturu. Na obrázku 2.1 je Von Neumannova architektura, která používá pouze jednu jedinou paměť a to jak pro program (instrukce), tak pro data (proměnné). Neumožňuje však pracovat s vícerozměrnými poli. Program je vykonáván sekvenčně, to znamená, že se instrukce vykonávají jedna po druhé. [2]



Obrázek 2.1 Von Neumannova architektura s jednou pamětí a systémovou sběrnicí

Na obrázku 2.2 je Harvardská architektura, která používá oddělené paměti pro program i pro data. U mikrokontrolérů rodiny ATmega je program uložen v paměti typu FLASH, data v paměti SRAM případně v napětově nezávislé paměti EEPROM. Harvardská architektura používá dvě sběrnice, a proto umožňuje současný přístup k instrukcím i k datům, což výrazně urychluje vykonávání programu. Sekvenční vykonávání je zde zachováno z předchozí architektury. [2]



Obrázek 2.2 Harvardská architektura s dvěma sběrnicemi a oddělenou pamětí

Dále se mikrokontroléry dělí na CISC a RISC, kde CISC jsou mikrokontroléry s komplexním souborem instrukcí a RISC jsou s redukováným souborem instrukcí. [2]

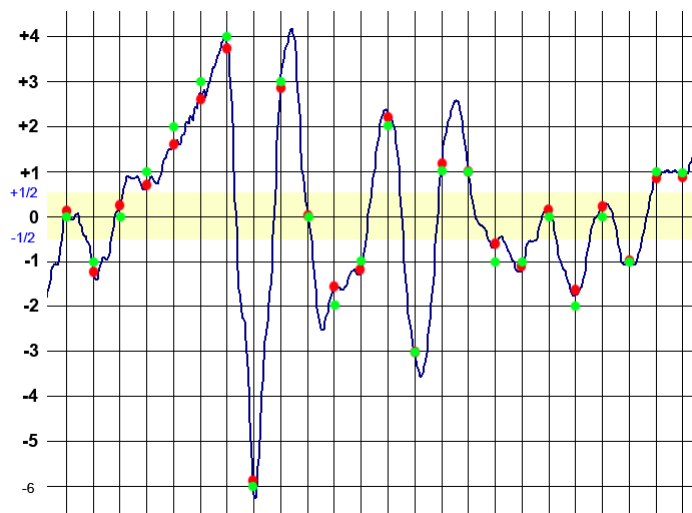
Mikrokontrolér je vhodný pro použití v řízení a je navržen a určen pro tzv. vestavné (embedded) aplikace, kde je buď řídicí jednotkou přístroje, nebo je součástí dalšího zařízení, kde plní určitou funkci. Mikrokontrolér je proto navržen jako samostatná jednotka schopná komunikace s okolím. V mikrokontroléru jsou obvykle kromě vstupně-výstupních obvodů integrovány i mnohé další periferní obvody, např. čítač, časovač, komparátor, sériové porty, analogově-digitální, příp. digitálně-analogový převodník, USB, PWM, paměť EEPROM a další. Protože se mikrokontroléry často používají v přístrojích napájených z baterií, je u nich rovněž kladen velký důraz na malou spotřebu. Mikrokontrolér tak obvykle disponuje různými úspornými režimy, umožňuje řídit kmitočet oscilátoru nebo vypínat jednotlivé moduly. Některé typy mikrokontrolérů mohou být dále speciálně navrženy tak, aby splňovaly určité požadavky. Příkladem může být zvětšený rozsah pracovních teplot. [5]

## 2.2 Využití pro zpracování signálů

Zpracovávané signály můžeme rozdělit podle dvou základních parametrů na digitální a analogové.

Digitální signály můžeme zpracovávat nejjednodušší, ale také nejméně přesnou metodou a tou je přivedení signálu na obecný vstupně výstupní pin, který nastavíme jako vstup a v momentě, kdy potřebujeme znát logickou hodnotu tohoto signálu, si tento pin jednoduše v programu otestujeme. Pokud nám jde o měření časů trvání vysoké, nebo naopak nízké úrovně, případně detekci náběžné či sestupné hrany, je tato metoda dosti nepřesná až nepoužitelná. K těmto účelům většina mikrokontrolérů disponuje tzv. externím přerušením, kdy se sledovaný signál přivádí na většinou výrobcem uvedený pin. Na tomto pinu se poté povolí přerušení, zvolí se druh přerušení a to od sestupné hrany, náběžné hrany, nebo nízké či vysoké úrovně. Dalším zpracováním může být přivedení signálu na vstup čítače, jde-li nám o změření počtu impulsů.

Analogové signály lze zpracovávat pomocí analogově-digitálního převodníku, který bývá součástí obvodu u většiny mikrokontroléru. Pokud rozlišení A/D převodníku obsaženého v pouzdře MCU není dostačující, je možné připojit externí A/D převodník komunikující s MCU buďto paralelně, nebo sériově (I2C, SPI, USART,...). Převod analogového signálu na digitální probíhá ve dvou krocích. Prvním je tzv. vzorkování, kdy spojitý signál rozdělíme na rovnoměrné úseky a z každého úseku vytvoříme jeden vzorek, čímž jsme získali diskrétní signál. V druhém kroku provedeme tzv. kvantování, kdy každému vzorku přidělíme příslušnou kvantizační úroveň. Na obrázku 2.3 je červenými body signál časově vzorkován a zelenými body je jednotlivým vzorkům přidělena kvantizační úroveň. Při převodu nesmí frekvence převáděného signálu překročit Nyquistovu frekvenci, která je polovina frekvence vzorkovací, jinak dojde tzv. aliasingu. Z toho důvodu se před A/D převodník vkládá antialiasing filtr, což je dolní propust.

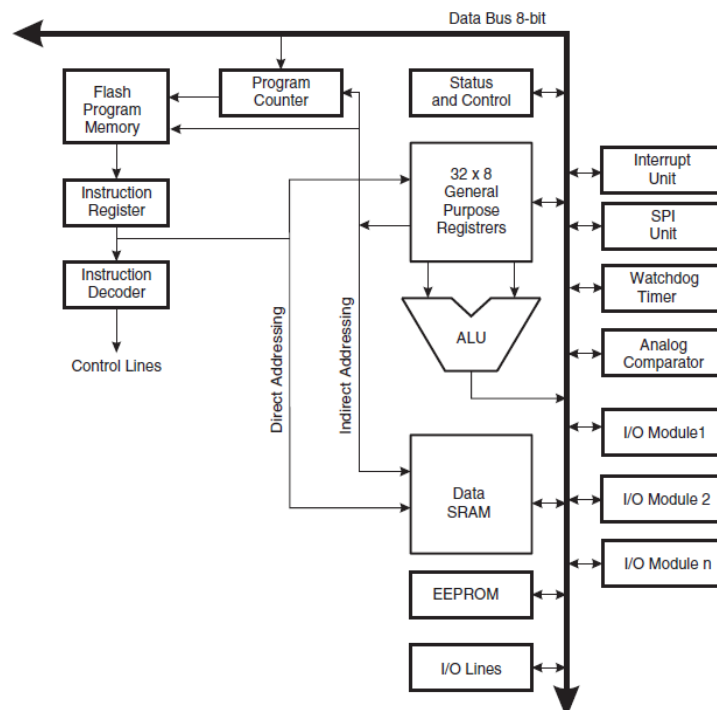


Obrázek 2.3 Vzorkování a kvantování spojitého signálu [6]

## 2.3 Výběr vhodného mikrokontroléru

Pomocí našeho mikrokontroléru bude potřebné generovat sinusový signál frekvence 1kHz a napětí na prázdko  $20V_{p-p}$  s impedančním přizpůsobením  $50\Omega$ . Dále bude zpracovávat kladné i záporné impulsy z proudového senzoru a také na něj bude přiveden synchronizační signál z generátoru. Proto bude muset disponovat třemi externími přerušeními a rychlou sériovou komunikací pro D/A převodník na generování sinusového průběhu (např. SPI). Komunikace s uživatelem bude probíhat prostřednictvím alfanumerického LCD displeje a několika tlačítky pro nastavení základních parametrů. Komunikace s LCD bude probíhat prostřednictvím paralelní 8bitové sběrnice a několika dalších řídicích bitů, proto by MCU měl disponovat také větším množstvím vstupně/ výstupních registrů. Hlavním úkolem mikrokontroléru bude přesné měření času mezi příchozími impulsy, a proto bude vhodný takový obvod, který bude možné taktovat krystalovým oscilátorem o vyšších frekvencích řádu desítek MHz. Obslužný program bude psán v jazyce C případně některé části v jazyce Assembler.

Jako nejvhodnější pro tyto požadavky byl vybrán mikrokontrolér od firmy Atmel z rodiny ATmega a to ATmega16. Lze jej taktovat krystalovým oscilátorem až do frekvence 16MHz, disponuje třemi vstupy pro externí přerušování, což splňuje náš požadavek, dále obsahuje sériovou komunikaci SPI, pomocí které je také programován. ATmega16 má tři časovače z toho jeden 16bitový, který se bude hodit pro měření času mezi impulsy a dva 8bitové časovače, z nichž jeden bude použit pro odměřování času mezi vzorky D/A převodu pro sinusový generátor. Na obrázku 2.4 je vidět, že mikrokontrolér má šířku datové sběrnice 8bitů a je Harvardské architektury.



Obrázek 2.4 Blokové schéma AVR architektury [3]

Při používání jakéhokoliv mikrokontroléru je zapotřebí, aby dokázal komunikovat s okolními zařízeními. Toho je docíleno pomocí vstupně/výstupních portů. Mikrokontrolér ATmega16 obsahuje čtyři osmi-bitové porty označované jako PORTA, PORTB, PORTC a PORTD. Jako první je nutné nastavit, jestli chceme použít port jako vstupní nebo výstupní. Tento směr se řídí registry DDRA, DDRB, DDRC a DDRD, kde lze nastavit směr každému bitu samostatně. Pokud je bit v tomto registru nastaven na hodnotu log. 0, je pin vstupní a při stavu log. 1 je výstupní. Zápis hodnoty na port při nastavení funkce výstupního pinu se provádí do registru PORTx. Při nastavení portu jako vstupního lze jeho stav číst pomocí registru PINx, kde písmeno x je nahrazeno písmenem příslušného portu.

Mikrokontrolér ATmega16 obsahuje tři externí přerušení nazývaná INT0, INT1 a INT2. Při nastavení externího přerušení jsou využity registry s názvem SREG, GICR, MCUCR, MCUCSR a GIFR. Registrem GICR se povolují jednotlivá přerušení. Zápisem log. 1 do příslušného bitu registru je externí přerušení povoleno, rozložení těchto bitů znázorňuje obrázek 2.5.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	INT1	INT0	INT2	–	–	–	IVSEL	IVCE	GICR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 2.5 Registr GICR a bity používané k povolení externích přerušení [3]

Registrem MCUCR lze nastavit událost na kterou má přerušení zareagovat, vybrat jde z možností uvedených v tabulce 2.1.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	SM2	SE	SM1	SM0	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00	MCUCR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 2.6 Registr MCUCR a bity k nastavení události pro přerušení [3]

Tabulka 2.1 Přehled událostí na které reaguje externí přerušení

ISCx1	ISCx0	Událost
0	0	Přerušení při nízké úrovni na vstupu INTx
0	1	Přerušení při změně úrovně na vstupu INTx
1	0	Přerušení při sestupné hraně na vstupu INTx
1	1	Přerušení při náběžné hraně na vstupu INTx



V registru MCUCSR lze bitem s názvem ISC2 nastavit událost na kterou reaguje externí přerušení INT2. Pokud je do bitu ISC2 zapsána log. 0 přerušení je spuštěno při sestupné hraně na vstupu INT2 v opačném případě při zapsání log. 1 je přerušení vyvoláno vzestupnou hranou. Registr MCUCSR a umístění bitu ISC2 je na obrázku 2.7.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	JTD	ISC2	–	JTRF	WDRF	BORF	EXTRF	PORF	MCUCSR
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	See Bit Description					

Obrázek 2.7 Registr MCUCSR a bit k nastavení události pro přerušení INT2 [3]

Registru s názvem GIFR obsahuje příznakové bity pro všechna externí přerušení, tyto bity informují o nastávajícím přerušení log. 1 a jsou při vykonání obsluhy přerušení automaticky mazány. Pokud potřebujeme z nějakého důvodu tyto bity vynulovat ručně, musí se provést zápis log. 1 do příslušného bitu. V registru SREG se bitem s označením I povolují veškerá přerušení zápisem log. 1.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	INTF1	INTF0	INTF2	–	–	–	–	–	GIFR
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R	R	R	R	R	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 2.8 Registr GIFR a příznakové bity externích přerušení [3]

Další periferií mikrokontroléru ATmega16, která je zde použita je čítač/časovač. Tyto obvody se používají pro odměření určitého času, vytváření akcí za určitý čas, nebo pro počítání externích případně interních impulsů. Obsahují také bloky pulzní šířkové modulace (PWM), která zde není použita. ATmega16 obsahuje tři tyto čítače/časovače a to TIMER0 a TIMER2, které jsou osmi-bitové šířky, dále jeden šestnácti-bitové šířky s označením TIMER1. TIMER0, který je použit pro měření vzorkovací periody generovaného sinusového průběhu, se nastavuje registrem s označením TCCR0, který je na obrázku 2.8 a příslušné nastavení bitů pro předděličku je v tabulce 2.2. Obsah čítače/časovače lze získat z registru pod označením TCNT0.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	FOC0	WGM00	COM01	COM00	WGM01	CS02	CS01	CS00	TCCR0
Read/Write	W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 2.9 Registr TCCR0 a bity pro spuštění a nastavení předděličky pro TIMER0 [3]

Tabulka 2.2 Nastavení zdroje signálu pro TIMER0

CSx2	CSx1	CSx0	Zdroj signálu pro TIMER0
0	0	0	Čítač/časovač je zastaven
0	0	1	Hodinový signál - Clk (bez předděličky)
0	1	0	Clk/8
0	1	1	Clk/64
1	0	0	Clk/256
1	0	1	Clk/1024
1	1	0	Na pinu T0 – sestupná hrana
1	1	1	Na pinu T0 – vzestupná hrana

U TIMER1, který je použit pro měření času mezi signály ze senzoru proudu je důležitým registrem pro nastavení TCCR1B, který je na obrázku 2.10 a pomocí kterého lze spustit časovač a nastavit předděličku s dělicím poměrem podle tabulky 2.2. Obsah čítače/časovače je rozdělen do dvou osmi-bitových registrů s označením TCNT1H a TCNT1L. Časovač TIMER2 zde není použit.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 2.10 Registr TCCR1B a bity pro spuštění a nastavení předděličky pro TIMER01 [3]

Dalším důležitým registrem, kde lze nastavit přerušení od časovače TIMER1 je registr s označením TIMSK. Bitem TOIE1 lze nastavit přerušení při přetečení časovače. Rozmístění bitů v tomto registru je na obrázku 2.11.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	OCIE2	TOIE2	TICIE1	OCIE1A	OCIE1B	TOIE1	OCIE0	TOIE0	TIMSK
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

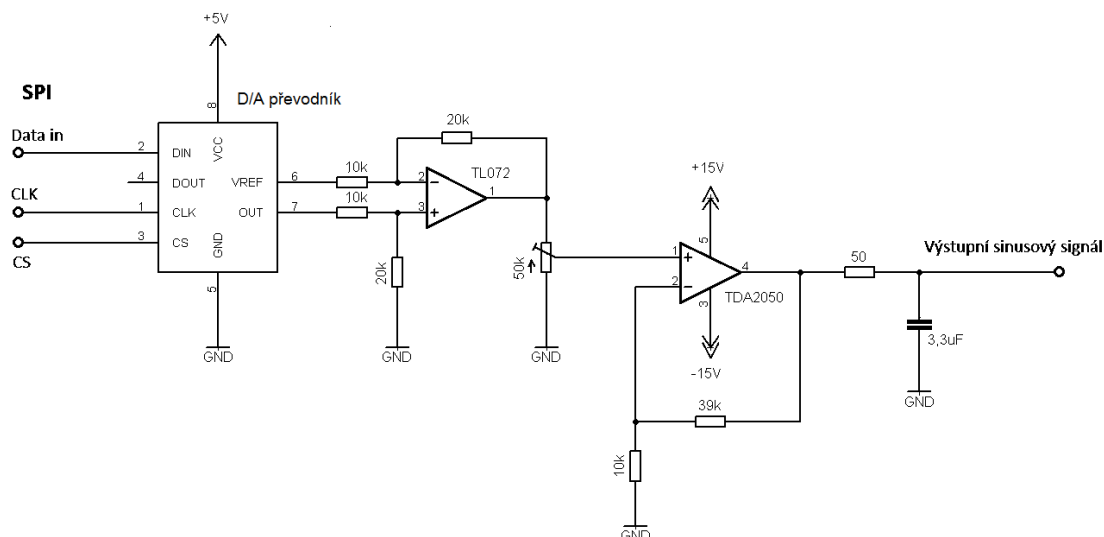
Obrázek 2.11 Registr TIMSK a bity pro nastavení přerušení od časovače TIMER1 [3]

## 3 NÁVRH ZAPOJENÍ

V této kapitole je podrobně popsán návrh celého zapojení. Kapitola je rozdělena na návrh sinusového generátoru, obvody upravující vstupní signál, způsob komunikace s uživatelem a nakonec návrh napájecího zdroje.

### 3.1 Sinusový generátor

Pro generování sinusového signálu pomocí MCU jsou dvě možnosti. První je generování pomocí pulzně-šířkové modulace neboli PWM a následné vyhlazení pomocí LC filtru. Druhou možností je použití D/A převodníku. Zde je použit právě D/A převodník. Na obrázku 3.1 je schéma zapojení generátoru, kde je D/A převodník komunikující s MCU pomocí SPI sběrnice.



Obrázek 3.1 Schéma generátoru sinusového průběhu

V mikrokontroléru je vytvořena tabulka několika hodnot pro sinusový průběh jedné periody. Tyto hodnoty jsou se vzorkovací frekvencí odesílány pomocí sériového rozhraní SPI na D/A převodník, který vytváří sinusový signál ovšem v úrovni 0V až  $U_{ref}$ . Zde je použit D/A převodník LTC1655 od firmy Linear Technology, který vytváří signál v úrovni 0V až  $2x U_{ref}$ . Tuto referenci má zabudovanou v pouzdře a představuje napětí 2,048V, a protože je vyvedena ven z pouzdra obvodu, bude jednoduché a přesné tento sinusový signál posunout na nulu. Tento posun je proveden pomocí rozdílového zesilovače TL072, který signál i částečně zesiluje. Podle následujícího vztahu se vypočítá napěťové zesílení diferenciálního zesilovače

$$A_u = \frac{U_{out}}{U_{in-} - U_{in+}}, \quad (3.1)$$

kde  $A_u$  je zesílení,  $U_{out}$  je výstupní napětí,  $U_{in-}$  a  $U_{in+}$  jsou vstupní napětí invertujícího a neinvertujícího vstupu. Aby OZ reagoval pouze na rozdíl vstupních napětí, musí být správně vyvážen. Toho lze dosáhnout stejným zesílením obou napěťových vstupů. Podmínka správného vyvážení je:

$$\left| \frac{U_{out}}{U_{in-}} \right| = \left| \frac{U_{out}}{U_{in+}} \right|. \quad (3.2)$$

Pro stejné zesílení tedy platí:

$$R_1 = R_3 \quad a \quad R_2 = R_4, \quad (3.3)$$

kde  $R_1$  a  $R_3$  jsou odpory na jednotlivých vstupech OZ a  $R_2$ ,  $R_4$  jsou odpory ve zpětné vazbě. Zesílení obvodu tedy je:

$$A_u = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (3.4)$$

V tomto zapojení diferenciální zesilovač zesiluje rozdíl vstupních napětí dvakrát, proto  $R_1=R_3=10k\Omega$  a  $R_2=R_4=20k\Omega$ . Dále je v obvodu zařazen potenciometr, kterým se nastaví výstupní amplituda sinusového průběhu. Z jezdce potenciometru je odebírán signál na koncový stupeň, tvořený zesilovačem TDA2050 v neinvertujícím zapojení se zesílením 3,9 krát, které je možné spočítat podle vztahu 3.4. Za koncovým stupněm je výkonný  $50\Omega$  odpor, který chrání cívku před případným jednosměrným proudem a tvoří impedanční přizpůsobení stejné jako v případě měření převodní charakteristiky pomocí generátoru a osciloskopu v laboratoři. K odporu je dopočítán kondenzátor, který spolu s odporem tvoří dolní propust s mezním kmitočtem podle vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (3.5)$$

kde  $f_0$  je mezní kmitočet dolní propusti,  $R$  je hodnota odporu a  $C$  je hodnota kapacity. Protože neznámá veličina je kapacita vzorec je upraven na podobu:

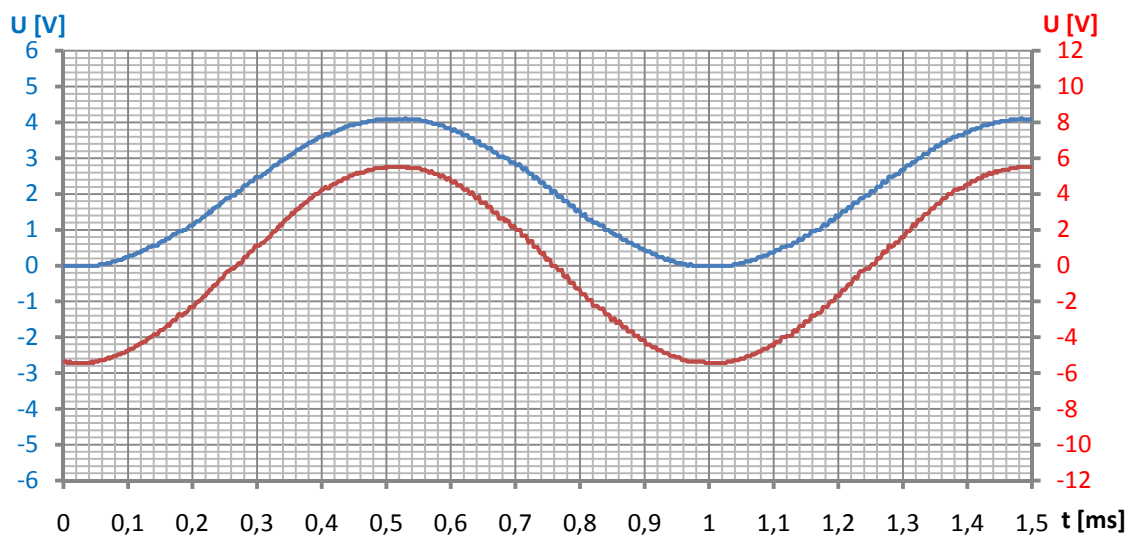
$$C = \frac{1}{2\pi f_0 R}. \quad (3.6)$$

Pro odpor  $R=50\Omega$  a frekvenci  $f_0=1kHz$  vychází kapacita  $3,2\mu F$ . Kondenzátor nesmí s cívkou tvořit na frekvenci  $1kHz$  rezonační obvod, to je ověřeno vtahem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.7)$$

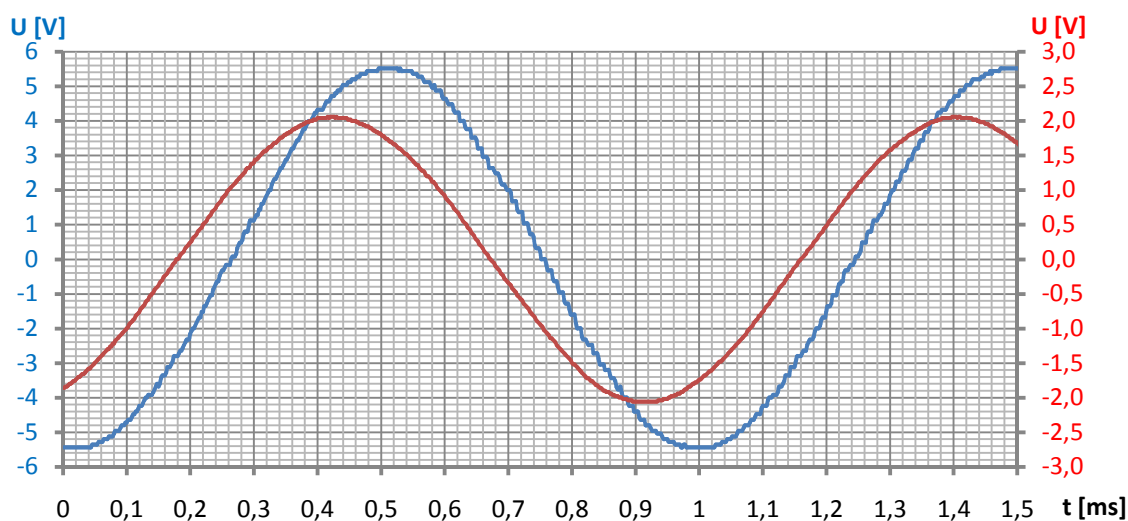
Pro kondenzátor vybraný z řady 3,3μF a cívku 1,94mH je rezonanční frekvence  $f_0=2\text{kHz}$ .

Na obrázku 3.2 je vidět A/D převodníkem generovaný signál jako modrý průběh a rozdílovým zesilovačem posunutý a zesílený signál jako červený průběh.



Obrázek 3.2 Výstupní signál z D/A převodníku (modrý průběh), posunutý a zesílený signál (červený průběh)

Na obrázku 3.3 je modrý průběh za koncovým zesilovačem a červený průběh za dolní propustí. Měřeno s připojenou pomocnou cívkou.



Obrázek 3.3 Sinusový průběh za koncovým zesilovačem (modrý) a vyhlazený průběh za dolní propustí (červený)

## 3.2 Úprava vstupních signálů

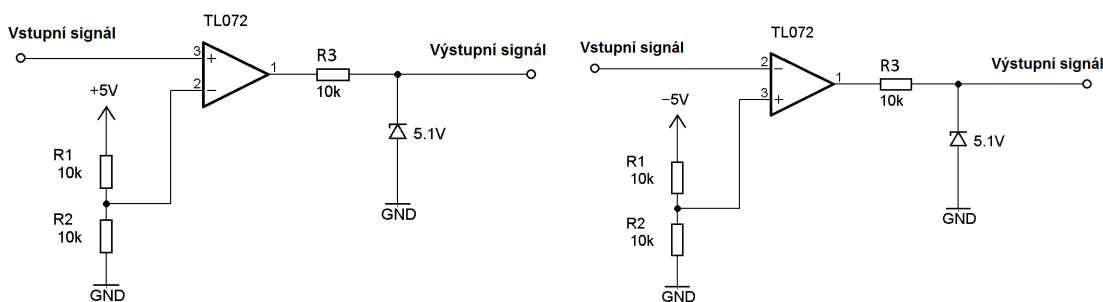
Jak je vidět na obrázku 1.10, tak výstupní signál ze senzoru není ideální pro zpracování pomocí MCU a to kvůli nízké úrovni signálu. Která neklesá až k nulovému napětí, a také kvůli vysoké úrovni, kde vznikají překmity, které jsou v některých případech dosti vysoké. Z toho důvodu je použit u kladného impulsu komparátor v neinvertujícím zapojení s operačním zesilovačem a u záporného impulsu v invertujícím zapojení, abychom dostali stejný průběh pro oba impulsy.

Na obrázku 3.4 je schéma zapojení takového komparátoru. Vstupní signál je porovnáván s jeho poloviční úrovní v případě kladného impulsu to je 2,5V a záporného impulsu to je -2,5V. Napěťové děliče se spočítají podle vztahu:

$$U_{ref} = U_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (3.8)$$

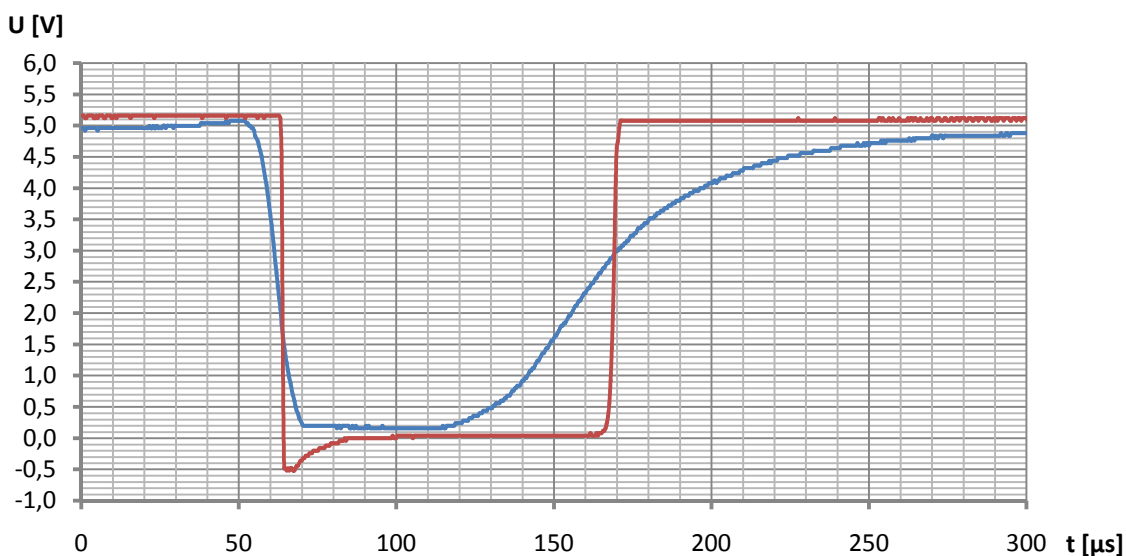
kde  $U_{ref}$  je referenční napětí pro komparátor,  $U_{cc}$  je napájecí napětí děliče a  $R_1$ ,  $R_2$  jsou odpory děliče.

Operační zesilovače jsou napájeny ze symetrického zdroje 15V, proto jsou na jejich výstupech odpory  $R_3=10k\Omega$  a zenerovy diody 5,1V, které upravují výstupní signál na 5V logiku pro mikrokontrolér.



Obrázek 3.4 Vlevo neinvertující zapojení komparátoru s OZ pro kladný impuls, vpravo invertující zapojení pro úpravu záporného impulsu

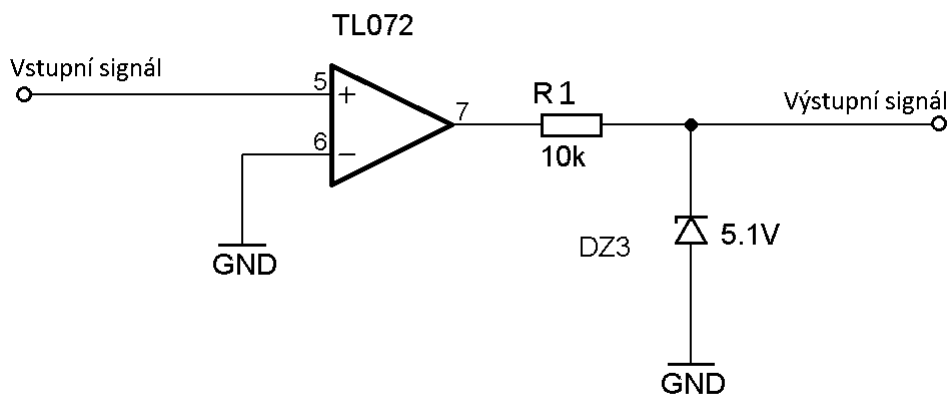
Průběh takto upraveného signálu je na obrázku 3.5. Zde je vidět výstupní signál senzoru proudu jako modrý průběh a upravený signál pomocí komparátoru jako červený průběh. Výrazně se zlepšila strmota sestupné hrany tohoto signálu a to díky použitému operačnímu zesilovači s rychlostí přeběhu  $16V/\mu s$ .



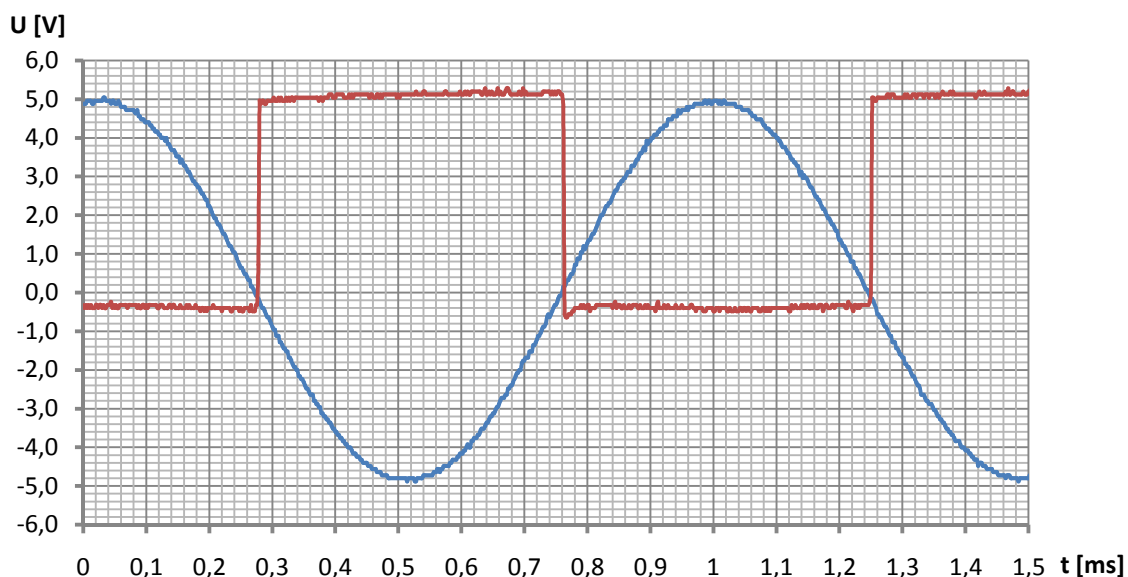
Obrázek 3.5 Výstupní impuls senzoru proudu (modrý průběh) a výstupní impuls z komparátoru (červený průběh)

Dále je potřeba detekovat průchod nulou sinusového generátoru a vytvořit tak synchronizační impulsy. Nelze detekovat průchod nulou v mikrokontroléru, protože dolní propust v generátoru nám na sinusový signál zavádí fázové zpoždění, jak je vidět na obrázku 3.3. Opět je použit komparátor s operačním zesilovačem v neinvertujícím zapojení, ale tentokrát je rozhodovací úroveň rovna 0V.

Na obrázku 3.6 je schéma tohoto obvodu. Na vstup se přivádí vygenerovaný sinusový průběh, na výstupu máme obdélníkový signál v 5V logice. K překlápění úrovní dochází při průchodu vstupní sinusovky nulovým napětím. Na obrázku 3.7 jsou změřené průběhy generovaného signálu (modrý průběh) a výstupního signálu z detekce průchodu nulou (červený průběh).



Obrázek 3.6 Schéma detekce průchodu nulou



Obrázek 3.7 Generovaný signál (modrý průběh) a signál z detektoru průchodu nulou (červený průběh)

### 3.3 Komunikace s uživatelem

Komunikace s uživatelem bude probíhat prostřednictvím LCD displeje a čtyř tlačítek pro nastavení základních parametrů měření. Drtivá většina alfanumerických LCD zobrazovačů obsahuje kontrolér od firmy Hitachi HD44780, který obsahuje znakovou sadu anglické abecedy a instrukce pro ovládání displeje. Komunikace probíhá pomocí 8bitové případně 4bitové paralelní sběrnice řízené třemi signály s označením RS (určuje, zda se přenáší instrukce nebo data), R/W (určuje, zda jde o čtení nebo zápis z/do paměti řadiče) a E (určuje okamžik platných dat na sběrnici).

Samotná komunikace s LCD je velmi jednoduchá. Nejprve se provede inicializace, kde se nastaví, o jaký druh komunikace jde, zda 4bitový nebo 8bitový, zde je použita 8bitová sběrnice, protože je dostatek volných vývodů na MCU. Dále se nastaví velikost znaku na 5x8 bodů, smaže se obsah displeje, nastaví se posun kurzoru doprava a nakonec se samotný LCD zapne. Celá inicializace je přehledně v tabulce 3.1. Dále už stačí na displej zasílat samotné znaky, které budou na LCD vypisovány od první pozice a kurzor se bude automaticky inkrementovat. Pokud je zapotřebí změnit pozici kurzoru, nebo smazat obsah LCD provede se to příslušnými instrukcemi, jejichž přehled je na obrázku 3.8.



Tabulka 3.1 Postup inicializace alfanumerického LCD

čekat 15ms po náběhu napětí na 4,5V			
RS	R/W	Data	
0	0	0 0 1 1 - - - -	Nastavení 8-bitové komunikace
čekat 4,1ms			
0	0	0 0 1 1 - - - -	
čekat 100μs			
0	0	0 0 1 1 - - - -	
0	0	0 0 1 1 N F - -	N-počet řádků (0 - 1řádek, 1 - 2řádky) F-velikost znaku
0	0	0 0 0 0 1 0 0 0	Kurzor vypnout
0	0	0 0 0 0 0 0 0 1	Smazat LCD
0	0	0 0 0 0 0 1 I D S	ID - směr posunu (0 - dec, 1 - inc) S - auto posun
0	0	0 0 0 0 1 1 0 0	Zapnout LCD

Instruction	Code										Description	Execution Time (max) (when $f_{cp}$ or $f_{osc}$ is 270 kHz)
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
Clear display	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Clears entire display and sets DDRAM address 0 in address counter.	
Return home	0	0	0	0	0	0	0	0	1	—	Sets DDRAM address 0 in address counter. Also returns display from being shifted to original position. DDRAM contents remain unchanged.	1.52 ms
Entry mode set	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	Sets cursor move direction and specifies display shift. These operations are performed during data write and read.	37 μs
Display on/off control	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Sets entire display (D) on/off, cursor on/off (C), and blinking of cursor position character (B).	37 μs
Cursor or display shift	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	—	—	Moves cursor and shifts display without changing DDRAM contents.	37 μs
Function set	0	0	0	0	1	DL	N	F	—	—	Sets interface data length (DL), number of display lines (N), and character font (F).	37 μs
Set CGRAM address	0	0	1	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	Sets CGRAM address. CGRAM data is sent and received after this setting.	37 μs
Set DDRAM address	0	0	1	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	Sets DDRAM address. DDRAM data is sent and received after this setting.	37 μs
Read busy flag & address	0	1	BF	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	Reads busy flag (BF) indicating internal operation is being performed and reads address counter contents.	0 μs

Obrázek 3.8 Instrukční sada řadiče HD44780 [7]

Znaková sada obsažena v řadiči HD44780 a její adresování jednotlivých znaků je velmi podobné ASCII tabulce. Na prvních osm pozic znakové sady si může uživatel vytvořit své vlastní znaky. Tato znaková sada je na obrázku 3.9.

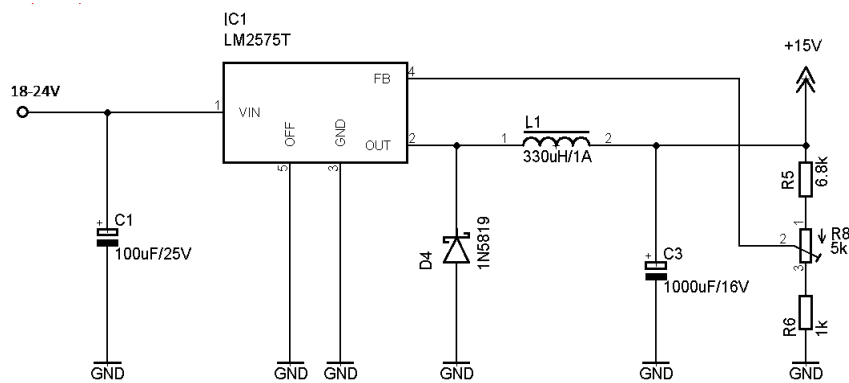
Lower 4 Bits \ Upper 4 Bits	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
xxxx0000	CG RAM (1)		0	1	P	~	P				-	夕	三	α	ρ	
xxxx0001	(2)		!	1	A	Q	a	q			。	ア	チ	シ	ä	g
xxxx0010	(3)		"	2	B	R	b	r			「	イ	ツ	×	β	θ
xxxx0011	(4)		#	3	C	S	c	s			」	ウ	テ	モ	ε	ω
xxxx0100	(5)		\$	4	D	T	d	t			、	エ	ト	ト	μ	Ω
xxxx0101	(6)		%	5	E	U	e	u			・	オ	ナ	ユ	σ	ü
xxxx0110	(7)		&	6	F	V	f	v			ヲ	カ	ニ	ヨ	ρ	Σ
xxxx0111	(8)		'	7	G	W	g	w			ア	キ	ヌ	ラ	g	π
xxxx1000	(1)		<	8	H	X	h	x			ィ	ク	ネ	リ	σ	×
xxxx1001	(2)		>	9	I	Y	i	y			ウ	ケ	ル	ル	'	γ
xxxx1010	(3)		*	:	J	Z	j	z			エ	コ	ハ	レ	j	κ
xxxx1011	(4)		+	;	K	L	k	l			オ	サ	ヒ	ロ	*	κ
xxxx1100	(5)		,	<	L	¥	l	l			カ	シ	フ	ク	φ	φ
xxxx1101	(6)		-	=	M	]	m	}			ユ	ヌ	ハ	ン	ε	÷
xxxx1110	(7)		.	>	N	^	n	‡			ヨ	セ	ホ	°	ñ	
xxxx1111	(8)		/	?	O	_	o	€			ッ	ソ	マ	°	ö	■

Obrázek 3.9 Znaková sada implementovaná v řadiči HD44780 [7]

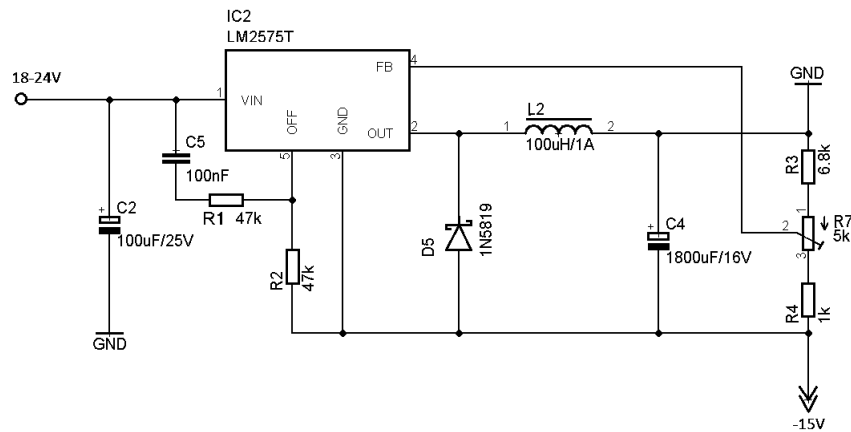
### 3.4 Napájecí zdroj

Z důvodu složitějšího napájení aplikace je zde navržen i obvod zdroje, který ze stejnosměrného napětí 18V až 24V, vytváří symetrická napětí potřebná pro napájení celého obvodu.

Pro tento zdroj symetrického napětí 15V byl vybrán obvod firmy Texas Instruments LM2575. Jedná se o spínaný zdroj s integrovaným spínacím tranzistorem, takže nevyžaduje velké množství pomocných obvodů a umožňuje tvorbu záporného napětí. Je použito katalogové zapojení tohoto obvodu, které je vidět na obrázku 3.10 a 3.11. [8]

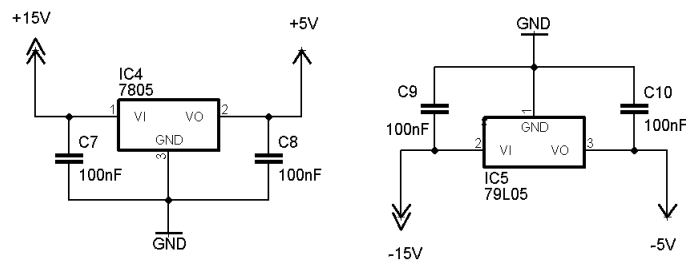


Obrázek 3.10 Schéma spínaného zdroje +15V/1A



Obrázek 3.11 Schéma spínaného zdroje -15V/0,33A

Dále je potřeba +5V pro napájení mikrokontroléru a LCD a -5V pro napájení tvarovače záporného impulsu. Tyto napětí jsou vytvořena ze symetrického napětí 15V pomocí lineárních regulátorů napětí 7805 pro kladných 5V a 79L05 v záporné větvi, kde nám stačí tato nízko výkonová verze stabilizátoru, protože bude napájet pouze tvarovač. Schéma zapojení obou regulátorů napětí jsou na obrázku 3.12.



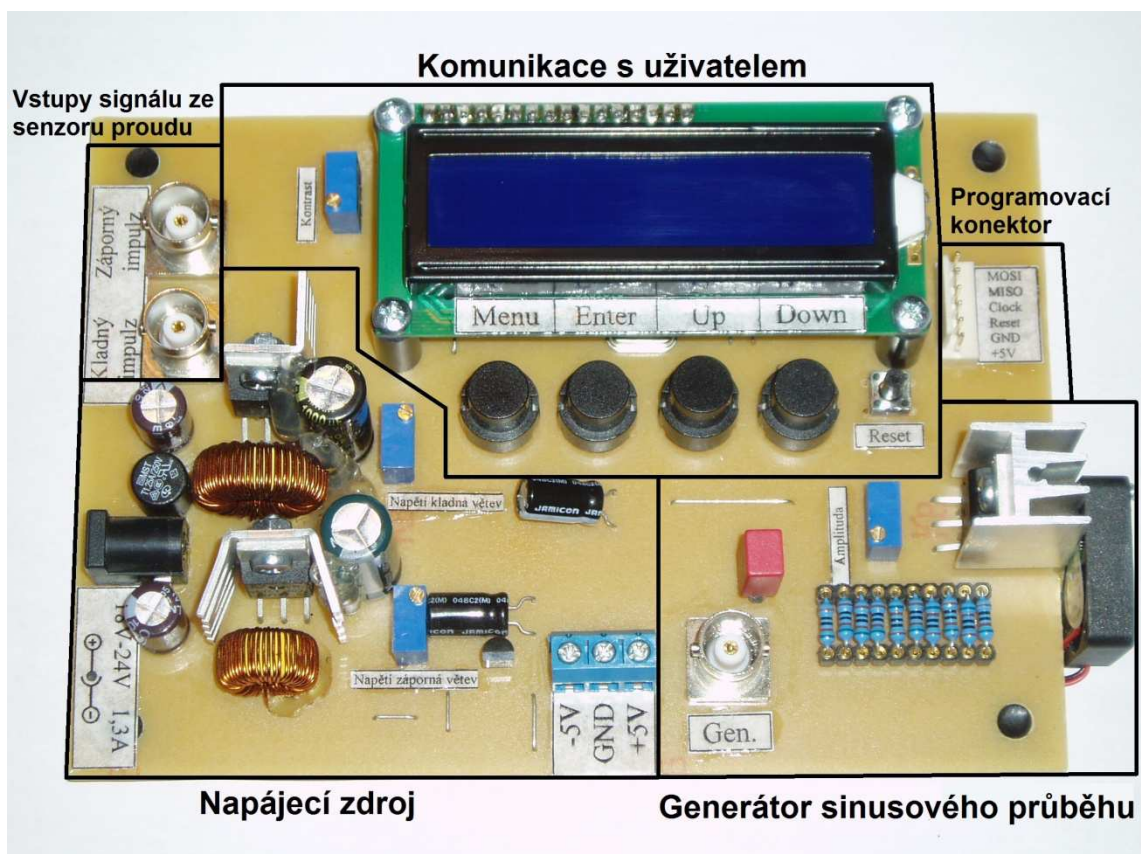
Obrázek 3.12 Schéma lineárního zdroje +5V a -5V

## 4 REALIZACE ZAPOJENÍ

V kapitole je popsána samotná realizace obvodového zapojení, návrh programu pro mikrokontrolér, pohled na zapojení ze strany uživatele a převodní charakteristiky senzoru.

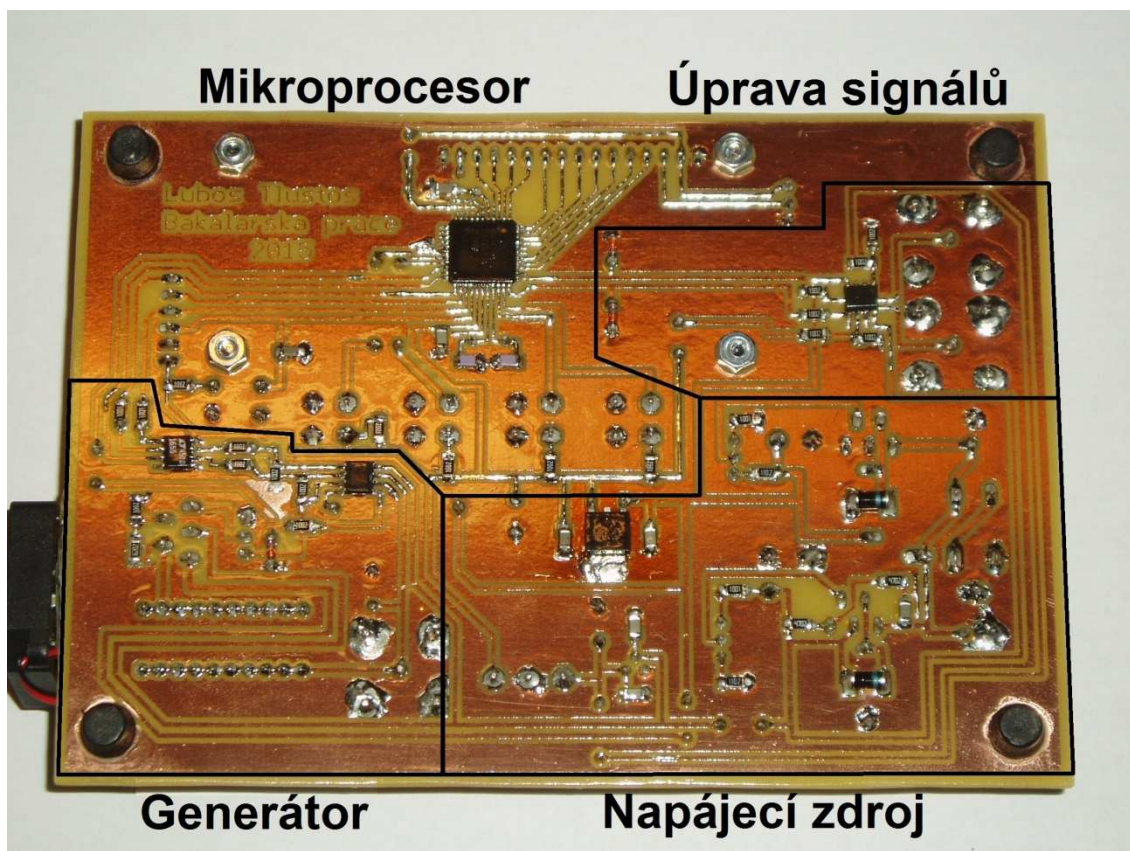
### 4.1 Deska plošného spoje

Na obrázku 4.1 je osazená deska plošného spoje. Jsou zde vyznačeny jednotlivé bloky zapojení. Především se jedná o napájecí zdroj, kde je pro napájení použit souosý konektor, na který se připojí zdroj o stejnosměrném napětí 18 až 24V. Zdroj je také osazen svorkovnicí, pomocí které se napájí tvarovač na senzoru proudu. Dále je zde vidět generátor sinusového průběhu, kde pomocí více otáčkového trimru lze nastavit amplitudu výstupního signálu. Řada deseti odporů umístěných v patici slouží jako ochrana napájené cívky v senzoru proudu a také spolu s kondenzátorem jako dolní propust. To vše je osazeno v patičích pro případné experimenty s jinými hodnotami.



Obrázek 4.1 Osazený plošný spoj (strana TOP)

Na obrázku 4.2 je deska plošného spoje ze strany spojů, zde jsou vidět součástky osazené technologií SMD a opět je obrázek rozdělen do bloků. V bloku generátor je D/A převodník a operační zesilovač upravující signál z převodníku. V bloku úprava signálů je zapojen operační zesilovač jako komparátor, který zlepšuje hrany vstupních signálů.



Obrázek 4.2 Osazený plošný spoj (strana BOTTOM)

## 4.2 Program pro mikrokontrolér

Vývojový diagram hlavní smyčky programu je na obrázku 4.3. Veškeré měření probíhá pomocí přerušení, proto hlavní smyčka téměř nic nevykonává. Pouze čeká, až se naměří potřebný počet vzorků, který si uživatel může volit v menu z předem daných hodnot, kterými je 25, 50, 100 a 150 měřených vzorků. Pokud je tato podmínka splněna a je naměřen nastavený počet vzorků, hlavní smyčka zakáže veškerá přerušení, zastaví generátor sinusového průběhu a nastaví jeho výstupní hodnotu na 0V, aby nemohlo dojít ke zničení cívky senzoru stejnosměrným proudem. Dále jsou detekovány vzorky, které neodpovídají měřenému rozsahu, ať už jsou vyšší, nebo nebyly naměřeny z důvodu absence impulzu. Tyto vzorky se odstraní.

Následně program zjišťuje, zda si uživatel vybral měření stejnosměrného, nebo střídavého proudu. Pokud jde o stejnosměrný proud, je ze vzorků vypočtena průměrná hodnota, ze které se spočítá směrodatná odchylka podle vztahu:

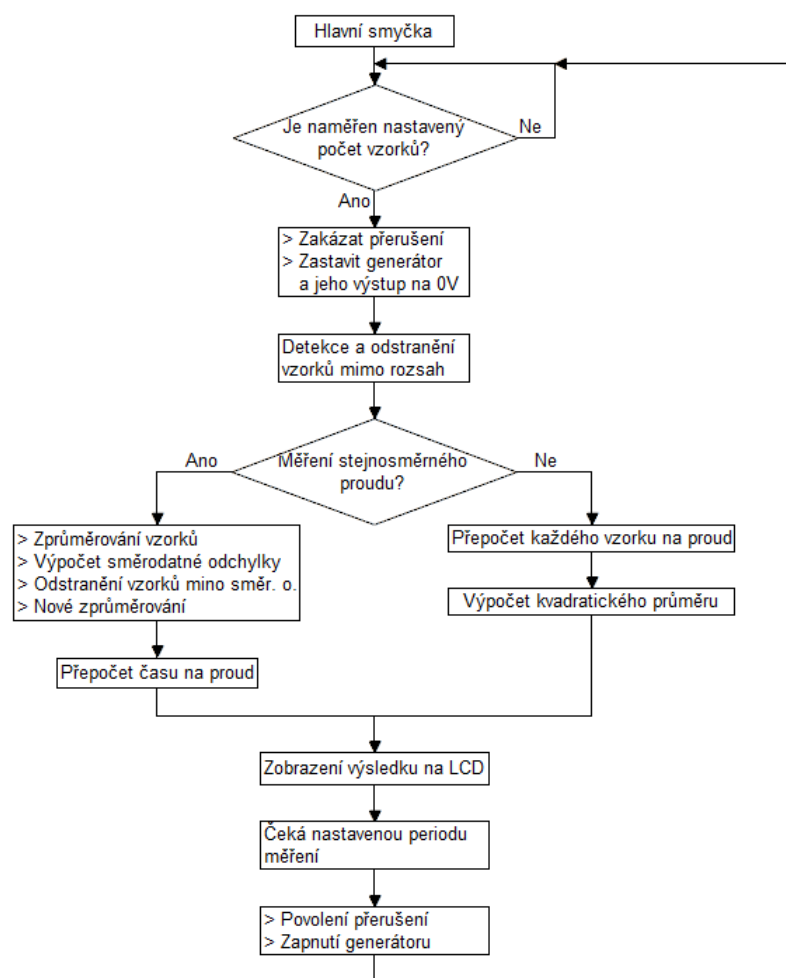
$$s = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i^2 - N \cdot \bar{x}^2)}, \quad (4.1)$$

kde  $N$  je počet vzorků,  $x_i$  je hodnota  $i$ -tého vzorku a  $\bar{x}$  je aritmetický průměr vzorků. Vzorky vybočující mimo směrodatnou odchylku od aritmetického průměru se odstraní a ze zbylých vzorků je proveden další přesnější průměr, který nezahrnuje výstřelové chyby. Výsledný průměr je přepočten podle počtu použitých měřících závitů (parametr, který si uživatel může měnit v menu) na výslednou hodnotu proudu. Tato hodnota je zobrazena na LCD displeji. Následně se provádí čekání podle nastavené periody měření (taktéž lze nastavit v menu). Po dokončení tohoto čekání se povolí přerušení a zapne se generátor sinusového průběhu. Program se vrací zpět na začátek.

Pro měření střídavého proudu se program trochu liší. Přepočet naměřeného času na proud se provede pro každý vzorek a následně se z výsledků vypočte kvadratický průměr podle vztahu:

$$K = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (4.2)$$

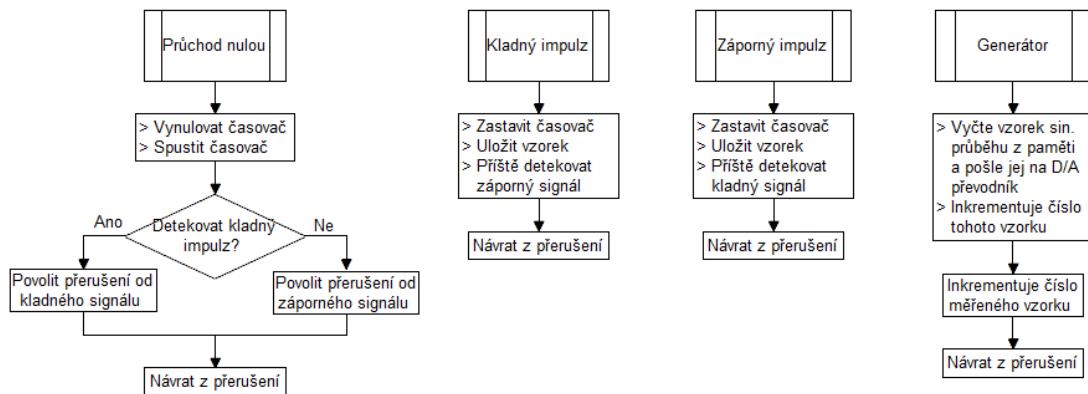
kde  $n$  je počet vzorků a  $x_i$  je hodnota  $i$ -tého vzorku. Tímto průměrem získáme efektivní hodnotu střídavého proudu.



Obrázek 4.3 Vývojový diagram hlavní smyčky programu

Samotné měření probíhá v obsluze přerušeni. Vývojové diagramy všech přerušeni jsou na obrázku 4.4. První zleva zpracovává signál z detektoru průchodu nulou generovaného signálu. Pokud signál prochází nulou, rutina přerušeni vynuluje časovač a následně jej spustí. Poté podle toho jaký signál byl detekován v předešlém měření, nastaví přerušeni buď na kladný, nebo na záporný impuls. Přerušeni pro kladný i záporný impuls jsou téměř totožná. Obě zastaví časovač a uloží vzorek do paměti na adresu danou číslem probíhajícího měření. Jediné v čem se liší, je informace o tom jaký impuls se bude měřit v dalším měření.

Poslední přerušeni obsluhuje generátor, který je vyvoláno přetečením časovače, který odměřuje vzorkovací periodu pro generovanou sinusovku. V programové paměti FLASH je uložena tabulka vzorků pro sinusový průběh. Obsluha přerušeni vždy vyčte daný vzorek a pošle jej na D/A převodník, následně inkrementuje číslo tohoto vzorku a také přičte jedničku k číslu měření, aby mohl být další naměřený vzorek uložen na následující pozici v paměti.



Obrázek 4.4 Vývojový diagram obsluhy přerušení

```

/**
 * Detekce průchodu nulou
 * Přerušení nastane, když generovaný sinusový signál projde nulou.
 * Úkolem přerušení je vynulovat hodnotu v časovači TIMER1 a nastavit
 * požadované přerušení, pro kladný, nebo záporný signál.
 */
ISR(INT2_vect) //Přerušení od INT2
{
    TCNT1 = 0; //Vynulování časovače
    TCCR1B = 0b00000001; //Spuštění časovače
    GIFR = 0b11100000; //Povolení přerušení pro daný signál
    if((MCUCSR&(1<<ISC2))==0)
        GICR = 0b01000000; //Přerušení pro záporný signál
    else
        GICR = 0b10000000; //Přerušení pro kladný signál
}
/**
 * Zpracování záporného impulsu
 * Přerušení nastane, když přijde sestupná hrana záporného impulsu.
 * Úkolem přerušení je přečíst hodnotu v časovači TIMER1, který byl
 * nulován posledním průchodem nulou generovaného signálu a uložit
 * tuto hodnotu do proměnné hodnoty_z na pozici čísla měření.
 */
ISR(INT1_vect) //Přerušení od INT1
{
    TCCR1B = 0b00000000; //Zastavení časovače
    GICR = 0b00000000; //Zakázání všech přerušení
    hodnoty_z [mereni] = TCNT1; //Uloží záporný naměřený vzorek
    GIFR = 0b11100000; //Povolení přerušení
    MCUCSR &= 0b10111111;
    GICR = 0b00100000;
}
/**
 * zpracování kladného impulsu
 * Přerušení nastane, když přijde sestupná hrana kladného impulsu.
 * Úkolem přerušení je přečíst hodnotu v časovači TIMER1, který byl
 * nulován posledním průchodem nulou generovaného signálu a uložit
 * tuto hodnotu do proměnné hodnoty_k na pozici čísla měření.
 */
ISR(INT0_vect) //Přerušení od INT0
{
    TCCR1B = 0b00000000; //Zastavení časovače
    GICR = 0b00000000; //Zakázání všech přerušení
    hodnoty_k [mereni] = TCNT1; //Uloží kladný naměřený vzorek
    GIFR = 0b11100000; //Povolení přerušení
    MCUCSR |= 0b01000000;
    GICR = 0b00100000;
}
  
```



Program také obsluhuje tlačítka a LCD displej, pro který byla vytvořena knihovna s názvem “LCD.h“, která obsahuje inicializaci LCD pro osmi-bitovou komunikaci, funkci pro smazání obsahu LCD, zápis instrukce, zápis znaku a zápis řetězce znaků. Tlačítka slouží pro základní nastavení zařízení v uživatelském menu. Podrobnější popis tohoto menu je v podkapitole s názvem Pohled ze strany uživatele.

Při výpočtu směrodatné odchylky a kvadratického průměru je zapotřebí v mikrokontroléru vyřešit výpočet druhé odmocniny. Tento výpočet je zde řešen pomocí Newtonovi iterační metody podle vztahu:

$$x_{k+1} = \frac{1}{2} \left( x_k + \frac{a}{x_k} \right), \quad (4.3)$$

kde  $a$  je číslo ze kterého potřebujeme určit odmocninu,  $x_k$  je předchozí odhad. Jako  $x_0$  lze zvolit odhad odmocniny, který nelze provést v mikroprocesoru, proto je v programu jako prvotní odhad vždy  $x_0=1$ . Výpočet se provádí v cyklech, dokud není dosaženo potřebné přesnosti, která se určí vztahem:

$$\Delta = |x_{k+1} - x_k|. \quad (4.4)$$

Počet cyklů závisí na požadované přesnosti a také na velikosti čísla, jehož odmocninu chceme spočítat. Po dosažení požadované přesnosti je výsledek dán vztahem 4.3.

K programu byla vytvořena dokumentace v programu DoxyGen, která je přiložena v elektronické podobě na CD.

```
/**
 * Funkce vykonávající odmocninu.
 * Tato funkce vezme vstupní proměnou a spočítá pomocí Newtonovi iterační metody její
 * druhou odmocninu.
 * Prvotní odhad výsledné odmocniny je vždy X0=1. Metoda se provádí tak dlouho, dokud
 * nedosáhneme uspokojivých výsledků.
 * počet provedení pro stejnou požadovanou přesnost závisí také na velikosti čísla,
 * jehož odmocninu chceme počítat.
 *
 * @param mocnina - vstupní proměnná (typu long)
 * @return odmocnina (typu long)
 */
unsigned long Odmocnina (unsigned long mocnina)
{
    unsigned long X0=1, X1=0, delta=1; //Založení proměnných

    while(delta!=0) //Výpočet v cyklech dokud není delta=0
    {
        X1=(X0+(mocnina/X0))/2; //Výpočet Xk+1
        delta=X1-X0; //Výpočet Δ
        X0=X1; //Posun indexu
    }
    return(X0); //Návrat a předání výsledku
}
```

### 4.3 Převodní charakteristiky

Samotné charakteristiky byly měřeny jako závislost proudu protékajícího senzorem na čísle, které získá mikroprocesor z časovače. Protože se přímo z tohoto čísla bude počítat výsledný proud, není číslo přepočteno na skutečný čas a je v závislostech použito jako bezrozměrné číslo  $x$ . Charakteristiky jsou proměřeny pro různé počty závitů měřící cívky a musejí být změřeny zvlášť pro kladný i záporný impulz, protože každý z nich se chová trochu jinak. Na svislé ose je absolutní hodnota proudu. V každé závislosti jsou dva průběhy. Jeden je červené barvy pro kladný impulz a druhý je modré barvy pro záporný impulz. Oba průběhy v jednom grafu jsou vždy pro daný počet závitů a jsou proloženy lineární přímkou. Pod grafickou závislostí jsou uvedeny rovnice těchto přímk. Tyto rovnice budou upraveny tak aby je bylo možné použít v programu pro přepočet.

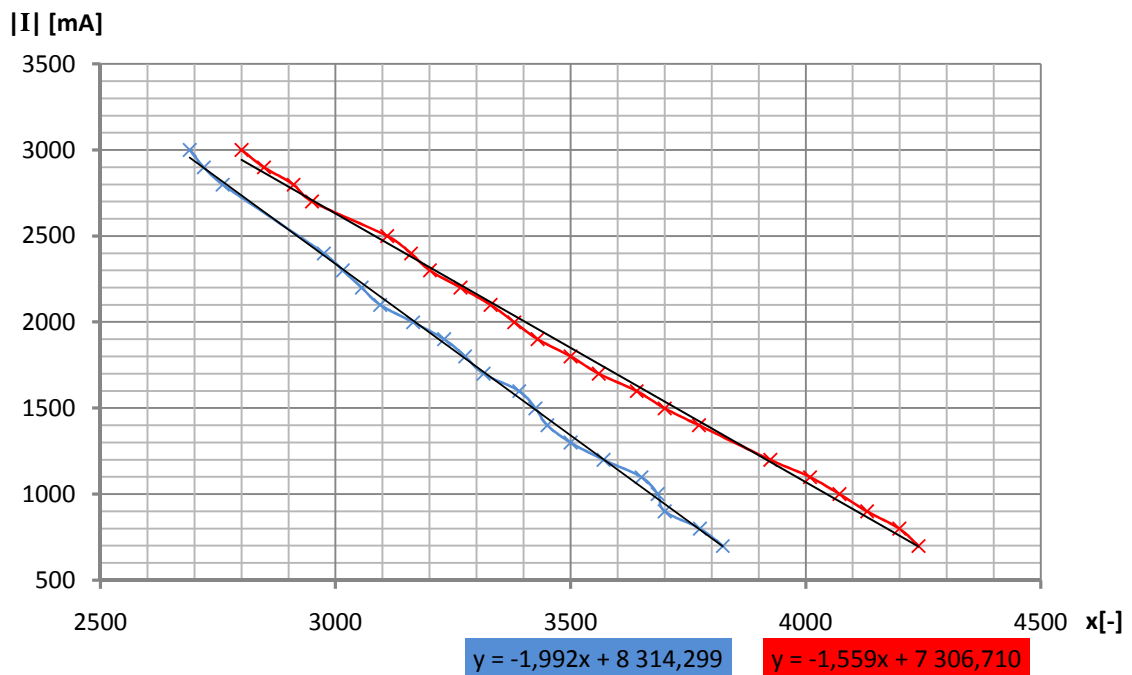
Na obrázku 4.5 jsou převodní charakteristiky pro šest závitů měřící cívky. Měřící rozsah pro tento počet závitů je od 700mA do 3A pro kladný proud a -700mA až -3A pro záporný proud. Rovnice lineárních závislostí budou do programu zadány pro záporný proud ve tvaru:

$$|I| = \frac{8\,314\,299 - 1\,992\,x}{1000} \quad [mA] \quad (4.5)$$

a pro kladný proud ve tvaru:

$$|I| = \frac{7\,306\,710 - 1\,559\,x}{1000} \quad [mA], \quad (4.6)$$

kde  $x$  je změřené číslo a výsledný proud je v absolutní hodnotě. Tento tvar je použit proto, aby se nemusely používat čísla s plovoucí řádovou čárkou.



Obrázek 4.5 Převodní charakteristika pro 6 závitů, kladný impulz (červený průběh) a záporný impulz (modrý průběh)

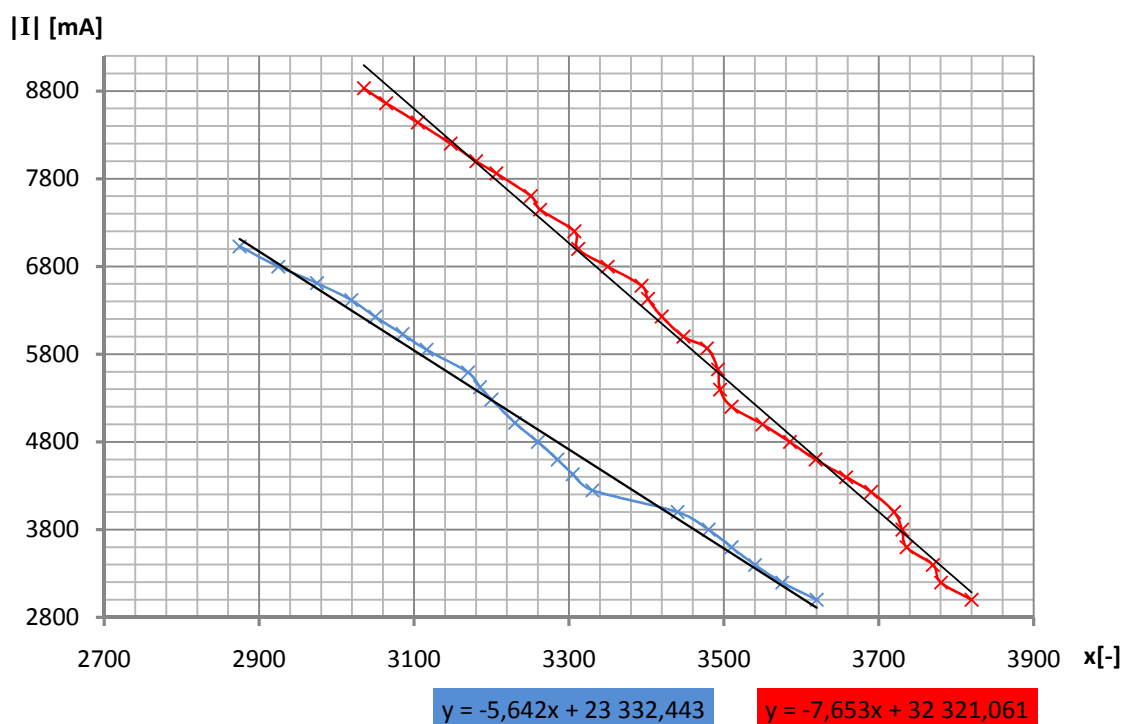
Na obrázku 4.6 je převodní charakteristika pro dva závity měřící cívky. Opět je zde červenou barvou závislost pro kladný proud a modrou barvou závislost pro záporný proud. Měřící rozsah pro tento počet závitů by teoreticky měl být až 9A, ale pro záporný proud impulz vymizel již kolem -7A. Takže skutečný rozsah je od 3A do 8,8A a od -3A do -7A. Upravená rovnice pro záporný proud má tvar:

$$|I| = \frac{23\,332\,443 - 5\,642\,x}{1000} \quad [mA] \quad (4.7)$$

a pro kladný proud má tvar:

$$|I| = \frac{32\,321\,061 - 7\,653\,x}{1000} \quad [mA], \quad (4.8)$$

kde  $x$  je opět naměřené číslo a výsledný proud je v absolutní hodnotě. O jeho polaritě se rozhoduje v programu již při průměrování vzorků podle velikosti kladných a záporných vzorků. Proto stačí použít bezznaménkový datový typ *long*.



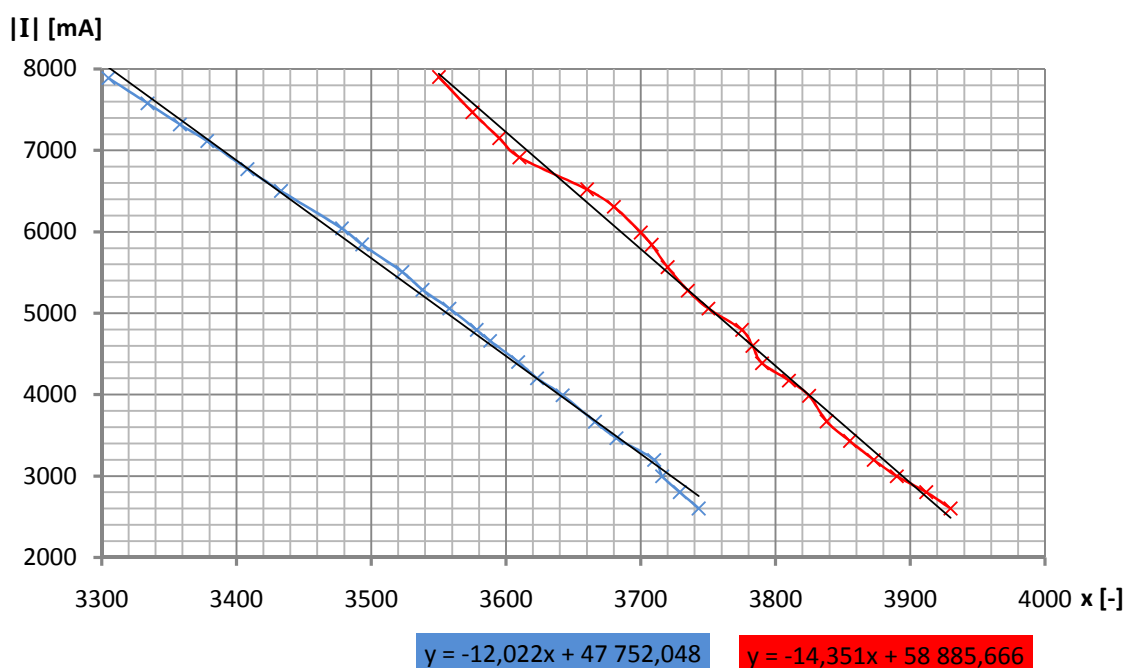
Obrázek 4.6 Převodní charakteristika pro 2 závity, kladný impulz (červený průběh) a záporný impulz (modrý průběh)

Na obrázku 4.7 je převodní charakteristika pro jeden závit. Měřící rozsah pro tento počet závitů by teoreticky měl být až 18A, ale z důvodů proudového omezení zdroje a umělé zátěže byla charakteristika proměřena pouze do 8A. Upravená rovnice pro záporný proud má tvar:

$$|I| = \frac{47\,756\,048 - 12\,022\,x}{1000} \quad [mA] \quad (4.7)$$

a pro kladný proud má tvar:

$$|I| = \frac{58\,885\,666 - 14\,351\,x}{1000} \quad [mA]. \quad (4.8)$$



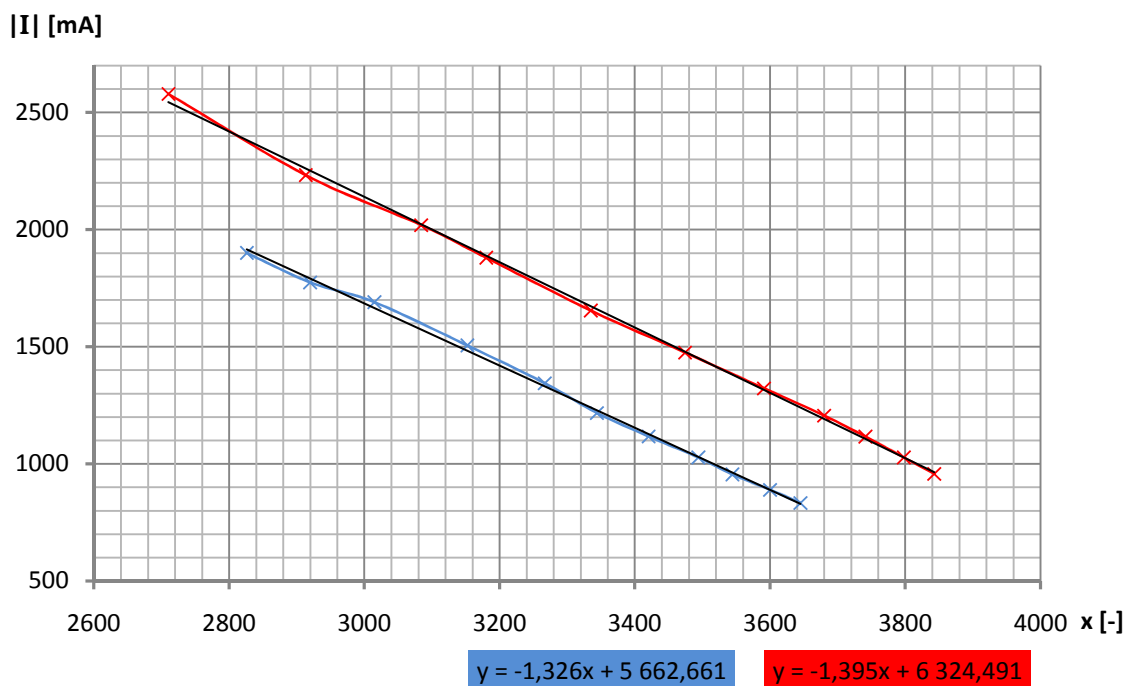
Obrázek 4.7 Převodní charakteristika pro 1 závit, kladný impuls (červený průběh) a záporný impuls (modrý průběh)

Na obrázku 4.8 je převodní charakteristika pro osm závitů. Pro tento počet závitů je nejlepší poměr  $\Delta x/\Delta I$ , takže by mělo měření s osmi závitů měřící cívky být nejpřesnější. Upravená rovnice pro záporný proud má tvar:

$$|I| = \frac{5\,662\,661 - 1\,326\,x}{1000} \quad [mA] \quad (4.9)$$

a pro kladný proud má tvar:

$$|I| = \frac{6\,324\,491 - 1\,394\,x}{1000} \quad [mA]. \quad (4.10)$$



Obrázek 4.8 Převodní charakteristika pro 8 závitů, kladný impuls (červený průběh) a záporný impuls (modrý průběh)

```

/**
 * Funkce výpočtu kladné hodnoty.
 * Funkce vybere vzorec převodní charakteristiky podle zvoleného počtu závitů a převede
 * změřený čas na proud.
 *
 * @param cislo - vstupní proměnná (typu long)
 * @return proud (typu long)
 */
unsigned long Vypocet_k (unsigned long cislo)
{
    switch(Zavit)
    {
        case 0: return((58885666-(14351*cislo))/1000);      break; //Kladný - 1z
        case 1: return((32321061-(7653*cislo))/1000);     break; //Kladný - 2z
        case 2: return((7306710-(1559*cislo))/1000);     break; //Kladný - 6z
        case 3: return((6324491-(1395*cislo))/1000);     break; //Kladný - 8z
    }
    return(0);
}
/**
 * Funkce výpočtu záporné hodnoty.
 * Funkce vybere vzorec převodní charakteristiky podle zvoleného počtu závitů a převede
 * změřený čas na proud.
 *
 * @param cislo - vstupní proměnná (typu long)
 * @return proud (typu long)
 */
unsigned long Vypocet_z (unsigned long cislo)
{
    switch(Zavit)
    {
        case 0: return((47752048-(12022*cislo))/1000);   break; //Záporný - 1z
        case 1: return((23332443-(5642*cislo))/1000);   break; //Záporný - 2z
        case 2: return((8314299-(1992*cislo))/1000);    break; //Záporný - 6z
        case 3: return((5662661-(1326*cislo))/1000);    break; //Záporný - 8z
    }
    return(0);
}

```

## 4.4 Pohled ze strany uživatele

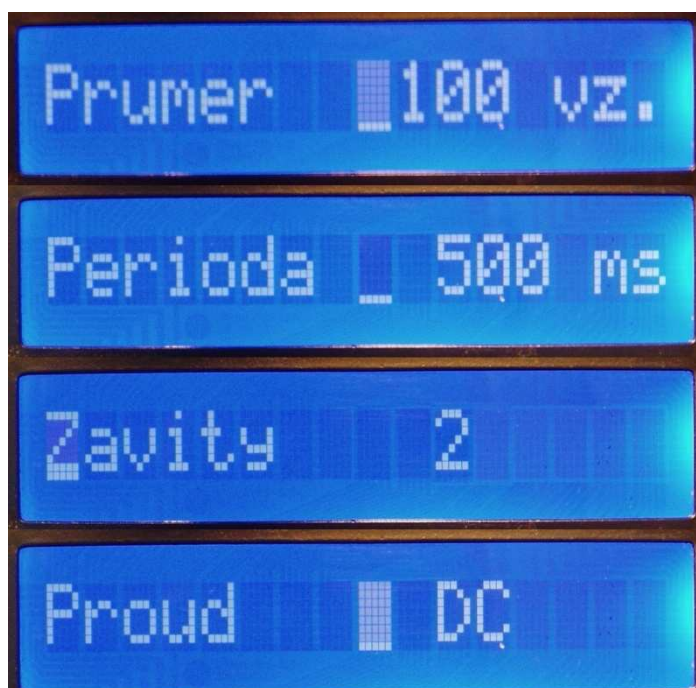
Po zapnutí zařízení jsou veškeré nastavitelné hodnoty načteny z paměti EEPROM a začne probíhat samotné měření. Na LCD se zobrazuje měřený proud. Pokud se zobrazí symbol “Lo“ znamená to, že měřený proud je nižší než nastavený rozsah. Při zobrazení symbolu “Hi“ je měřený proud vyšší než nastavený rozsah.

Uživatel může kdykoliv v průběhu měření stisknout klávesu “Menu“. Tím vyvolá uživatelské menu, ve kterém lze nastavit pod položkou “Průměr“ počet naměřených vzorků ze kterých se bude provádět průměrování. Na výběr je ze čtyř možností, a to 25, 50, 100 a 150 vzorků. Pod položkou “Perioda“ je možno nastavit periodu jednotlivých měření. Lze zvolit z možností 125, 250, 500 a 1000ms. Položkou “Závity“ se nastavuje počet závitů měřicí cívky. Lze zvolit z možností 1, 2, 6 a 8 závitů. Pod poslední položkou s názvem “Proud“ lze nastavit typ měřeného proudu. Na výběr je ze dvou variant, střídavý a stejnosměrný proud.

Přechody mezi jednotlivými položkami menu uživatel provádí pomocí klávesy “Up“ a “Down“. Výběr dané položky potvrdí klávesou “Enter“. A přechody mezi jednotlivými možnostmi dané položky lze provádět opět pomocí kláves “Up“ a “Down“. Když uživatel vybere vhodnou možnost, potvrdí ji klávesou “Enter“ a dostává se opět do uživatelského menu. Pro opuštění tohoto menu a návrat k měření je zapotřebí stisknout klávesu “Menu“. Při tomto přechodu z menu na měření dojde k uložení všech provedených změn do paměti typu EEPROM. Takže při opětovném zapnutí zařízení budou z paměti načteny stejné parametry, které uživatel používal v předchozích měřeních. To vše je názorně vyobrazeno na diagramu uživatelského menu na obrázku 4.11.

Podoba uživatelského menu je nafocena na obrázku 4.9. Úplně nahoře je výběr počtu vzorků pro měření, kde je vybrána hodnota 100 vzorků. Blikající kurzor informuje uživatele, zda se nachází v úrovni menu, nebo v samotném výběru hodnoty. Bliká-li na 1. pozici displeje je zařízení v úrovni menu, kdy stiskem kláves “Up“ a “Down“ dochází k procházení jednotlivých položek. Blikáním před nastavenou hodnotou informuje o tom, že zařízení se nachází ve výběru hodnoty, kdy stiskem kláves “Up“ a “Down“ dochází k výběru samotné hodnoty.

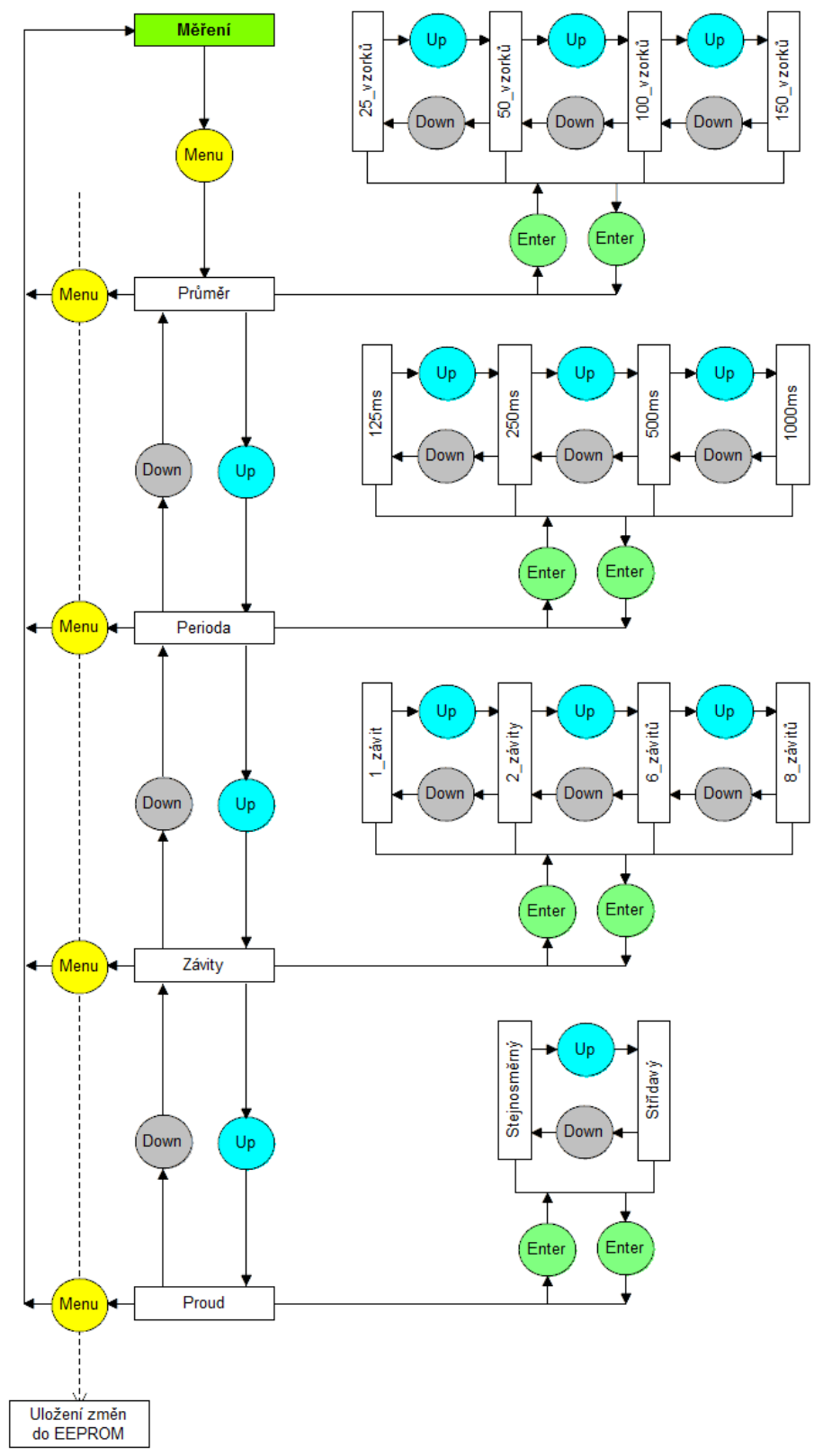
Na obrázku 4.10 jsou příklady, jak může vypadat podoba zobrazení výsledného měření na displeji. Na prvním displeji je měřený proud nižší než nastavený měřený rozsah, proto se místo výsledné hodnoty na LCD vypisuje symbol “Lo“. Na dalších obrázcích je měřen stejnosměrný kladný i záporný proud.



Obrázek 4.9 Podoba uživatelského menu na LCD



Obrázek 4.10 Zobrazení výsledného proudu na LCD



Obrázek 4.11 Diagram uživatelského menu



## 5 PŘESNOST MĚŘENÍ PROUDU

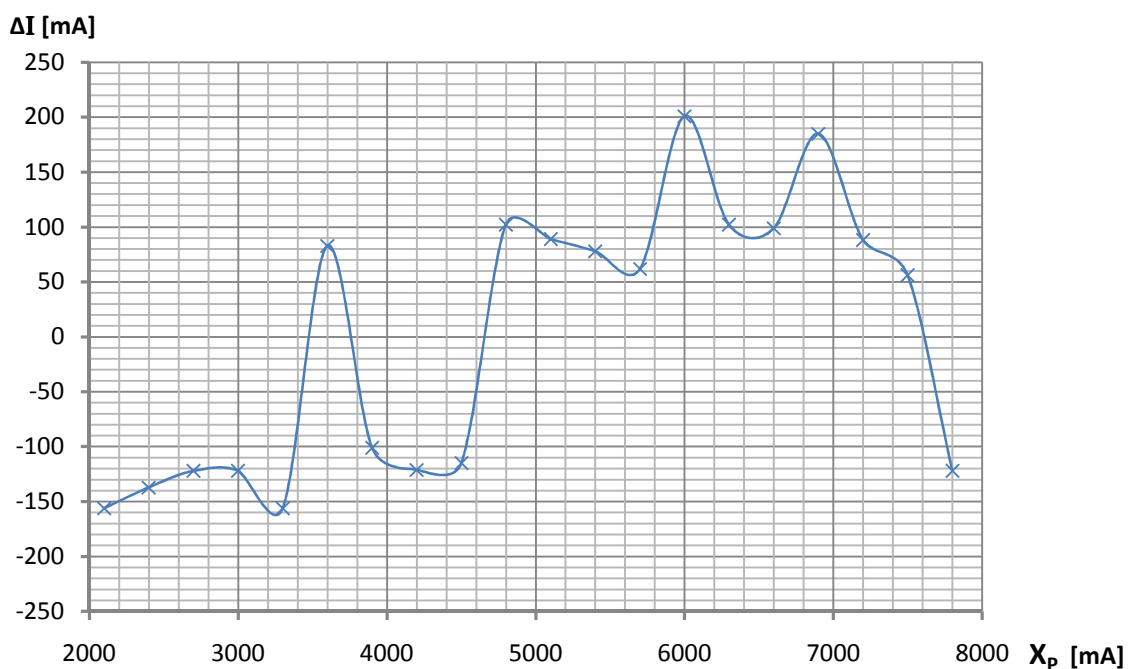
V kapitole je zhodnoceno zapojení z pohledu přesnosti měření proudu. Pro každý průběh je provedeno několik měření, z nichž je vypočítána absolutní chyba. Poté je pro každý rozsah stanovena přesnost, s jakou je proud měřen v celém měřicím rozsahu.

### 5.1 Naměřené odchylky

V prvním měření byly proměřeny odchylky proudu pro jeden závit měřicí cívky, který má rozsah do 19A. Tyto naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1 a největší odchylky jsou vyneseny do grafické závislosti na obrázku 5.1. K největší odchylce je přidána jedna třetina z této odchylky a tím jsou stanoveny meze. V tomto případě meze vychází  $\Delta I = 250 \text{ mA}$ . Z této meze a rozsahu je stanovena přesnost která vychází 1,32% v celém měřicím rozsahu pro jeden závit měřicí cívky.

Tabulka 5.1 Naměřené odchylky pro jeden závit měřicí cívky

Pro jeden závit měřicí cívky						
Konvenčně pravá hodnota $X_p$ [mA]	Měření					
	1		2		3	
	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]
7800	7896	-96	7912	-112	7922	-122
7500	7490	10	7444	56	7465	35
7200	7112	88	7139	61	7132	68
6900	6756	144	6822	78	6715	185
6600	6521	79	6501	99	6531	69
6300	6339	-39	6342	-42	6198	102
6000	5814	186	5799	201	5869	131
5700	5638	62	5690	10	5655	45
5400	5465	-65	5429	-29	5322	78
5100	5128	-28	5112	-12	5011	89
4800	4823	-23	4889	-89	4698	102
4500	4598	-98	4615	-115	4478	22
4200	4308	-108	4321	-121	4122	78
3900	3986	-86	4001	-101	3926	-26
3600	3517	83	3656	-56	3645	-45
3300	3399	-99	3456	-156	3356	-56
3000	3106	-106	3142	-142	3122	-122
2700	2822	-122	2869	-169	2836	-136
2400	2513	-113	2537	-137	2512	-112
2100	2256	-156	2278	-178	2148	-48



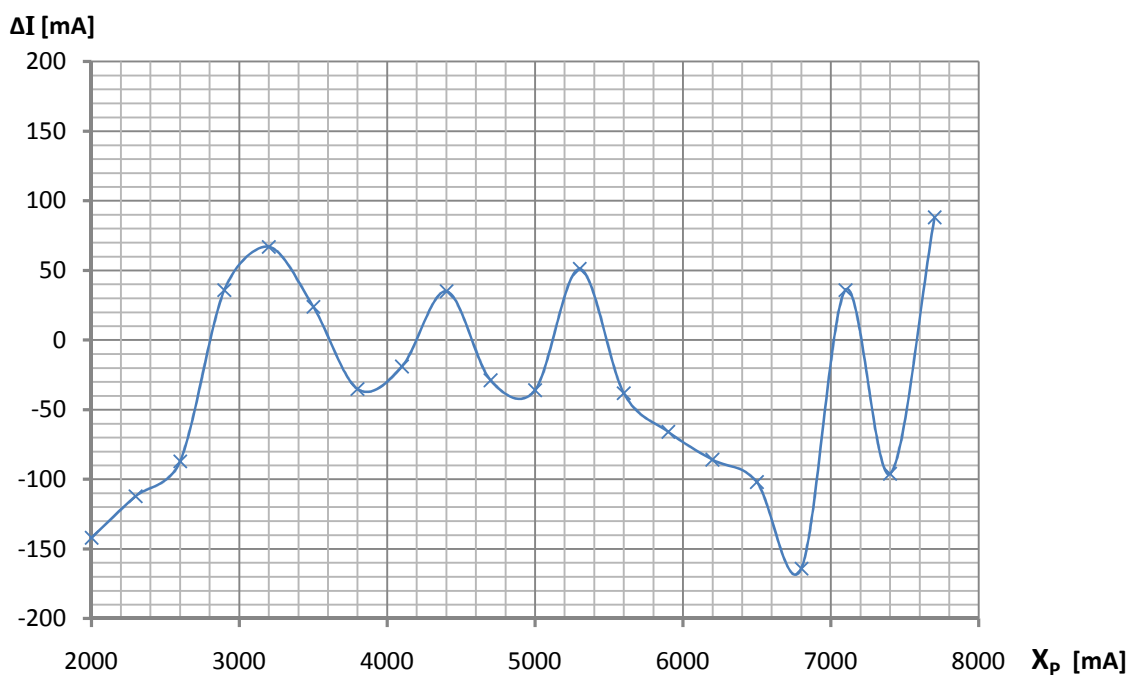
Obrázek 5.1 Grafická závislost naměřených odchylek pro jeden závit měřicí cívky

V druhém měření jsou proměřeny odchylky proudu pro dva závity měřicí cívky, které mají rozsah do 9,5A. Naměřené a vypočítané hodnoty těchto odchylek jsou uvedeny v tabulce 5.2 a největší odchylky jsou vyneseny do grafické závislosti na obrázku 5.2. K největší odchylce je přičtena jedna třetina z této odchylky a tím je stanovena mez, která v tomto případě vychází  $\Delta I=225\text{mA}$ . Z meze a rozsahu je stanovena přesnost která vychází 2,37% v celém měřicím rozsahu pro dva závity měřicí cívky.

Tabulka 5.2 Naměřené odchylky proudu pro dva závity měřicí cívky

Pro dva závity měřicí cívky						
Konvenčně pravá hodnota $X_p$ [mA]	Měření					
	1		2		3	
	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]
7700	7625	75	7612	88	7684	16
7400	7431	-31	7445	-45	7496	-96
7100	7111	-11	7064	36	7096	4
6800	6964	-164	6908	-108	6887	-87
6500	6602	-102	6587	-87	6456	44
6200	6286	-86	6254	-54	6260	-60
5900	5966	-66	5947	-47	5955	-55
5600	5589	11	5638	-38	5584	16

Konvenčně pravá hodnota $X_P$ [mA]	Měření					
	1		2		3	
	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]
5300	5249	51	5261	39	5319	-19
5000	4976	24	5036	-36	4971	29
4700	4719	-19	4729	-29	4723	-23
4400	4426	-26	4383	17	4365	35
4100	4115	-15	4119	-19	4124	-24
3800	3765	35	3835	-35	3820	-20
3500	3476	24	3512	-12	3486	14
3200	3133	67	3178	22	3145	55
2900	2929	-29	2875	25	2864	36
2600	2687	-87	2676	-76	2682	-82
2300	2412	-112	2389	-89	2396	-96
2000	2142	-142	2149	-149	2113	-113

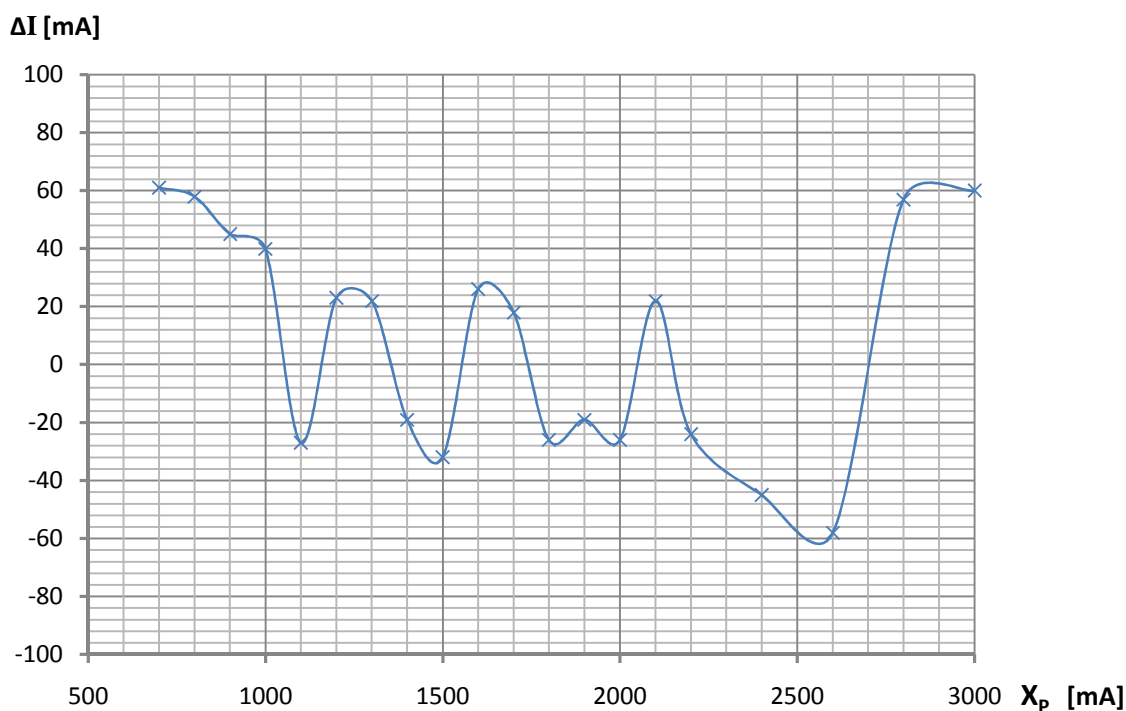


Obrázek 5.2 Graf odchylek naměřeného proudu pro dva závity měřicí cívky

Ve třetím měření je proměřeno totéž jako v předchozích dvou, ale tentokrát pro šest závitů měřicí cívky, která má měřicí rozsah do 3A. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.3 a vyneseny do grafické závislosti na obrázku 5.3. K největší naměřené odchylce se opět přičte jedna třetina z této odchylky a tím je stanovena mez která vychází  $\Delta I=90\text{mA}$ . Z této meze a rozsahu je stanovena přesnost, která pro tento rozsah vychází 3% v celém měřicím rozsahu.

Tabulka 5.3 Naměřené odchylky proudu pro šest závitů měřicí cívky

Pro šest závitů měřicí cívky						
Konvenčně pravá hodnota $X_p$ [mA]	Měření					
	1		2		3	
	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]
3000	2943	57	2956	44	2940	60
2800	2765	35	2743	57	2786	14
2600	2561	39	2634	-34	2658	-58
2400	2429	-29	2445	-45	2385	15
2200	2224	-24	2218	-18	2224	-24
2100	2112	-12	2086	14	2078	22
2000	2020	-20	2026	-26	1994	6
1900	1884	16	1891	9	1919	-19
1800	1823	-23	1815	-15	1826	-26
1700	1685	15	1692	8	1682	18
1600	1579	21	1574	26	1589	11
1500	1511	-11	1491	9	1532	-32
1400	1419	-19	1411	-11	1388	12
1300	1278	22	1282	18	1294	6
1200	1209	-9	1217	-17	1177	23
1100	1115	-15	1127	-27	1119	-19
1000	976	24	986	14	960	40
900	855	45	863	37	860	40
800	743	57	756	44	742	58
700	639	61	640	60	652	48



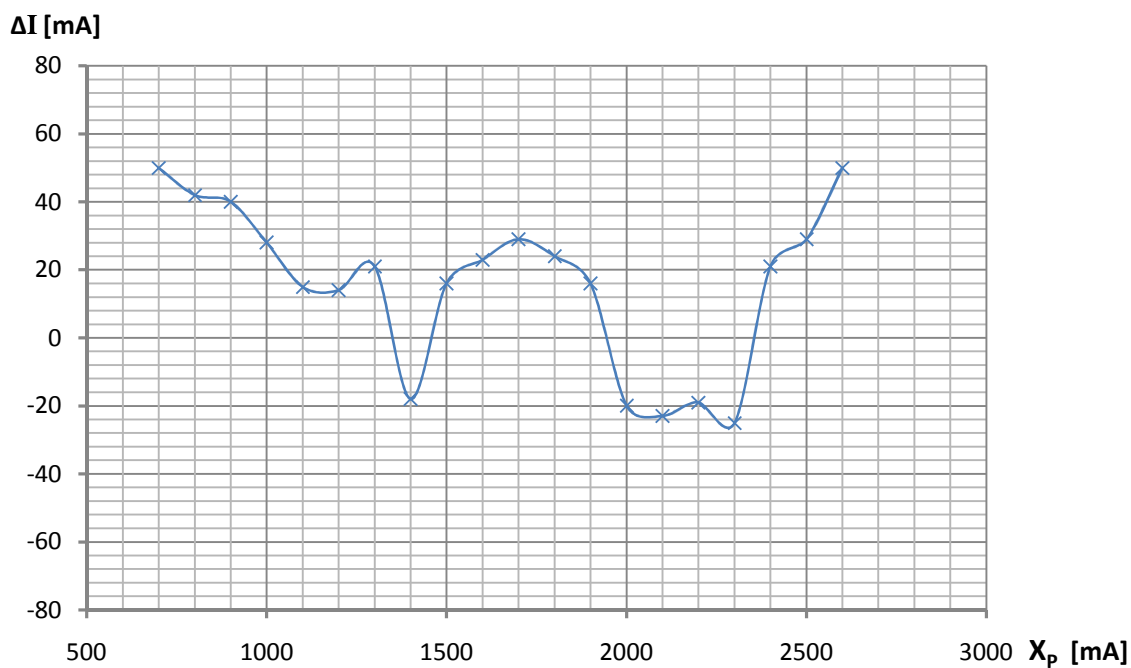
Obrázek 5.3 Graf odchylek proudu pro šest závitů měřicí cívky

V posledním měření jsou proměřeny odchylky pro poslední použitý rozsah s osmy závitů měřicí cívky, která měří proud do 2,6A. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou v tabulce 5.4 a největší odchylky proudu jsou vyneseny do grafické závislosti na obrázku 5.4. Opět je stanovena mez, která vychází  $\Delta I=70\text{mA}$  a je vypočítána přesnost, která je 2,69% v celém měřicím rozsahu.

Tabulka 5.4 Naměřené odchylky proudu pro osm závitů měřicí cívky

Pro osm závitů měřicí cívky						
Konvenčně pravá hodnota $X_p$ [mA]	Měření					
	1		2		3	
	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_X$ [mA]
2600	2555	45	2550	50	2552	48
2500	2489	11	2471	29	2478	22
2400	2408	-8	2416	-16	2379	21
2300	2311	-11	2325	-25	2310	-10
2200	2187	13	2219	-19	2207	-7
2100	2123	-23	2111	-11	2118	-18
2000	2020	-20	2008	-8	1985	15
1900	1893	7	1884	16	1890	10
1800	1789	11	1776	24	1790	10

Konvenčně pravá hodnota $X_p$ [mA]	Měření					
	1		2		3	
	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]	$X_M$ [mA]	$\Delta_x$ [mA]
1700	1671	29	1689	11	1680	20
1600	1580	20	1585	15	1577	23
1500	1495	5	1484	16	1490	10
1400	1399	1	1411	-11	1418	-18
1300	1288	12	1279	21	1290	10
1200	1186	14	1193	7	1187	13
1100	1108	-8	1085	15	1091	9
1000	972	28	980	20	976	24
900	864	36	872	28	860	40
800	769	31	758	42	771	29
700	650	50	670	30	659	41



Obrázek 5.4 Graf odchylek proudu pro osm závitů měřicí cívky

Všechna měření odchylek jsou provedena pro měření kladného proudu. Záporné impulsy a s tím spojené měření záporného proudu vychází lépe. Tímto je zajištěno, že v daném měřicím rozsahu nebude zde stanovená přesnost překročena i pro záporný proud.

Měření střídavého proudu je pouze orientační, protože při vzorkování střídavého proudu nemůže docházet k průměrování velkého množství vzorků a odstranění případných chybných vzorků jak tomu je u měření stejnosměrného proudu. Dalším problémem je naměření pouhých pětiset vzorků za vteřinu.

## 6 ZÁVĚR

Při řešení problematiky zpracování signálu ze senzoru proudu s využitím Wiegandova efektu byly proměřeny převodní charakteristiky tohoto senzoru. Byl vybrán vhodný mikrokontrolér a navržen generátor sinusového průběhu, pro buzení senzoru. Dále byly navrženy obvody pro vhodné upravení výstupních signálů. Pro komunikaci s uživatelem byl vybrán alfanumerický LCD displej. Mimo zadání bylo navrženo zapojení zdroje, který napájí celý obvod. Toto zapojení je realizováno na desce plošných spojů a byl vytvořen program pro mikrokontrolér, který zpracovává signály ze senzoru proudu. Pro tento program byla vytvořena dokumentace v programu DoxyGen, která je přiložena v elektronické podobě na CD. V závěru celé práce byly proměřeny odchylky měření proudu ampérmetrem, který je výsledkem této práce.



# LITERATURA

- [1] ŠTEFÁNEK, Martin. *Bezkontaktní proudový senzor DC a AC proudu nízkých kmitočtů s využitím Wiegandova efektu*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT v Brně FEKT UREL. Vedoucí práce doc. Ing. Radek Kubásek, Ph.D.
- [2] FRÝZA, Tomáš. *Mikroprocesorová technika a embedded systémy: Přednášky* [online]. 2011 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/userfiles/downloads/mpt/mpt\\_prednasky\\_2011-12-16.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/userfiles/downloads/mpt/mpt_prednasky_2011-12-16.pdf)
- [3] ATMEL CORPORATION. *ATmega16(L)* [online]. 2466T-AVR-07/10. USA, 2002 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2466.pdf>
- [4] RADELOFF, C, RAUSCHER, G, Pulse generation with short composite wires, *iee transactions on magnetics*, VOL. MAG-21, NO. 5, September 1985. [cit. 2014-11-22].
- [5] Mikrokontroléry PIC. [online]. 20.12.2012 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://mikrokontrolery-pic.cz/>
- [6] *A/D převodník* [online]. 21.11.2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/A/D\\_p%C5%99evodn%C3%ADk](http://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk)
- [7] HITACHI, Ltd. *HD44780U* [online]. 1998 [cit. 2014-12-13]. ISBN ADE-207-272(Z). Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf>
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *LM1575* [online]. 1999, 2013 [cit. 2014-12-13]. ISBN SNVS106E. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2575-n.pdf>

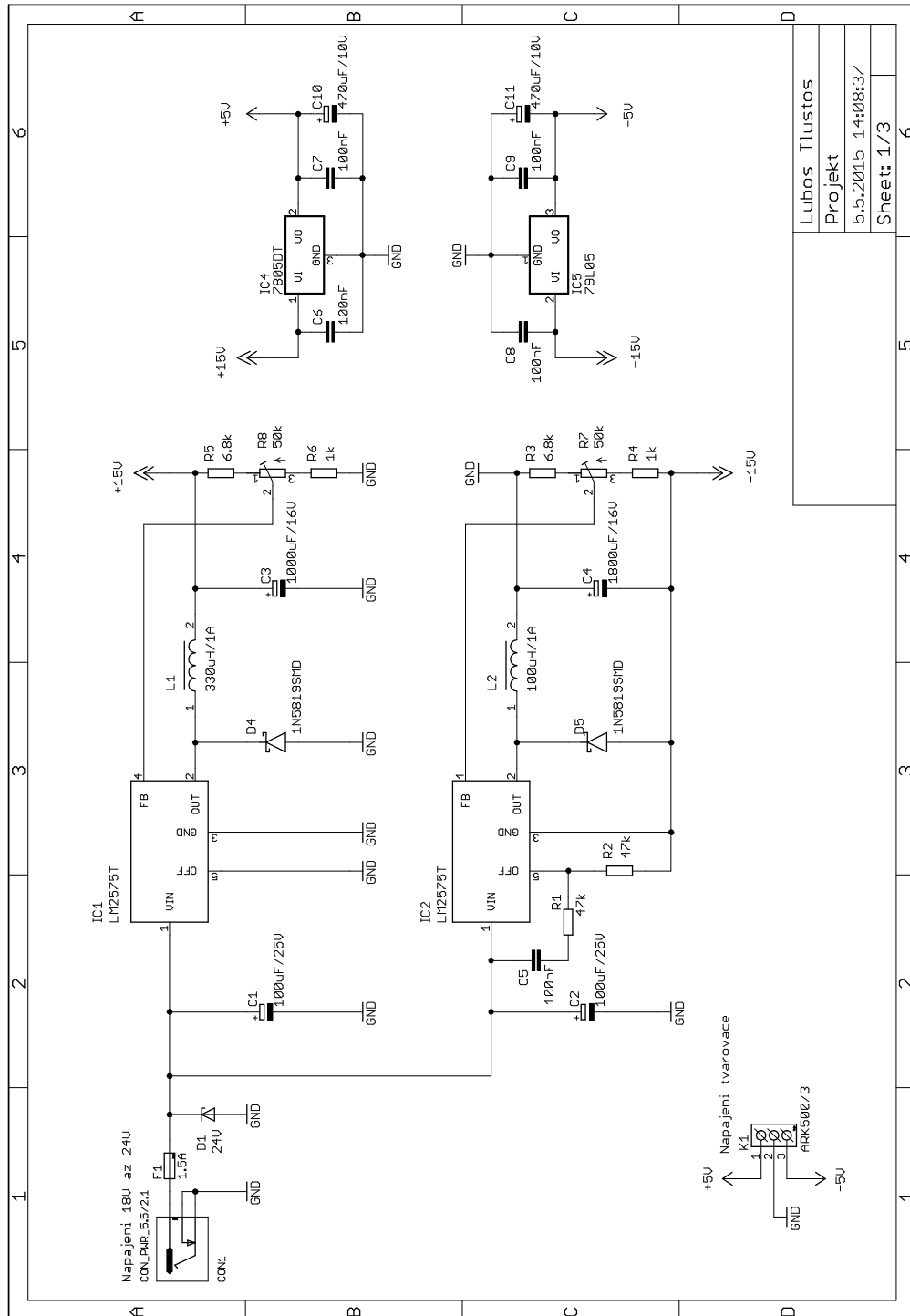
## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$f_0$	Mezní kmitočet filtru.
$A_u$	Napět'ové zesílení.
$U_{cc}$	Napájecí napětí.
$U_{ref}$	Referenční napětí.
$U_{in+}$	Vstupní napětí na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače.
$U_{in-}$	Vstupní napětí na invertujícím vstupu operačního zesilovače.
$U_{out}$	Výstupní napětí.
$s$	Směrodatná odchylka.
$K$	Kvadratický průměr.
$X_p$	Konvenčně pravá hodnota.
$X_M$	Měřená hodnota.
$\Delta_X$	Absolutní chyba.

MCU	Mikrokontrolér.
SPI	Sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface).
PWM	Pulzní šířková modulace (Pulse Width Modulation).
OZ	Operační zesilovač.
I/O	Vstupně/výstupní.
TIMER	Čítač/časovač.

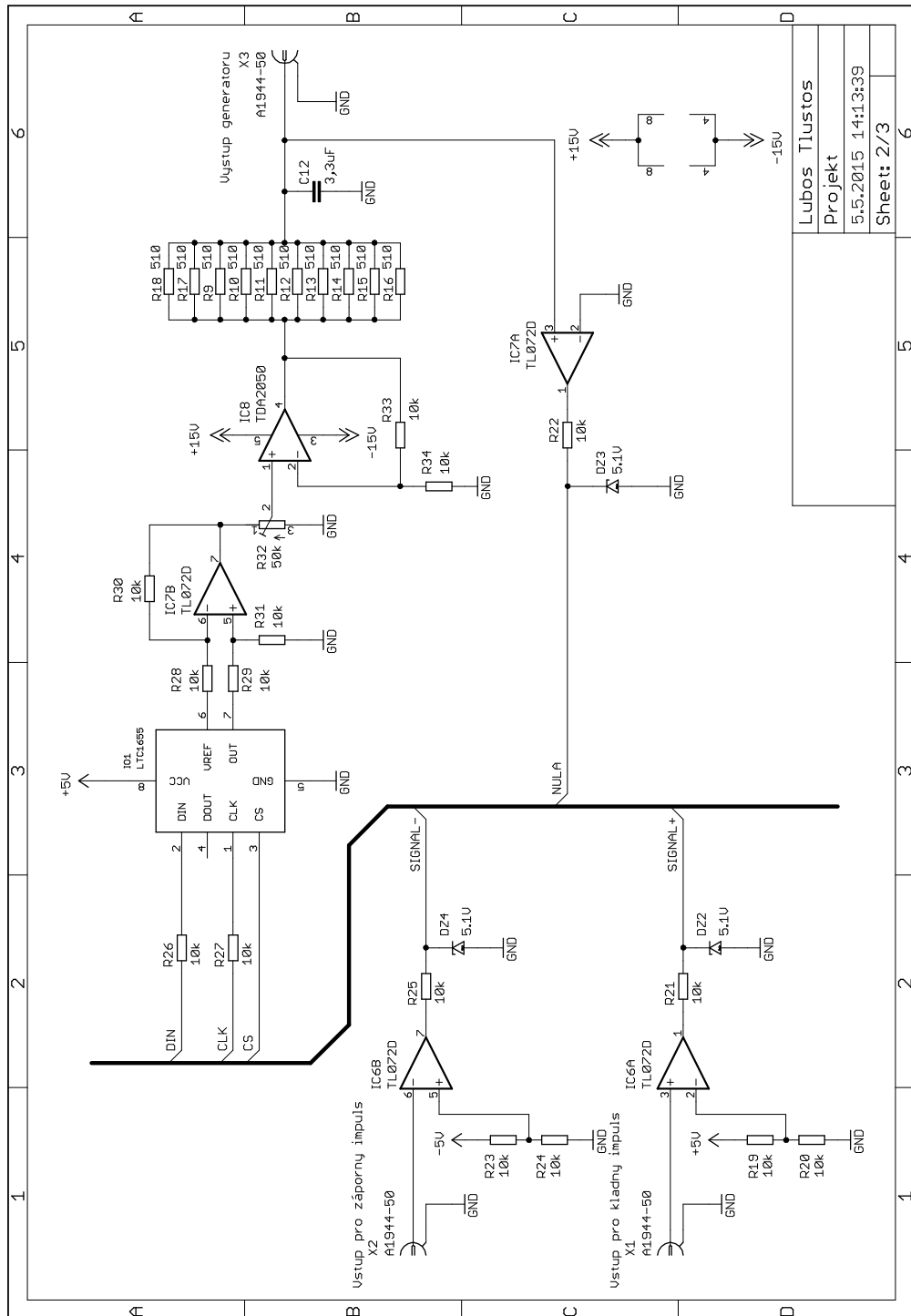
# A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

## A.1 Obvodové zapojení zdroje



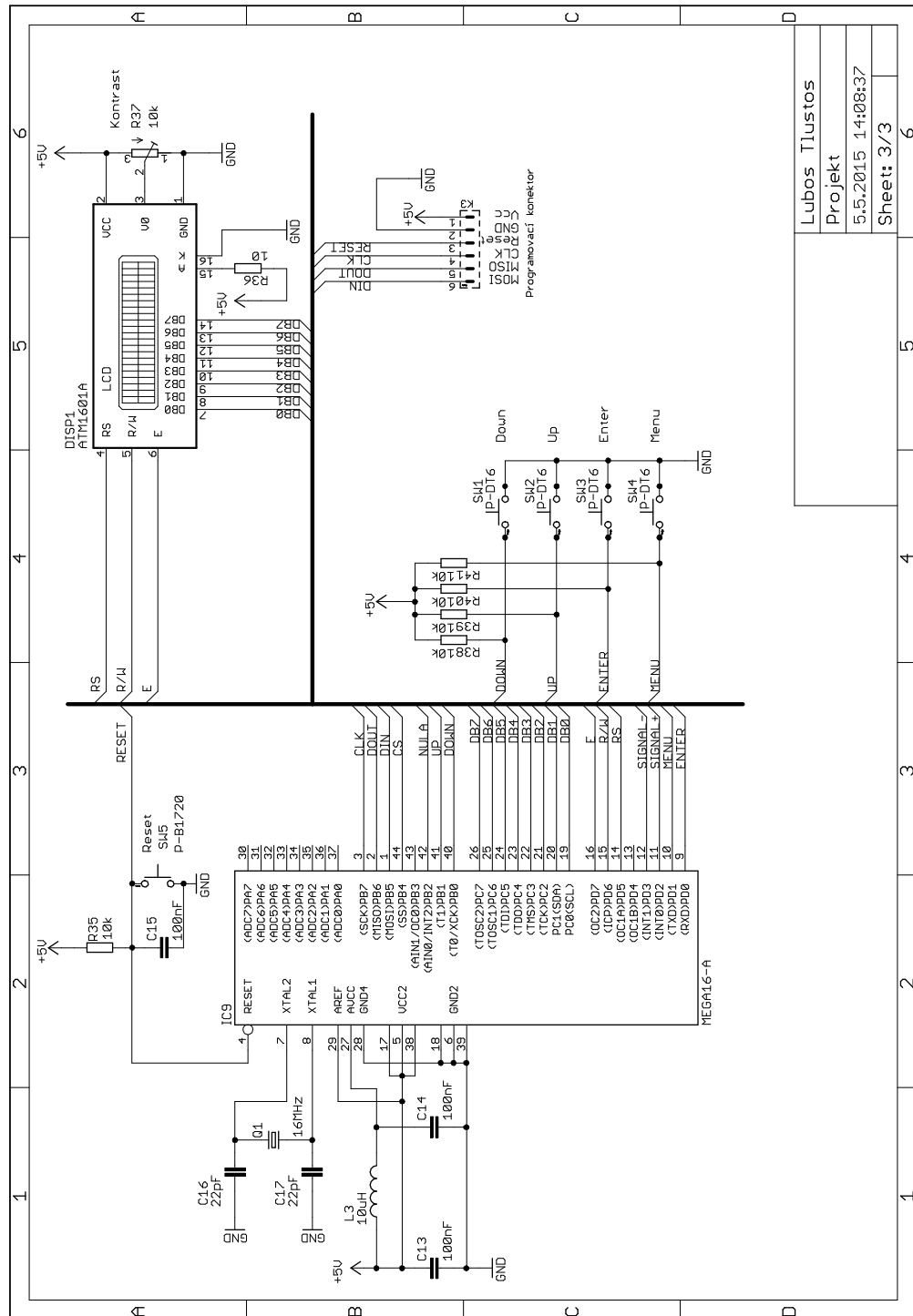
Lubos Tlustos	6
Projekt	5
5.5.2015 14:08:37	4
Sheet: 1/3	3
	2
	1

## A.2 Obvodové zapojení sinusového generátoru



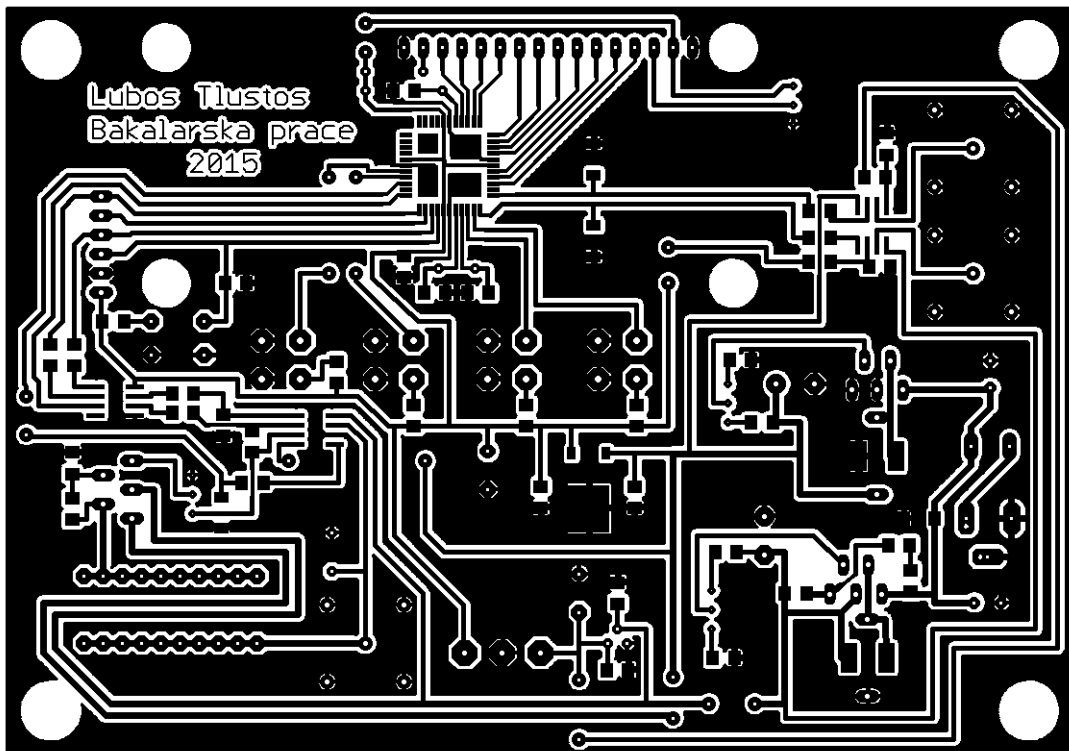
Lubos Tlustos  
 Projekt  
 5.5.2015 14:13:39  
 Sheet: 2/3

## A.3 Obvodové zapojení řídicí logiky



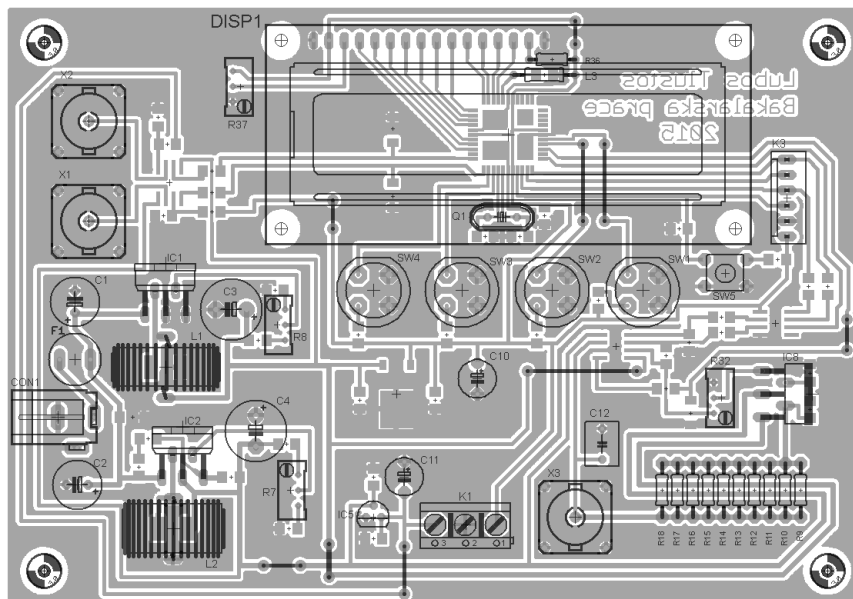
Lubos Tlustos
Projekt
5.5.2015 14:08:37
Sheet: 3/3

## A.4 Deska plošného spoje

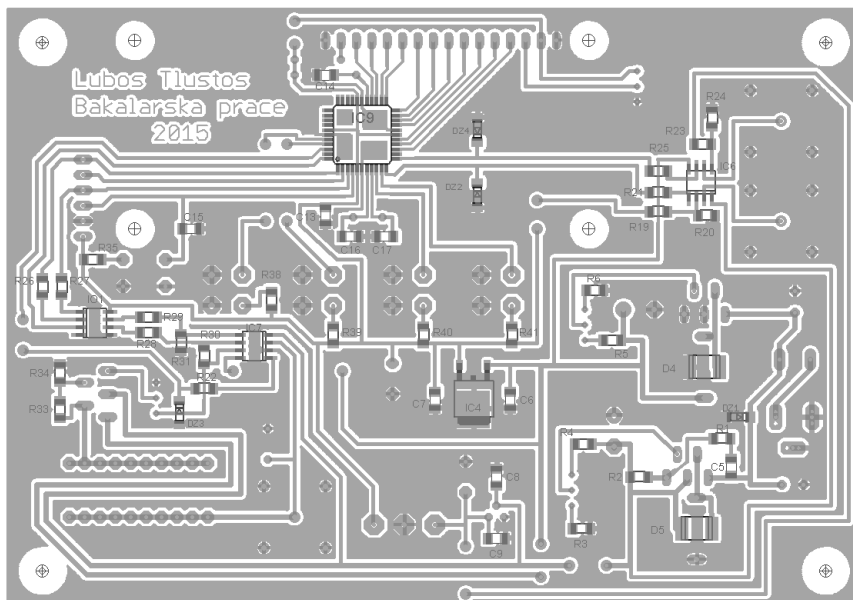


Měřítko 1:1

## A.5 Osazení desky plošného spoje – top (strana součástek)



## A.6 Osazení desky plošného spoje – bottom (strana spojů)



## B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1, C2	100uF/25V	E3.5-8	Elektrolytický kondenzátor s low ESR
C3	1000uF/16V	E5-10.5	Elektrolytický kondenzátor s low ESR
C4	1800uF/16V	E5-10.5	Elektrolytický kondenzátor s low ESR
C5, C6, C7, C8, C9, C13, C14, C15	100nF/50V	C1206	Keramický SMD kondenzátor
C10, C11	470uF/10V	E5-6	Elektrolytický kondenzátor
C12	3,3uF/50V	C050-055X075	Fóliový kondenzátor
C16, C17	22pF	C1206	Keramický SMD kondenzátor
DZ1, DZ2, DZ3, DZ4	D-BZV55C5.1	SOD-80	Zenerova dioda 5,1V 0.5W
D4, D5	1N5819SMD	MELF	Rychlá dioda 1A
IC1, IC2	LM2575T	TO220-5	Spínaný regulátor napětí
IC4	7805	TO252	Lineární regulátor napětí
IC5	79L05	TO92	Lineární regulátor napětí
IC6, IC7	TL072	SO08	Operační zesilovač
IC8	TDA2050	CB360	Audio koncový zesilovač
IC9	ATMEL ATmega16-A	TQFP44	Mikrokontrolér firmy Atmel
IO1	LTC1655	SO08	D/A převodník
R1, R2	47k $\Omega$	R1206	SMD odpor s tolerancí 1%
R3, R5	6.8k $\Omega$	R1206	SMD odpor s tolerancí 1%
R4, R6	1k $\Omega$	R1206	SMD odpor s tolerancí 1%
R7, R8	5k $\Omega$	RTRIM64W	Více otáčkový trimr
R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18,	510 $\Omega$	0207	Odpor s tolerancí 1%
R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R33, R34, R35, R38, R39, R40, R41	10k $\Omega$	R1206	SMD odpor s tolerancí 1%
R32	50k $\Omega$	RTRIM64W	Více otáčkový trimr
R36	10 $\Omega$	0207	Odpor s tolerancí 1%



Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R37	10k $\Omega$	RTRIM64W	Více otáčkový trimr
L1	330 $\mu$ H/1A	toroid	Tlumivka
L2	100 $\mu$ H/1A	toroid	Tlumivka
L3	10 $\mu$ H	toroid	Tlumivka
Q1	16MHz	HC49/S	Krystal
SW1, SW2, SW3, SW4	P-DT6	P-DT6	Tlačítkový spínač
SW5	P-B1720	P-B1720	Mikrospínač do DPS
DISP1	MC1601A		LCD displej
F1	1.5A	FUSE_TR5	Pojistka
K1	ARK500/3	ARK500/3	Svorkovnice
K3	PSH02-06P	PSH02-06P	Konektor se zámkem
X1, X2, X3	A1944-50	A1944	Koaxiální BNC konektor
CON1	PC-GK2.1	PC-GK2.1	Napájecí souosý konektor