

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Detekce a klasifikace kovových předmětů

Bc. Martin Sixta

Diplomová práce  
2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Sixta**  
Osobní číslo: **I10368**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**  
Název tématu: **Detekce a klasifikace kovových předmětů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Detektory kovů i přes pokrok v digitální technice zůstávají, alespoň u významnějších výrobců, držiteli tradičních (analogových) metod zpracování signálů. Většina používá digitální techniku spíše jen ke zobrazení výsledků a detektory používající ke zpracování mikroprocesory nebo dokonce DSP patří zatím k ojedinělým.

Úkolem diplomové práce je nastudovat a popsat metody detekce kovových předmětů s důrazem na metody umožňující klasifikaci detekovaných předmětů. Konečným cílem práce by měl být praktický návrh detektoru kovů.

Teoretická část práce bude obsahovat popis používaných principů detekce, omezení jednotlivých metod, rozlišovací schopnosti jednotlivých metod, principy zpracování a vyhodnocování signálů.

Praktická část práce se pak bude zabývat návrhem detektoru na zvoleném principu, signály by měly být, alespoň na rozhodovací úrovni vyhodnocovány digitálně, řídicí jednotka by měla být volena s ohledem na možnou budoucí optimalizaci algoritmů zpracování signálů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Hájek J.; Elektronické hledače; BEN 2002; ISBN 80-7300-011-3.**

**Wilhelm R.; Hledače kovů - teorie, návrh, stavba, použití; HEL 2003; ISBN 80-86167-20-8.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Pavel Rozsival**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2013**



L.S.

A handwritten signature in blue ink, belonging to prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan

A handwritten signature in blue ink, belonging to Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2012

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 16. 05. 2013

Martin Sixta

## **Poděkování**

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu práce, Ing. Pavlu Rozsivalovi, za poskytnuté odborné rady a připomínky k této práci. Dále bych chtěl poděkovat Aleši Drobnému a Janu Šramotovi za materiální pomoc a rady při vývoji hardwaru detektoru kovu. Děkuji také rodičům, kteří respektovali a trpělivě snášeli mé věčné zapojení do vytváření celé práce, a kteří mě velmi podporovali v mém dosavadním studiu.

## **Anotace**

Teoretická část pojednává o principech detekce kovů, popisuje některé běžně používaná zapojení detektorů kovu a shrnuje jejich možnosti, výhody a nevýhody v praxi. V praktické části je pak detailně popsán návrh analogové a digitální části detektoru kovu na zvoleném principu i se stručným popisem algoritmů pro detekci a klasifikaci hledaných předmětů a nakonec jsou v závěrečné části práce pomocí vytvořeného zařízení změřeny odezvy od různých známých předmětů.

## **Klíčová slova**

detekce, kov, materiál, vířivé proudy, amplituda, fáze, mikroprocesor

## **Title**

Detection and classification of metal objects

## **Annotation**

Theoretical part of this work discusses the principles of metal detection, describes several commonly used metal detector circuits and summarizes their abilities, advantages and disadvantages in real world applications. A detail description of design of the analog and digital part of a metal detector on chosen principle is provided in the experimental part of the work commonly with a short description of the detection and object recognition algorithms. Finally, the created device is used for measuring detector responses on various selected objects.

## **Keywords**

detection, metal, material, eddy currents, amplitude, phase, microprocessor

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>10</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Principy detekce kovů</b> .....	<b>12</b>
1.1 Absorpční detektory .....	18
1.2 Zážnějové detektory .....	20
1.3 Pulzně indukční detektory .....	21
1.4 Balanční detektory .....	22
1.5 Ostatní detektory .....	25
<b>2 Použitý hardware</b> .....	<b>26</b>
2.1 Napájecí zdroj.....	26
2.2 Analogová část .....	31
2.2.1 Výstupní obvody pro vysílací cívku .....	32
2.2.2 Vstupní obvody přijímací cívky .....	35
2.2.3 Výstupní obvody pro měření .....	36
2.3 Digitální část.....	37
2.3.1 Mikroprocesor .....	38
2.3.2 Komparátory .....	41
2.4 Uživatelské rozhraní .....	41
2.5 Realizace a konstrukční řešení .....	43
<b>3 Software</b> .....	<b>47</b>
3.1 Programování mikroprocesoru .....	47
3.2 Zpracování signálu .....	48
3.2.1 Kalibrace s použitím komparátoru .....	49
3.2.2 Odladění vlivu země.....	51
3.2.3 Detekce a klasifikace kovových předmětů - statický režim .....	52
3.2.4 Detekce a klasifikace kovových předmětů – pohybový režim .....	54
3.2.5 Zaměření předmětu.....	56
<b>4 Možné modifikace detektoru</b> .....	<b>57</b>

4.1	Vysokofrekvenční vzorkování.....	57
4.2	Kvadrurní demodulace.....	57
4.3	Softwarové nahrazení komparátorů.....	58
4.4	Vícefrekvenční buzení cívky .....	59
4.4.1	Vyhodnocení pomocí přepínání frekvencí .....	59
4.4.2	Vyhodnocení pomocí korelace .....	60
4.4.3	Vyhodnocení pomocí FFT algoritmu .....	61
<b>5</b>	<b>Naměřené parametry .....</b>	<b>63</b>
5.1	Hloubový dosah a klasifikace kovů.....	64
5.2	Citlivost hledací cívky .....	65
5.3	Vliv země, frekvence a průměru hledací cívky .....	67
	<b>Závěr .....</b>	<b>68</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>70</b>
	<b>Příloha A – Obsah CD.....</b>	<b>73</b>



## Seznam zkratek

A/D	Analog to Digital
BFO	Beat Frequency Oscillator
BOR	BrownOut Reset
CA-CFAR	Cell-Averaging Constant False Alarm Rate
CAN	Controller Area Network
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
CS	Chip Select
D/A	Digital to Analog
DFT	Discrete Fourier Transform
DMA	Direct Memory Access
DP	Dolní Propust
DSP	Digital Signal Processing
FFT	Fast Fourier Transform
FPU	Floating-Point Unit
IC	Input Capture
JTAG	Joint Test Action Group
LCD	Liquid Crystal Display
LiFePo <sub>4</sub>	Lithium Iron Phosphate
Li-ion	Lithium-Ion
Li-Pol	Lithium-Polymer
NF	Nízkofrekvenční
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMh	Nickel-Metal Hydride
OC	Output Capture
PLL	Phase-Locked Loop
POR,PDR	Power-On Reset, Power-Down Reset
PVD	Programmable Voltage Detector
PWM	Pulse Width Modulation
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RTC	Real-Time Clock
Rx	Receiver
SMD	Surface Mount Device
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SWD	Serial Wire Debug
Tx	Transmitter
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
VLF	Very Low Frequency

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vznik vířivých proudů a jejich magnetické pole [4] .....	13
Obrázek 2 - Superpozice magnetických polí [2] .....	13
Obrázek 3 - Hloubka průniku vířivých proudů [6].....	15
Obrázek 4 - Orientace předmětu v magnetickém poli [3] .....	16
Obrázek 5 – Deformace magnetického pole feromagnetickým materiálem (vlevo) a diamagnetickým materiálem (vpravo) [8] .....	17
Obrázek 6 - Princip funkce absorpčních detektorů [10].....	18
Obrázek 7 - Vliv impedance cívky na přítomnost kovu v jejím magnetickém poli [5] .....	19
Obrázek 8 - Princip funkce záznějových detektorů [3] .....	20
Obrázek 9 - Princip funkce pulzně indukčních detektorů .....	21
Obrázek 10 – Uspořádání cívek balančních detektorů [3] .....	22
Obrázek 11 - Vzájemná vazba prvků v balančních detektorech [3].....	23
Obrázek 12 - Princip funkce balančních detektorů [3].....	23
Obrázek 13 - Blokové schéma detektoru.....	26
Obrázek 14 - Akumulátory, zleva - LiPol, NiMh, Olověný akumulátor [31] .....	27
Obrázek 15 - Schéma zapojení DC-DC měniče LM27313 .....	27
Obrázek 16 - Schéma zapojení zdroje umělé země.....	28
Obrázek 17 - Schéma zapojení lineárních stabilizátorů .....	29
Obrázek 18 - Blokové schéma zdrojové části s jedním akumulátorem.....	29
Obrázek 19 - Blokové schéma zdrojové části s dvěma akumulátory .....	30
Obrázek 20 - Blokové schéma analogové části detektoru .....	31
Obrázek 21 - Schéma zapojení filtru typu dolní propust.....	32
Obrázek 22 - Schéma zapojení digitálních potenciometrů MCP4161 .....	33
Obrázek 23 - Schéma zapojení koncového zesilovače LM4755 .....	34
Obrázek 24 - Schéma zapojení vstupního zesilovače.....	35
Obrázek 25 - Schéma zapojení rozdílového zesilovače .....	36
Obrázek 26 - Schéma zapojení řízeného zesilovače.....	37
Obrázek 27 - Blokové schéma digitální části detektoru .....	38
Obrázek 28 - Schéma zapojení ½ komparátoru LM293D.....	41
Obrázek 29 - Blokové schéma připojení LCD .....	42
Obrázek 30 - Schéma zapojení koncového zesilovače signalizačního reproduktoru.....	43
Obrázek 31 – Analogová (vlevo) a digitální (vpravo) deska plošných spojů, Bottom .....	44
Obrázek 32 - Analogová (vlevo) a digitální (vpravo) deska plošných spojů, Top.....	44
Obrázek 33 - Testovací mechanická konstrukce detektoru kovu .....	45
Obrázek 34 – Použité hledací cívky, vpravo Ø 11cm, vlevo Ø26cm.....	46
Obrázek 35 – Vývojový diagram základní nekonečné smyčky .....	49
Obrázek 36 – Vývojový diagram kalibrace detektoru.....	51
Obrázek 37 - Vývojový diagram statického režimu.....	54
Obrázek 38 - Vývojový diagram pohybového režimu .....	55
Obrázek 39 - Blokové schéma kvadrurní demodulace .....	58
Obrázek 40 - Blokové schéma přepínání frekvencí.....	60

Obrázek 41 - Blokové schéma použití přizpůsobených filtrů .....	61
Obrázek 42 - Blokové schéma použití FFT .....	62
Obrázek 43 - Citlivost cívky pro železné kovy .....	66
Obrázek 44 - Citlivost cívky pro barevné kovy.....	66

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 - Měření mincí .....	64
Tabulka 2 - Měření drátů a závitů .....	65
Tabulka 3 - Vliv země v závislosti na frekvenci a průměru hledací cívky .....	67
Tabulka 4 - Vliv průměru hledací cívky a frekvence signálu na dosah .....	67

## Úvod

Detekce a klasifikace kovových předmětů je činnost zasahující do mnoha dnešních oborů. Využívá se například pro zvyšování bezpečnosti na letištích v podobě bezpečnostních rámců, při třídění nebo recyklaci materiálů, při vyhledávání nežádoucích předmětů v potravinách, při hledání podpovrchových vad kovových materiálů a mnohé další. Velký obor využití je i pro armádní účely hlavně při čištění území od min nebo nevybuchlého střeliva pomocí ručních podpovrchových detektorů kovu, používaných často i tzv. hledači pokladů. A právě poslednímu zmíněnému oboru se věnuje i tato práce.

Díky neúplným a roztříštěným informacím o základních principech funkce detektorů jsou v teoretické části této práce jednoduše shrnuty základní fyzikální principy hlavně v oblasti vířivých proudů, na kterých jsou tyto detektory převážně založeny, a zároveň popsány omezení, výhody a nevýhody vyplývající z těchto principů. V další části jsou představena běžně používaná analogová zapojení podpovrchových detektorů kovu. Větší část práce se pak zabývá návrhem balančního podpovrchového detektoru kovu, u kterého jsou v maximální míře využity digitální obvody a hlavně pak mikroprocesor s jádrem ARM Cortex M4. Následuje návrh základního softwarové vybavení detektoru s různými režimy detekce kovu a popis některých možných modifikací, které lze provést bez změny hardwaru detektoru. V rámci této práce byla vytvořena i jednoduchá mechanická konstrukce detektoru pro otestování v reálných venkovních podmínkách a byly provedeny různá srovnávací měření pro dvě testované hledací cívky, jejich výsledky zaznamenány do tabulek a vyhodnoceny v závěrečné části práce.

## 1 Principy detekce kovů

Většina dnešních detektorů kovu pracuje s magnetickým polem. Magnetické pole silově působí na všechny elektricky nabitě částice, které jsou vůči tomuto poli v pohybu. Toto je popsáno základními veličinami jako magnetická indukce, magnetický indukční tok a intenzita magnetického pole. Odvození těchto veličin je například v [1]. Magnetické pole lze rozdělit na stacionární a nestacionární. Stacionární magnetické pole je časově nezávislé (permanентní magnety), takže jeho magnetická indukce a indukční tok se v čase nemění. Nestacionární magnetické pole se v čase mění a provází ho jev zvaný elektromagnetická indukce, který objevil Michael Faraday v roce 1831. Tento jev je základem pro podpovrchové detektory kovu a je odvozený v [1].

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

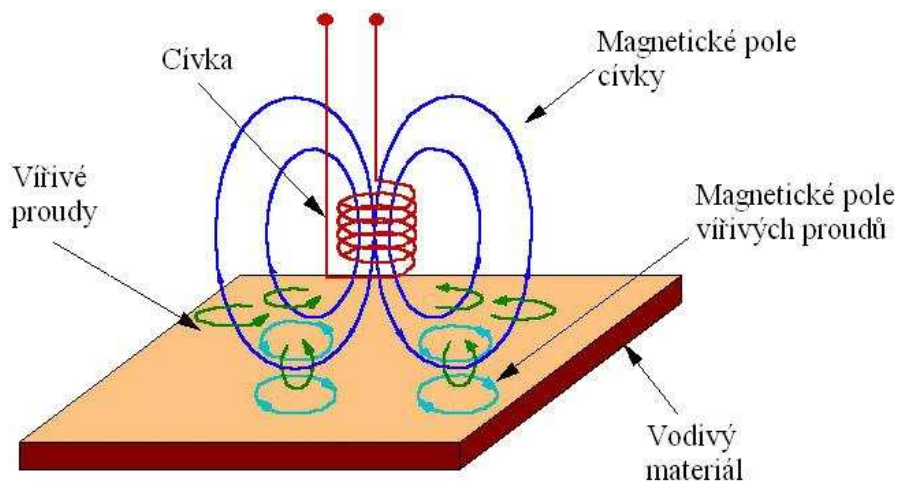
kde  $U_i$  - indukované napětí [V]

$\Phi$  - magnetický indukční tok [Wb]

$t$  - čas [s]

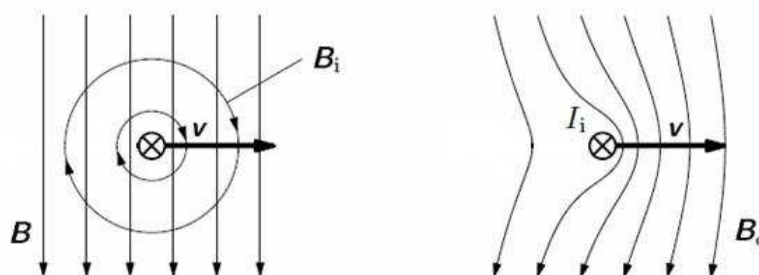
Ze vztahu je zřejmé, že pokud se bude v magnetickém poli v čase měnit magnetický indukční tok, bude se ve vodičích umístěných v tomto poli indukovat napětí. Změnu magnetického indukčního toku lze vyvolat změnou magnetické indukce a všech veličin, ze kterých je odvozena, nebo změnou plochy, kterou tato magnetická indukce prochází. Použití tohoto zákona u detektorů kovu je omezeno na změnu magnetické indukce, protože plocha (předmět pod povrchem), kterou procházejí siločáry magnetického pole, je konstantní.

Prostředek k vytváření časově proměnného magnetického pole je například vodič, kruhový závit nebo cívka, kterou prochází střídavý proud. Snahou je vytvořit magnetické pole co největší, a proto se používají cívky. Pokud se do tohoto magnetického pole dostane hledaný vodivý předmět, začne se v něm indukovat napětí. Jedná se ale většinou o plošný nebo objemový vodič, takže vzniklé napětí (elektrické pole) vyvolá v předmětu střídavé proudy tekoucí v uzavřených smyčkách (vírech) uvnitř kovu. Tyto proudy se nazývají vířivé proudy.



Obrázek 1 - Vznik vířivých proudů a jejich magnetické pole [4]

Magnetické pole generované budicí cívkou způsobí magnetický indukční tok, což má za následek indukci napětí v budicí cívce, které je ale opačného směru než napětí generující původní magnetické pole. V praxi se tato indukce projeví jako změna impedance budicí cívky. Pokud se v magnetickém poli cívky objeví plošný nebo objemový vodič a začnou se generovat vířivé proudy, je jejich magnetické pole orientováno opačně než budicí magnetické pole a tím se toto pole oslabí. Následkem toho se zmenší indukované napětí v budicí cívce a tím se zmenší i její impedance. Tento proces je vlastně jednoduchý popis zákona zachování energie v magnetickém poli (Lenzův zákon) a ve Faradayově indukčním zákonu je vyjádřen znaménkem minus. Jev, kdy vířivé proudy vytvářejí vlastní magnetické pole v budicím magnetickém poli, lze interpretovat i pomocí superpozice magnetických polí.



Obrázek 2 - Superpozice magnetických polí [2]

$$B_c = B + B_i$$

kde  $B_c$  - celková magnetická indukce [T]

$B$  - magnetická indukce prostředí s vodičem [T]

$B_i$  - magnetická indukce generovaná vodičem s proudem  $I_i$  [T]

Pro jednoduchost je sice na obrázku pouze vodič pohybující se rychlostí( $v$ ) v magnetickém poli ( $B$ ), ve kterém vzniká proud ( $I_1$ ) generující sekundární magnetické pole( $B_1$ ), ale ve skutečnosti bude superpozice probíhat u všech typů magnetických polí.

Pro detektory kovu je důležitá právě míra ovlivnění budicího magnetického pole, kterou lze vyjádřit pomocí ztrátového tepelného výkonu spotřebovaného v hledaném předmětu.

$$P_T \approx f^2 \cdot B^2 \Rightarrow I_1 \approx \frac{f^2 \cdot B^2}{U_1}$$

kde  $P_T$  - ztrátový tepelný výkon v materiálu způsobený vířivými proudy [W]

$f$  - frekvence budicího proudu [Hz]

$B$  - magnetická indukce budicího magnetického pole [T]

$I_1$  - indukované vířivé proudy [A]

$U_1$  - indukované napětí [V]

Ze vztahu vyplývá, že čím nižší bude indukované napětí v hledaném předmětu, tím větší vzniknou vířivé proudy. Pro detektory kovu to pak představuje lepší citlivost na dobře vodivé předměty, protože při stejně velké magnetické indukci se naindukují větší vířivé proudy, které jsou přímo úměrné velikosti sekundárního magnetického pole. Vodivost předmětu není dána pouze materiálem, ale zahrnuje i všechny nelinearity ve struktuře (např. podpovrchové vady), přes které vířivé proudy protékají. Menší citlivost na méně vodivé předměty se pak může vylepšit zvětšením magnetické indukce (zvětšením budicího proudu), nebo zvýšením frekvence budicího signálu.

Velikost magnetické indukce vytvářené budicí cívkou a současně tedy i velikost vířivých proudů indukovaných v hledaném předmětu je závislá i na vzdálenosti předmětu od budicí cívky. Pro jednoduchost lze odvodit vztah pro pokles magnetické indukce od kruhové smyčky. Základem pro výpočet je integrace Biotova-Savartova-Laplaceova zákona a předpoklad, že zkoumaný bod (předmět) bude ležet v ose kruhové smyčky.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

kde  $B$  - magnetická indukce v ose kruhové smyčky [T]

$\mu_0$  - permeabilita vakua [ $H \cdot m^{-1}$ ]

$I$  - proud procházející kruhovou smyčkou [A]

$R$  - poloměr kruhové smyčky [m]

$d$  - vzdálenost zkoumaného bodu od středu kruhové smyčky [m]

Podrobné odvození a vysvětlení tohoto vztahu je v [1]. Pro detektory kovu ve skutečnosti tento vztah přesně nepopisuje daný děj, protože se nepočítá s více závity na cívce a výsledek odpovídá hodnotě magnetické indukce v jednom bodu nad osou smyčky. Absolutní výsledek z uvedeného vztahu však není důležitý, ale je z něj dobře vidět, že magnetická indukce vyvolávající v hledaném předmětu vířivé proudy klesá se třetí mocninou vzdálenosti budící cívky od předmětu, což představuje značné fyzikální omezení hloubkového dosahu podpovrchových detektorů kovu pracujících na tomto principu. Této závislosti lze využít i pro orientační měření hloubky předmětů.

Jak již bylo uvedeno, pro podpovrchové detektory kovu je vždy důležitá velikost indukovaných vířivých proudů v plošném nebo objemovém vodiči (v hledaném předmětu). V případě objemového vodiče nedochází ke vzniku vířivých proudů jen na povrchu, ale v celém jeho objemu, kterým prochází magnetické pole budící cívky. Tomuto jevu se říká hloubka průniku a lze přibližně vyjádřit následujícím vztahem.

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}$$

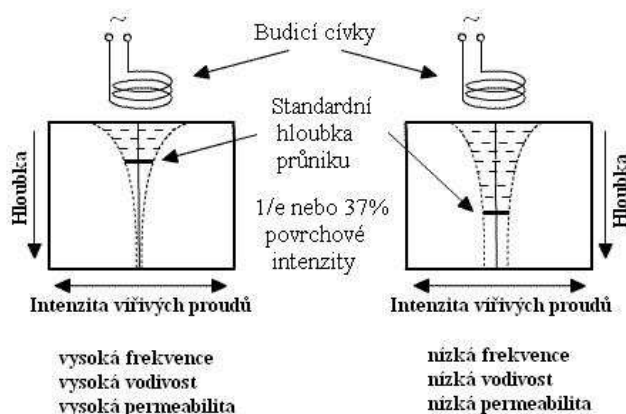
kde  $\delta$  - standardní hloubka průniku [mm]

$f$  - frekvence budícího signálu [Hz]

$\mu$  - celková magnetická permeabilita [ $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\sigma$  - měrná elektrická vodivost [ $\text{MS}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

Tento vztah lze lépe vysvětlit graficky podle obrázku.

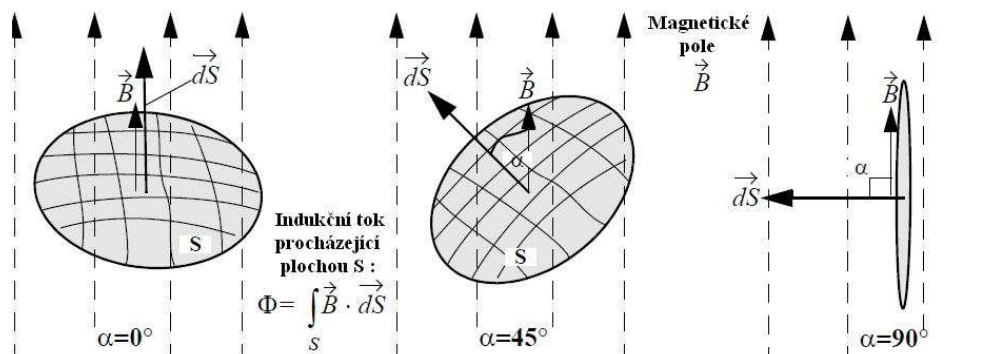


**Obrázek 3 - Hloubka průniku vířivých proudů [6]**

Standardní hloubka průniku je určena pro pokles povrchové intenzity vířivých proudů na 37%. Průběh poklesu amplitudy vířivých proudů, který způsobuje postupné slábnutí budícího magnetického pole (skinefekt) vlivem indukovaného magnetického pole vířivých proudů, je tedy nepřímo úměrně závislý na frekvenci, vodivosti a permeabilitě daného materiálu. Například při frekvenci 10kHz je pro ocel hloubka průniku v řádu desetin mm a pro materiály s menší permeabilitou, jako jsou hliník nebo měď, je hloubka



průniku v řádu jednotek mm. Z toho lze vyvodit závěr, že pro podpovrchový detektor je více důležitá plocha daného předmětu než jeho objem. Už ze základních definic veličin pro popis magnetického pole ale vyplývá, že touto plochou se rozumí velikost plochy vycházející z normálového vektoru ( $d\vec{S}$ ) plochy ( $S$ ) a jeho úhlu, který svírá s vektorem magnetické indukce ( $\vec{B}$ ), což je vyjádřeno na obrázku.

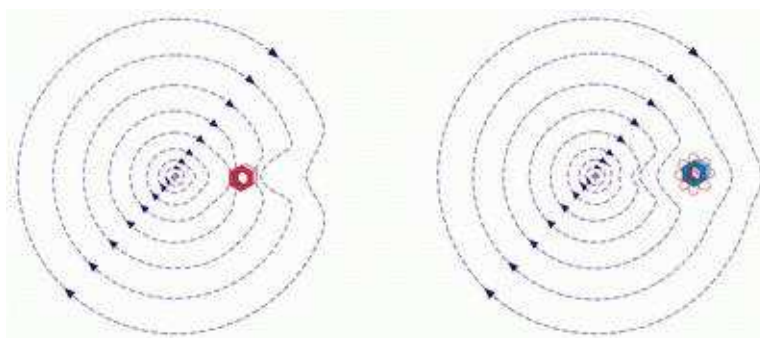


Obrázek 4 - Orientace předmětu v magnetickém poli [3]

Největší magnetický indukční tok (největší počet siločar) bude procházet předmětem, jehož normálový vektor plochy  $dS$  (kolmice na plochu  $S$ ) bude rovnoběžný se směrem vektoru magnetické indukce ( $\vec{B}$ ). Z výše uvedeného lze pak konstatovat, že odezva nebo schopnost podpovrchového detektoru kovu detekovat předmět, bude závislá na prostorovém natočení předmětu vůči budící cívce a pokud bude předmět natočen tak, že bude orientován velmi malou plochou ve směru magnetické indukce budící cívky, nebude předmět detekován vůbec. Toto je další velké fyzikální omezení podpovrchových detektorů pracujících na principu indukce vířivých proudů.

Podobný jev jako hloubka průniku vzniká u podpovrchových detektorů i v půdě, přes kterou proniká magnetické pole budící cívky. Každá půda obsahuje určité množství minerálů, jehož množství je dáno vznikem a podmínkami prostředí dané lokality (vyvěřeliny, váté písky apod.), které se v okolí hledací cívky detektoru projeví jako určitá vodivost dané půdy. Tyto minerály mohou obsahovat prvky všech kovů jako např. železo, hliník, zinek, měď, mangan, bór, molybden a další. Přesněji je tento jev popsán v [7]. Půdu v blízkém okolí hledací cívky si lze tedy představit jako jeden velký objemový vodič s určitou nenulovou susceptibilitou a vodivostí, která je vždy výrazně menší než vodivost hledaného předmětu. Nicméně i při malé vodivosti v půdě vznikají vířivé proudy, díky kterým magnetické pole budící cívky s rostoucí hloubkou průniku slábne. Tento jev se nazývá skinefekt půdy a negativně se projevuje na výsledném signálu. Některé detektory tento jev dokáží omezit, tzn. mají funkci s názvem potlačení vlivu země. Co se ovšem díky skinefektu omezit nedá, je fyzikální omezení citlivosti a hloubky dosahu detektoru, které je jako u hledaných předmětů ještě závislé na frekvenci budícího signálu a velikosti magnetické indukce.

Další významnou veličinou ovlivňující odezvu hledaného předmětu v podpovrchových detektorech kovu je magnetická susceptibilita materiálu ( $\kappa$ ). Jedná se o skalární bezrozměrnou veličinu, která popisuje vliv kovu na vnější magnetické pole. Pokud je u materiálu susceptibilita záporná a tento materiál je vložen do magnetického pole, je toto okolní pole uvnitř materiálu a v jeho okolí zeslabeno a pokud je kladná, je okolní pole zesíleno. Tato veličina je dána vnitřní strukturou předmětu a velikostí výsledného magnetického momentu předmětu bez přítomnosti vnějšího magnetického pole, což je podrobněji vysvětleno v [1]. To samé vyjadřuje i relativní permeabilita materiálu ( $\mu_r$ ), která je ale zavedena odlišně (výše je s její pomocí odvozena hloubka průniku vířivých proudů). Běžně ovšem tato vlastnost rozlišuje materiály do 3 skupin a to na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické materiály. Diamagnetické látky mají susceptibilitu zápornou (magnetické pole oslabují), paramagnetické a feromagnetické materiály mají susceptibilitu kladnou (magnetické pole zesilují). Oslabení a posílení (soustředění) magnetického pole je vyjádřeno na obrázku .



**Obrázek 5 – Deformace magnetického pole feromagnetickým materiálem (vlevo) a diamagnetickým materiálem (vpravo) [8]**

Diamagnetické a paramagnetické látky mají susceptibilitu blízkou 0, a proto je jejich vliv na deformaci vnějšího magnetického pole méně významný, než u látek feromagnetických. Odezva podpovrchových detektorů na předmět vyskytující se v magnetickém poli budicí cívky je tedy kombinací deformace budicího magnetického pole vlivem magnetické susceptibility předmětu a vzniklých vířivých proudů z budicího magnetického pole v předmětu, který vytváří vlastní sekundární magnetické pole. Výsledný tvar siločar celkového magnetického pole je tedy dán superpozicí popsanych dějů. Jinak řečeno je výsledek superpozice závislý na vodivosti a magnetické susceptibilitě hledaného předmětu.

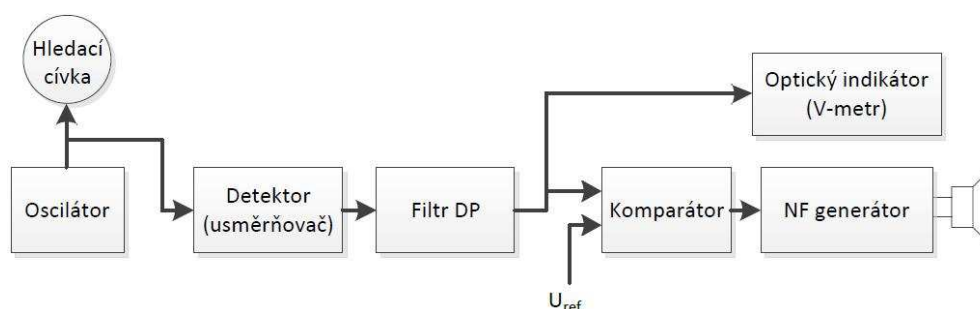
Aby se mohly v předmětech generovat vířivé proudy, je v detektorech kovu magnetické pole tvořeno cívkou buzenou střídavým proudem. Vířivé proudy, které vytvářejí sekundární magnetické pole, jsou také střídavé (časově proměnné), a proto lze obě tyto magnetická pole charakterizovat pomocí komplexního čísla nebo pomocí absolutní hodnoty a fáze. Toto vyjádření lze provést i u obou střídavých proudů. Dosud byla popisována pouze absolutní hodnota daných proudů (velikostí magnetických indukci),

ale fáze mezi těmito proudy je také důležitou veličinou pro klasifikaci kovů a je ovlivněna převážně výše popsanou magnetickou susceptibilitou. Pro příklad lze uvést mezní stavy při ovlivnění fáze měřeného signálu materiálem vloženým do budicího magnetického pole. První stav je vytvořen pomocí materiálu s nulovou vodivostí a velmi velkou magnetickou susceptibilitou, druhý pak pomocí materiálu s velkou vodivostí a nulovou magnetickou susceptibilitou. V prvním případě nedochází ke generování vířivých proudů a měřitelná odezva je dána pouze deformací siločar budicího magnetického pole, takže fáze měřené odezvy bude téměř stejná s fází budicího magnetického pole. Přesně naopak je tomu v druhém případě, kdy magnetické pole generované vířivými proudy jde podle Lenzova zákona proti poli, které ho vyvolalo (budicí), takže fáze měřené odezvy bude ovlivněna magnetickým polem s opačnou fází. V praxi se jedná vždy o kombinaci těchto dvou stavů a navíc je fáze ovlivňována i hloubkou průniku vířivých proudů, kde proudy generované pod povrchem jsou fázově zpožděné za proudy na povrchu a fáze výsledného pole je pak dána součtem všech proudů v materiálu. Tento jev je podrobněji definován v [9].

Z výše uvedeného je tedy zřejmé, že odezva (fáze a amplituda) signálu v detektorech kovu na různé předměty je závislá na vlastnostech daného předmětu jakými jsou tvar (plocha, objem), nelinearita a vady ve struktuře předmětu, prostorové natočení vůči budicí cívce, vzdálenost od budicí cívky, elektrická vodivost a magnetická susceptibilita.

## 1.1 Absorpční detektory

Absorpční detektory patří mezi nejjednodušší konstrukce podpovrchových detektorů kovu. Základem je oscilátor tvořený rezonančním obvodem, jehož součástí je i cívka detektoru. Díky průchodu proudu cívkou se generuje magnetické pole, které v hledaných předmětech vyvolává vířivé proudy. Blokové schéma detektoru je na obrázku.



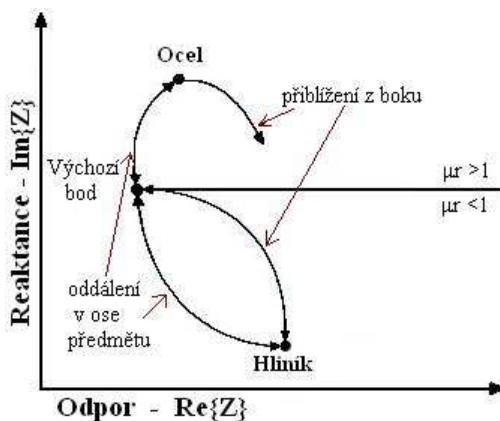
Obrázek 6 - Princip funkce absorpčních detektorů [10]

Podstatou absorpčních detektorů je absorpce energie vytvořené magnetickým polem budicí cívky v hledaném předmětu. Absorbovaná energie, která se v předmětu přemění na Joulovo teplo, je přímo úměrná velikosti vzniklých vířivých proudů a je odebírána z oscilátoru. Pokud se cívka rozloží pomocí náhradního schématu na ideální bezztrátovou cívku a reálný ztrátový odpor, tak tato energie způsobí právě zvyšování reálného odporu budicí cívky. Tento odpor ovlivňují i další složky jako například odpor

vodiče cívky, skinefekt vzniklý ve vodiči cívky, hysterezní ztráty v hledaném předmětu a další, ale v tomto případě je nejvíce ovlivněn díky vířivým proudům. Odpor je tedy součástí RLC obvodu a při jeho zvětšení se zmenší jakost cívky, což má za následek zmenšení amplitudy kmitů v rezonančním obvodu. Amplituda je vyhodnocována pomocí detektoru a filtru typu dolní propust. Její velikost je zobrazena většinou pomocí ručkového měřidla a při velkých změnách, které překročí hodnotu nastavenou v komparátoru, je pak vygenerován zvukový signál.

Pomocí absorpčního detektoru lze tedy změřit vodivost hledaného předmětu. Výsledek je ale ovlivněn negativními jevy jako tvarem předmětu apod., které jsou popsány v teoretickém popisu principu detekce kovů. Při přiblížení předmětu k budící cívce se kromě změny ztrátového odporu cívky mění i její indukčnost, takže s tím se pak mění i rezonanční kmitočet oscilátoru, který se zde ale nevyhodnocuje a nemá prakticky vliv na zobrazený výsledek. Na tomto principu ale pracují záznějové detektory popsané dále. V daném zapojení se neprovádí žádné rozlišení hledaného předmětu pomocí jeho permeability a ani to není v tomto případě možné. Permeabilita sice částečně ovlivňuje amplitudu díky zhuštění nebo rozptýlení siločar magnetického pole hledací cívky procházejícího hledaným předmětem, ale tento jev nelze od vodivosti předmětu rozlišit.

Existují ale značně zdokonalené principy absorpčních detektorů, provedené především digitálními obvody, které měří napětí a proud procházející budící cívkou a fázový posun mezi nimi a měří tak její impedanci.



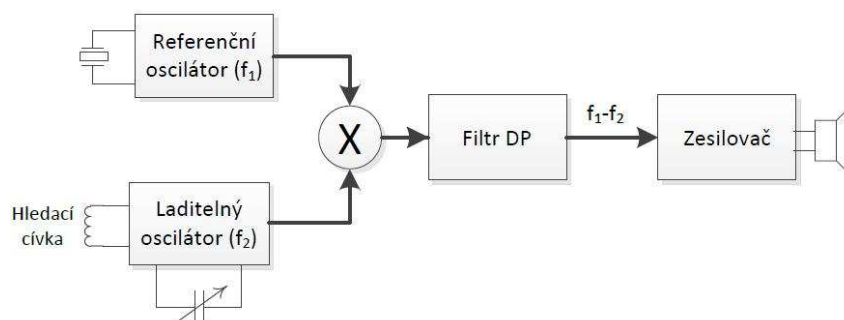
Obrázek 7 - Vliv impedance cívky na přítomnost kovu v jejím magnetickém poli [5]

V tomto případě je většinou cívka buzená oscilátorem s konstantní frekvencí a z naměřených výsledků je možné klasifikovat kov i podle jeho permeability. Reálnou část impedance ovlivňují ztráty v cívce (převážně ztráty vířivými proudy) a imaginární část pak permeabilita hledaného předmětu (změna indukčnosti cívky). Impedanci a tedy i obě její složky ovlivňují také negativní vlivy popsané v teoretickém popisu detekce kovů. Tento typ detektorů je svým výstupem velmi podobný dále popsaným balančním detektorům a

v praxi se nejvíce používá při nedestruktivním hledání povrchových a podpovrchových vad kovových předmětů (defektoskopie) v průmyslu, což je lépe vysvětleno v [12].

## 1.2 Zázňejové detektory

Tento typ detektoru, který je častěji nazýván jako BFO detektor, byl dříve velmi oblíbený pro svoji jednoduchou konstrukci, protože pro jeho vytvoření nejsou potřeba žádné digitální obvody. Detektory tohoto typu pracují na principu porovnávání dvou frekvencí harmonických signálů. První signál (referenční) je vygenerován pomocí pevného oscilátoru, druhý pak pomocí laditelného oscilátoru. Laditelný oscilátor je řešen většinou jako RLC rezonanční obvod, který kmitá na rezonanční frekvenci odpovídající hodnotám RLC prvků. Tento signál se spolu s referenčním přivede na nelineární prvek (násobičku), kde se na jeho výstupu mimo jiné objeví součtový a rozdílový kmitočet obou signálů, ze kterých se díky dolní propusti používá pouze rozdílový. Cílem je v klidovém stavu (bez přítomnosti kovu) nastavit na laditelném oscilátoru takový kmitočet, aby rozdíl frekvencí signálů za směšovačem byl nulový (nulový zázňej).



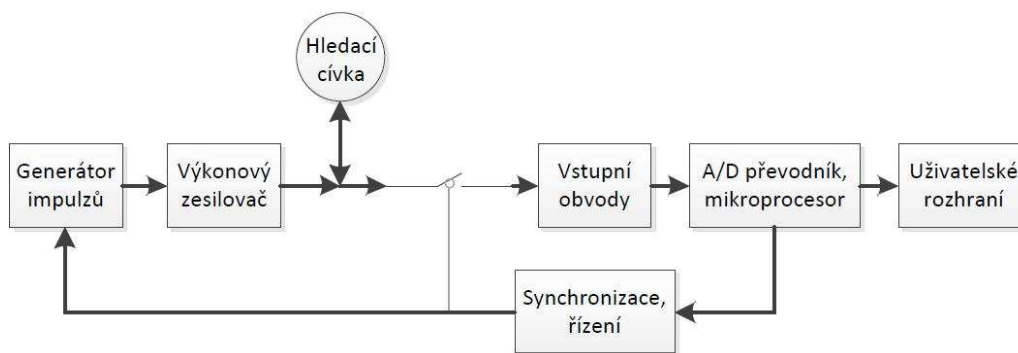
Obrázek 8 - Princip funkce zázňejových detektorů [3]

Při přiblížení kovu k cívce, kterou protéká střídavý proud, se v daném materiálu indukují vířivé proudy, ale také se zeslabí nebo posílí magnetické pole budící cívky podle permeability ( $\mu_r$ ) kovu. Z definice indukčnosti, která závisí na velikosti magnetického indukčního toku a proudu procházejícího cívku pak vyplývá, že se kov vložený do jejího magnetického pole chová jako jádro cívky, které se díky zeslabení nebo zesílení indukčního toku v materiálu projeví jako změna indukčnosti cívky. Tato změna způsobí, že laditelný oscilátor kmitá na jiné frekvenci a za směšovačem a dolní propustí se objeví nenulový signál s frekvencí odpovídající rozdílu frekvencí obou vstupních signálů. Rozdílový signál se zesílí a obsluha detektoru pak pomocí reproduktoru vyhodnotí nález kovu. Často je ovšem díky lepší citlivosti na malé změny tento výstup posunut do vyšších frekvencí, což se provádí nastavením nenulového rozdílu frekvencí obou oscilátorů v klidovém stavu.

Tento detektor detekuje nejlépe předměty s velkou relativní permeabilitou ( $\mu_r$ ), tzn. feromagnetické předměty, které nejvíce ovlivní indukčnost cívky. V praxi je ovšem cílem hledat spíše barevné kovy, které mají permeabilitu blízkou jedné a díky tomu magnetické pole cívky ovlivní jen velmi málo. Na diamagnetické a paramagnetické materiály má tedy tento typ detektoru malou citlivost, což se projeví v malém hloubkovém dosahu. Citlivost se dá vylepšit použitím cívky s větší indukčností, protože změna indukčnosti vlivem permeability bude větší, takže i změna rezonanční frekvence oscilátoru bude větší. Pokud se v klidovém stavu detektor nastaví na nenulový rozdílový kmitočet, je v principu možné rozlišení na kovy s  $\mu_r < 1$  a kovy s  $\mu_r > 1$ , protože u diamagnetických kovů ( $\mu_r < 1$ ) se bude indukčnost cívky snižovat a tím stoupat rezonanční frekvence oscilátoru a u paramagnetických a feromagnetických kovů opačně.

### 1.3 Pulzně indukční detektory

Stejně jako výše popsané typy detektorů i tento obsahuje pouze jednu cívku. Velkým rozdílem je ovšem buzení cívky, které neprobíhá harmonickým signálem, ale s pomocí vysokonapěťových pulzů. Tyto pulzy jsou vytvářeny samoindukcí. Pomocí generátoru impulzů tvořených většinou unipolárním tranzistorem a řídicí elektronikou je cívka připojena k napěťovému zdroji. Po odeznění přechodového děje protéká cívkou stejnosměrný proud daný napětím zdroje, odporem vinutí cívky a odporem spínacího tranzistoru. Pokud v této chvíli tranzistor rychle rozeprve, vznikne díky strmému poklesu proudu cívkou velká změna magnetického indukčního toku, což podle Faradayova indučního zákona bude znamenat indukování napěťového impulzu, který bude podle Lenzova zákona záporný vůči budicímu napětí připojeného na cívku. Napětí se bude ale indukovat i v předmětech ležících v magnetickém poli cívky, a tím vzniknou vířivé proudy. Až dosud byl vstupní měřicí obvod zablokovaný a aktivuje se právě tehdy, když odezní naindukovaný napěťový impulz v cívce. Vířivé proudy vyvolané v předmětu pak zpětně naindukují do cívky napětí, které se přičte k doznívajícímu přechodovému ději budicí cívky. Tento jev se projeví jako změna tvaru přechodového děje cívky, který následně zpracují vstupní obvody a řídicí mikroprocesor vyhodnotí.

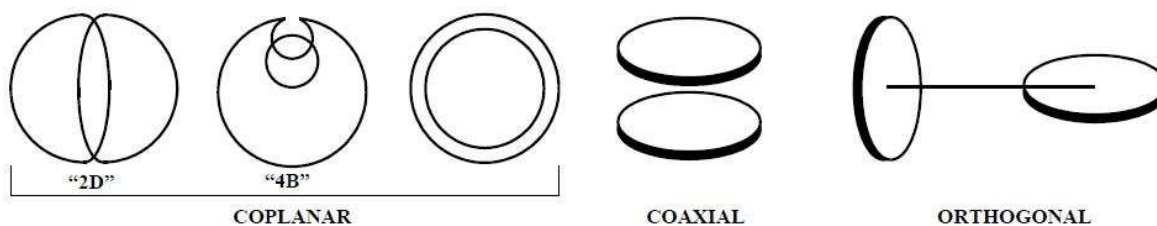


Obrázek 9 - Princip funkce pulzně indukčních detektorů

Pulzně indukční detektory se díky svému fyzikálnímu principu hodí nejlépe na hledání předmětů ve větších hloubkách. Velmi rychlá změna indukčního toku při rozepnutí budicího proudu totiž naindukují v předmětech větší vířivé proudy, než ve všech ostatních zde popisovaných principech detektorů. Citlivost lze dále vylepšit zvětšením proudu protékajícího cívkou a to zvětšením napětí napájecího zdroje, použitím cívky s menším sériovým odporem nebo použitím lepšího tranzistoru. Zvětšení počtu závitů cívky také vylepší citlivost a tím dosah detektoru, ale současně se díky zvětšení indukčnosti zvětší i indukované napětí v cívce. Maximum tohoto napětí (i indukčnost cívky) je pak omezeno průrazným napětím použitého tranzistoru. Detektor tedy nejlépe detekuje dobře vodivé předměty, ve kterých se vytvoří velké vířivé proudy. Rozlišení kovů je možné pouze podle vodivosti předmětu, ne podle jejich permeability. Větší vodivost předmětu více ovlivní přechodový děj cívky, nicméně velkou roli ve velikosti naindukovaných vířivých proudů, kromě vodivosti kovu, představuje i plocha předmětu, jeho vzálenost od cívky a nelinearity ve struktuře předmětu, jak bylo popsáno v teoretickém popisu principu detekce kovů, a proto je rozlišení kovů velmi nepřesné.

#### 1.4 Balanční detektory

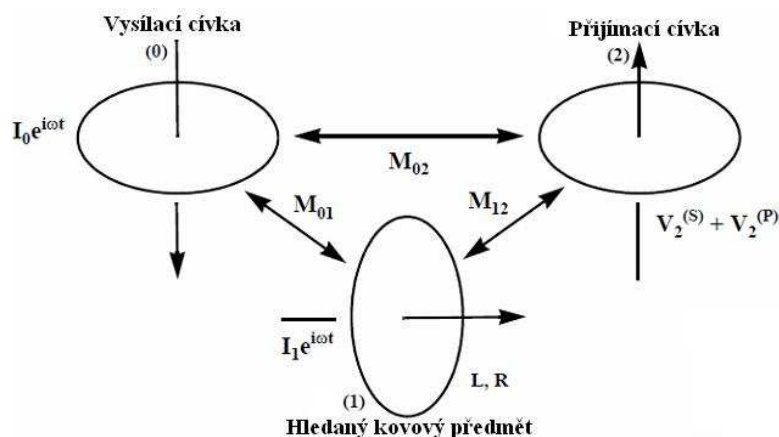
Balanční detektory obsahují vždy alespoň dvě cívky, jednu budicí (vysílací) a druhou přijímací. Podstatou balančních detektorů je takové prostorové uspořádání těchto cívek, které zajistí jejich co možná nejmenší nebo nejlépe nulovou vzájemnou vazbu (vzájemnou indukčnost), protože odezva od hledaných předmětů je většinou řádově slabší než je signál na vysílací cívce. Nejpoužívanější typy uspořádání jsou na obrázku.



Obrázek 10 – Uspořádání cívek balančních detektorů [3]

Každé uspořádání je vhodné pro jiný účel, ale pro běžné podpovrchové detektory se nejčastěji volí koplánární uspořádání (cívky v jedné rovině), u kterých je důležitá velikost průniku ploch obou cívek, ve kterém má soustava cívek největší citlivost. Například 2D cívka bude mít díky větší ploše průniku lepší citlivost, ale horší parametry pro přesné zaměření předmětu a u 4B cívky opačně. Pro vyšší hloubkové dosahy se volí ortogonální uspořádání, kde cívky dosahují v průměru desítky cm a často jsou vestavěny do velkých rámců (rámové cívky). Hloubkový dosah pak může v závislosti na velikosti předmětu dosahovat až jednotek metrů. Existují ale i jiná uspořádání cívek jako např. v [11].

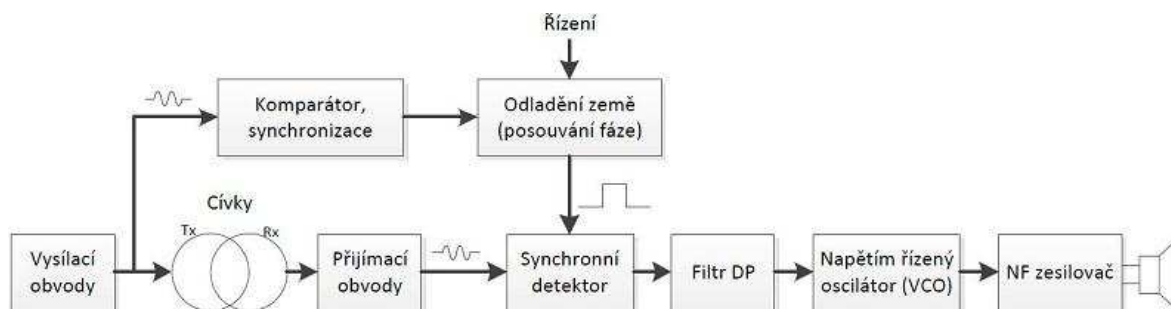
Soustava cívek s jejich vazbami používaná u balančních detektorů je znázorněna na obrázku.



Obrázek 11 - Vzájemná vazba prvků v balančních detektorech [3]

Vysílací cívka je buzena harmonickým signálem ( $I_0$ ) a vytváří časově proměnné magnetické pole. Přijímací cívka leží také v tomto magnetickém poli, ale díky uspořádání cívek je jejich vzájemná vazba ( $M_{02}$ ) ideálně nulová. Pokud se dostane hledaný předmět do magnetického pole vysílací cívky, naindukuje se v něm napětí a vzniknou vířivé proudy ( $I_1 e^{i\omega t}$ ). Tyto proudy generují vlastní magnetické pole, které přes vazbu ( $M_{12}$ ) indukuje sekundární napětí v přijímací cívce. V praxi ovšem vazba mezi cívkami ( $M_{02}$ ) není nikdy nulová, a proto se na přijímací cívce objeví ještě primární napětí indukované přímo z magnetického pole budící cívky. Tyto dvě napětí se na přijímací cívce sčítají a lze si je představit i jako imaginární a reálnou složku fázoru výsledného napětí na přijímací cívce. Vyhodnocovací obvody detektoru tedy měří amplitudu a fázi napětí na přijímací cívce. Tento princip je podrobněji popsán v teoretickém popisu principu detekce kovů.

Měření amplitudy a fáze signálu lze provádět mnoha způsoby. I v dnešní době je často toto vyhodnocení prováděno analogově jak je znázorněno na obrázku.



Obrázek 12 - Princip funkce balančních detektorů [3]

Vysílací cívku budí oscilátor, který kmitá na konstantní frekvenci. Od tohoto signálu jsou odvozeny všechny měřené fáze napětí na přijímací cívce. Hlavní částí pro detekci fáze je synchronní detektor, do kterého vstupují dva signály. Jeden signál představuje zesílené napětí přijímací cívky, a druhý pak obdélníkový signál se stejnou frekvencí, který detektor spouští. Podle konstrukce se může jednat o půlvlnný nebo celovlnný detektor. Za demodulátorem se tedy objeví pouze vybraná část napětí přijímací cívky. Filtr typu dolní propust tento signál vyhladí tak, že výsledkem je pak stejnosměrné



napětí, které se vyhodnocuje. Tento děj se opakuje každou periodu signálu. Pokud bude ovládací obdélníkový signál detektoru ve fázi s napětím na vysílací cívce a stejnosměrné napětí na výstupu dolní propusti nulové, bude fáze napětí přijímací cívky vůči vysílací posunutá o  $\pi/2$ . V praxi je většinou žádoucí testovat signál na předem dané fázové posuny, což se řeší více paralelními synchronními detektory, které jsou řízeny navzájem fázově posunutými obdélníkovými signály. Více detektorů pak řeší i problém nejednoznačnosti řešení, který by nastal s použitím pouze jednoho synchronního detektoru. Tyto typy detektorů kovu jsou často doplněny i o možnost odladění vlivu země, protože minerály obsažené v půdě mohou způsobit malý fázový posun signálu na přijímací cívce, který by pak při průchodu demodulátorem zkresloval výsledek vyhodnocení. To se provádí obvodem, který v určitém rozmezí dokáže fázově posouvat všechny řídicí obdélníkové signály synchronních detektorů.

Balanční detektory jsou nejvíce univerzální detektory ze všech zde uváděných principů. Zjednodušeně lze psát, že velikost vzniklých vířivých proudů v hledaném předmětu přímo ovlivňuje amplitudu signálu na přijímací cívce a permeabilita předmětu posouvá jeho fázi. Podle fáze lze tedy odlišit diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické kovy a podle amplitudy vodivost nalezeného kovu. V praxi se tyto dva jevy částečně kombinují, tzn. vodivost předmětu má vliv na fázi (sekundární magnetické pole má rozdílnou fázi vůči budicímu) a permeabilita na amplitudu (zvýšení nebo snížení počtu siločar procházejícími předmětem), což znesnadňuje klasifikaci kovů. Bohužel se i zde uplatňují všechny zákonitosti popsané v teoretickém popisu principu detekce kovů, protože například parametry jako vzdálenost předmětu od cívky nebo tvar nalezeného předmětu mají větší vliv na výslednou amplitudu než samotná vodivost kovu. Podobně pak bude ovlivňována i fáze signálu, nicméně negativní vlivy mají na fázi mnohem menší vliv, který se většinou uplatní až při velkých vzdálenostech předmětu od cívek. Pojem velká vzdálenost je ale pro každý případ jiný, vždy závisí na průměru cívek, tvaru a ploše hledaného předmětu. Proto se pro srovnávací účely často detektory testují na homogenním předmětu, u kterého odezva nezávisí na jeho tvaru nebo prostorovému natočení, například na kovové kouli. Odezvy detektoru, tzn. změny amplitudy a fáze při různých situacích jsou popsány v [3].

Frekvence budicího signálu balančních detektorů se většinou pohybuje v jednotkách kHz, a proto jsou často nazývány jako VLF detektory. Frekvence je sice přímo úměrná velikosti vířivých proudů v předmětu, ale z důvodu obsahu minerálů v půdě naopak klesá hloubkový dosah (skin efekt půdy), proto je nejlepším kompromisem použití těchto nízkých frekvencí. Tento nedostatek lze obejít více budicími signály, kde pak vysoké frekvence zajistí dobrou citlivost v půdách s malým obsahem minerálů nebo velkou odezvu (citlivost na malé předměty) v malých hloubkách a nízké frekvence pak značně vylepší hloubkový dosah i při větším skinefektu půdy. Citlivost lze dále vylepšit zvětšením proudu budicí cívky, což způsobí zvětšení magnetické indukce, která je pak přímo úměrná velikosti vířivých proudů. Vždy bude ale platit, že obsah minerálů v půdě bude negativně ovlivňovat hloubkový dosah i citlivost detektoru.

Analogové řízení a vyhodnocení signálu by u vícefrekvenčních detektorů bylo příliš složité, a proto se v dnešní době raději volí metody s použitím digitálních obvodů. Pak se například zapojení řeší s pomocí mikroprocesoru, který řídí nebo i generuje budicí signál, zároveň vzorkuje signál na přijímací cívce a následně vyhodnocuje. Řešení s digitálními obvody se ale používá i pro detektory s jedním budícím signálem, protože tyto obvody umožňují snadnou modifikaci funkce detektoru nebo zpracování signálu, což je dáno tím, že tyto vlastnosti detektoru jsou z velké části tvořeny programem v mikroprocesoru, který lze snadno změnit. Kvůli již zmíněné univerzálnosti balančních detektorů a větších možnostech při generování nebo zpracování signálu pomocí mikroprocesoru je praktická část této práce věnována právě tomuto způsobu detekování kovů.

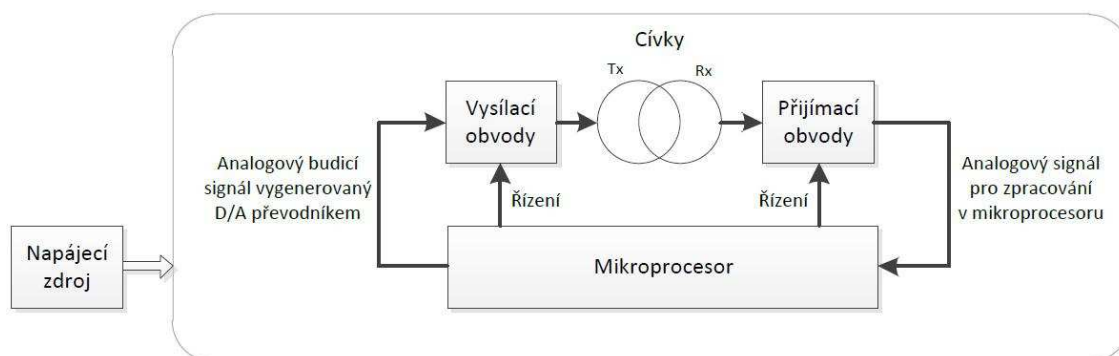
## 1.5 Ostatní detektory

Všechny zde dosud popisované principy detektorů kovu pracovaly s magnetickým polem budicí cívky detektoru a jeho vlivů na okolí. Existují ale i jiné principy používané v praxi. Jedním z nich je přístroj měřící velikost magnetických polí různých předmětů, který se nazývá magnetometr. Magnetometr pracuje na principu magnetorezistivního jevu, kde se u součástky tvořené určitým materiálem mění její odpor v závislosti na velikosti magnetického pole procházejícího součástkou. V detektorech kovu měří magnetometr magnetické pole země ale hlavně dokáže změřit jeho nelinearity, které vznikají díky kovům umístěným v tomto magnetickém poli. Magnetometry jsou tedy nejvíce citlivé na feromagnetické kovy, které způsobují největší deformaci magnetického pole země. Podrobné vysvětlení funkce je v [13], kde je sice zobrazen elektronický kompas, nicméně funkční princip je stejný a v praxi se bude lišit pouze zpracování signálu z magnetometru.

Dalším v praxi používaným zařízením na detekování kovů jsou půdní radary. Princip je v podstatě stejný jako u běžných radarů. Elektromagnetická vlna generovaná anténou radaru je ale v tomto případě směřována do země, což díky velké frekvenci vyslaného signálu způsobí velký útlum, který se projeví negativně na hloubkovém dosahu detektoru. Po vygenerování vyslaného signálu se aktivují přijímací obvody, které byly při vysílání zablokovány, a na anténě se pak objeví všechny odražené signály s různou intenzitou a různým časovým zpožděním. Odraz signálu ale vzniká na všech nelinearitách půdy, tzn. na všech změnách prostředí, které se ve směru šíření vlny vyskytly, takže kvalita půdního radaru velmi závisí na následném zpracování signálu. Tento princip detekce kovů je lépe popsán v [14].

## 2 Použitý hardware

Jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, bude dále proveden návrh balančního podpovrchového detektoru kovů s digitálním generováním a zpracováním signálu. Cílem bude tedy systém, který dokáže vygenerovat budicí signál pro vysílací cívku a zároveň zesílit signál pro přijímací cívku a následně vyhodnotit a případný nález kovu sdělit vhodným způsobem obsluze detektoru. Tento proces vystihuje následující blokové schéma.



Obrázek 13 - Blokové schéma detektoru

Dále tedy budou podrobně popsány jednotlivé části blokového schématu.

### 2.1 Napájecí zdroj

První důležitou částí detektoru je napájecí zdroj. Ještě před samotným návrhem je třeba připomenout některé zásadní omezení a požadavky kladené na tento zdroj v balančních detektorech kovů. Největším omezením napájecího zdroje je skutečnost, že celé zařízení bude přenositelné, a proto také napájeno z akumulátoru. Napájecí zdroj tedy musí mít co možná nejmenší hmotnost a co možná největší účinnost, aby vše vydrželo pracovat co nejdéle. Vysílací část bude tvořit převážně koncový stupeň pro buzení vysílací cívky, a protože cívka má konstantní impedanci, bude nutné dosáhnout pro co nejvyšší výkon co největšího napájecího napětí pro koncový stupeň. Zdroj také nesmí vytvářet žádné rušení, protože na přijímací cívce bude napětí maximálně v řádech mV, a to by tento signál znehodnotilo. Pro přijímací obvody je dále nutné co možná největší symetrické napájecí napětí, aby se vstupní zesilovač snadno nepřebudil při velkém nalezeném předmětu a zároveň bylo možné nastavit velké zesílení, které zvýší dosah detektoru pro malé předměty nebo předměty ve větších hloubkách. Další požadavek je pak ještě napájecí napětí pro mikroprocesor, symetricky rozdělené na dvě části pro vytvoření správné střední hodnoty vstupního analogového signálu pro A/D převodník v mikroprocesoru.

Volba typu akumulátoru vychází ze stejných požadavků a je tedy nutné zvolit z dostupných vyráběných typů s ohledem na hmotnost, napětí a velikost obsažené energie. Dosažení co nejlepších všech těchto parametrů se navzájem vylučuje, a proto bylo nutné zvolit kompromis. V dnešní době je pro tyto účely z provozního hlediska nejvýhodnější použít akumulátory typu Li-pol, Li-ion nebo LiFePO<sub>4</sub>, případně více těchto akumulátorů zapojených do série. Tyto články mají vysokou hustotu energie vzhledem k objemu, takže

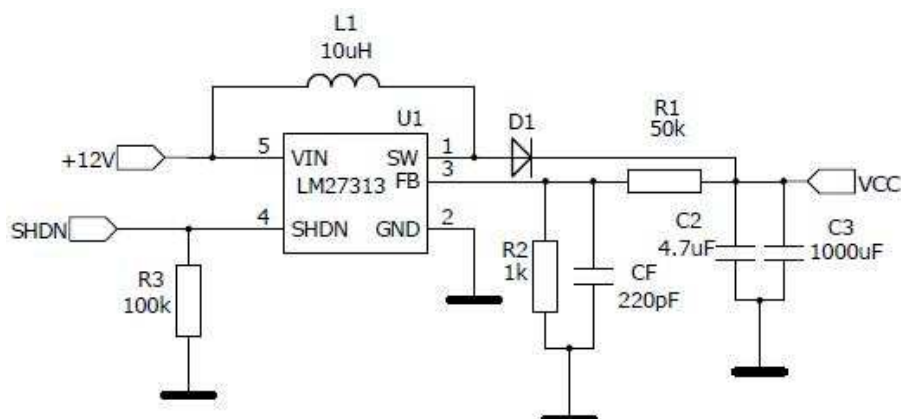
jejich další výhodou jsou i malé rozměry. Nevýhodou je pak jejich cena, která je ze všech typů akumulátorů největší. Opačné vlastnosti mají olověné akumulátory, u kterých je tedy největší výhodou cena vzhledem k jejich kapacitě, ale mají velké rozměry a hmotnost.



**Obrázek 14 - Akumulátory, zleva - LiPol, NiMh, Olověný akumulátor [31]**

Existují ale i jiné typy akumulátorů, které jsou svými parametry mezi těmito typy jako například NiCd nebo NiMh akumulátory. Tyto typy mají nevýhodu v nízkém napětí na jeden článek (1,2V), takže by jich muselo být použito větší množství spojených do série, což by mohlo způsobit problémy hlavně při jejich sériovém nabíjení, pokud by nebyly všechny články vybity stejným proudem. Ze všech zmíněných typů je pro navrhovaný detektor kovu nejlepším kompromisem právě akumulátory NiMh. Jak je ale vidět z popisu, tak žádný typ není bezchybný, a proto bude detektor navržen pro možné použití všech typů akumulátorů, jejichž vlastnosti budou omezeny minimální a maximální velikostí napětí. Kapacita pak ovlivní pouze možný čas provozu detektoru, jeho hmotnost a další parametry bude posuzovat každý uživatel sám.

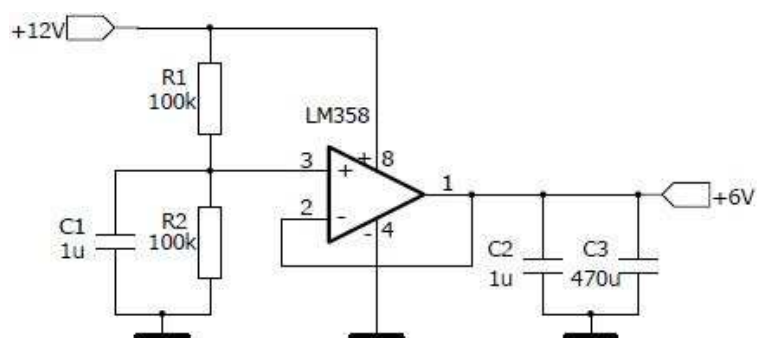
Pro napájení vysílacích obvodů je vhodné použít DC-DC měnič, který zajistí velké a navíc nastavitelné napájecí napětí koncového stupně bez ohledu na použitý akumulátor. Díky tomu je možné dosáhnout velkých výkonů a zároveň regulace citlivosti detektoru změnou amplitudy signálu za koncovým stupněm. To lze provést například obvodem LM27313 zapojeným podle katalogového listu [15].



**Obrázek 15 - Schéma zapojení DC-DC měniče LM27313**

Na vstup +12V je připojen olověný nebo jiný akumulátor. Výstupní napětí VCC je dáno odporovým děličem tvořeným rezistory R1 a R2. Zpětnovazební napětí tvořené tímto děličem je na pinu FB obvodu regulováno podle katalogového listu na hodnotu 1,23V. Proto je možné místo rezistoru R2 zapojit digitální potenciometr, kterým lze pak regulovat výstupní napětí od napájecího do 26V. Praktické testy ale ukázaly, že zvlnění výstupního napětí a hlavně spínací frekvence generovaná obvodem je zdrojem značného rušení pro všechny ostatní prvky na plošném spoji. Proto nakonec nebylo řešení s řízeným DC-DC měničem použito i když by bylo díky velké účinnosti a univerzálnosti ideální. Výstupní obvody budou tedy napájeny přímo z akumulátoru a nestabilizované napětí akumulátoru bude mít přímý vliv na výkon signálu ve vysílací cílce.

Přijímací obvody budou tvořeny převážně operačními zesilovači. Pro co největší možný zpracovávaný signál bez limitace těchto zesilovačů je dobré, stejně jako u výstupních obvodů, mít co největší napájecí napětí. Situace je stejná jako u výše zmíněných výstupních obvodů. Přijímací obvody budou tedy napájeny přímo z akumulátoru. Pro správnou funkci operačních zesilovačů je ale nutné použít symetrické napájení. Je sice možné použít alespoň dva akumulátory zapojené do série, které by toto symetrické napájení zajistily, ale pro univerzálnost např. při použití pouze jednoho olověného akumulátoru bylo zvoleno řešení s vytvořením umělé země pomocí sledovače napětí, který je na obrázku.

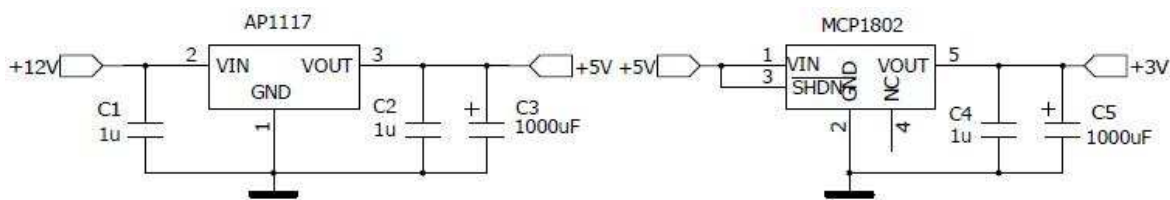


Obrázek 16 - Schéma zapojení zdroje umělé země

Je to klasické zapojení sledovače napětí s operačním zesilovačem, kde je výsledné napětí dáno hodnotami rezistorů R1 a R2. Obvod tedy udržuje výstupní napětí podle odporového děliče a zesiluje proud, který je možné odebírat z odporového děliče bez poklesu napětí. Výstupní proud je daný použitým operačním zesilovačem a pro běžné typy jako je LM358 a jiné se pohybuje v jednotkách mA [16]. Stabilita výstupního napětí je dána tolerancemi rezistorů a výstupním odporem operačního zesilovače. Kondenzátory jsou v obvodu pro omezení zvlnění výstupního napětí. Pokud jsou hodnoty rezistorů stejné, tak je výstupní napětí poloviční než vstupní a právě tento případ je ve zdrojové části několikrát použit. Vstupní (ale i jiné) obvody pracující se signálem z přijímací cívky mají tedy záporné napájecí napětí na záporné svorce akumulátoru, kladné napětí na kladné svorce akumulátoru a zem vytvořenou tímto obvodem. Zpracovávaný vstupní signál bude

mít střední hodnotu na úrovni danou výstupem z tohoto obvodu, což je poloviční napětí na akumulátoru.

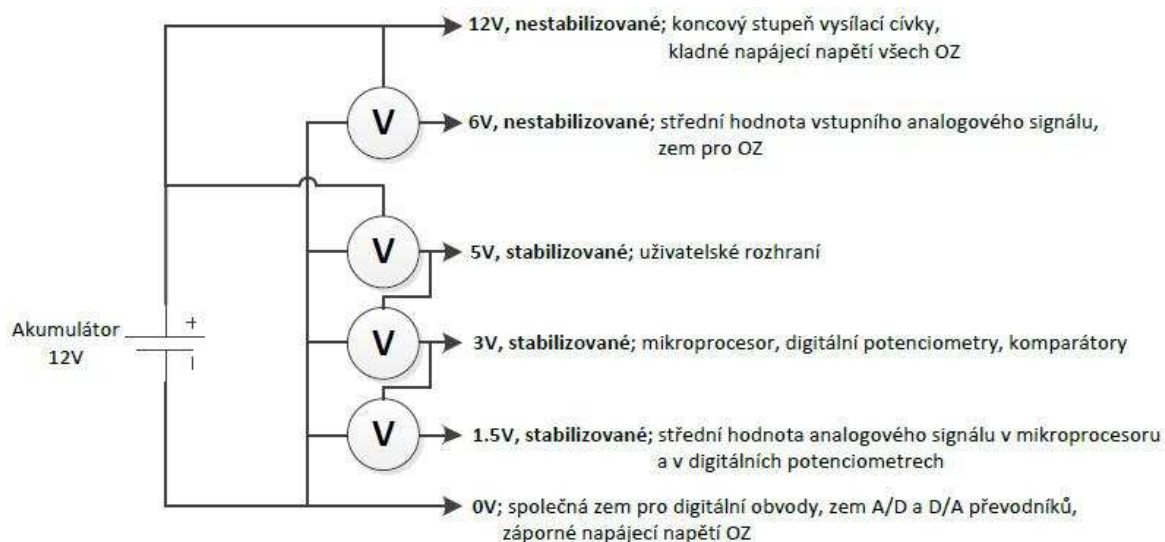
Napájení digitálních obvodů a uživatelského rozhraní je řešeno pomocí lineárních stabilizátorů. Toto řešení má sice horší účinnost, která se snižuje s roustoucím napětím použitého akumulátoru, ale nezpůsobuje žádné rušení. Pro mikroprocesor a ostatní digitální obvody je vytvořeno napětí 3V a pro uživatelské rozhraní (LCD) 5V. Jedná se o klasické zapojení stabilizátorů AP1117 a MCP1802 podle jejich katalogových listů [17] a [18].



Obrázek 17 - Schéma zapojení lineárních stabilizátorů

Ze stabilizovaného napájecího napětí pro mikroprocesor je dále výše popsaným sledovačem vytvořena umělá zem na úrovni +1,5V od záporné svorky akumulátoru, která slouží pro úpravu střední hodnoty signálu vzorkovaného A/D převodníkem, protože tento převodník má společnou zem se zemí mikroprocesoru. Stabilizované napětí 3V a jeho umělá zem (+1,5V) je potřeba i pro některé analogové obvody, takže pro tyto obvody je použit druhý stabilizátor MCP1802 ve stejném zapojení.

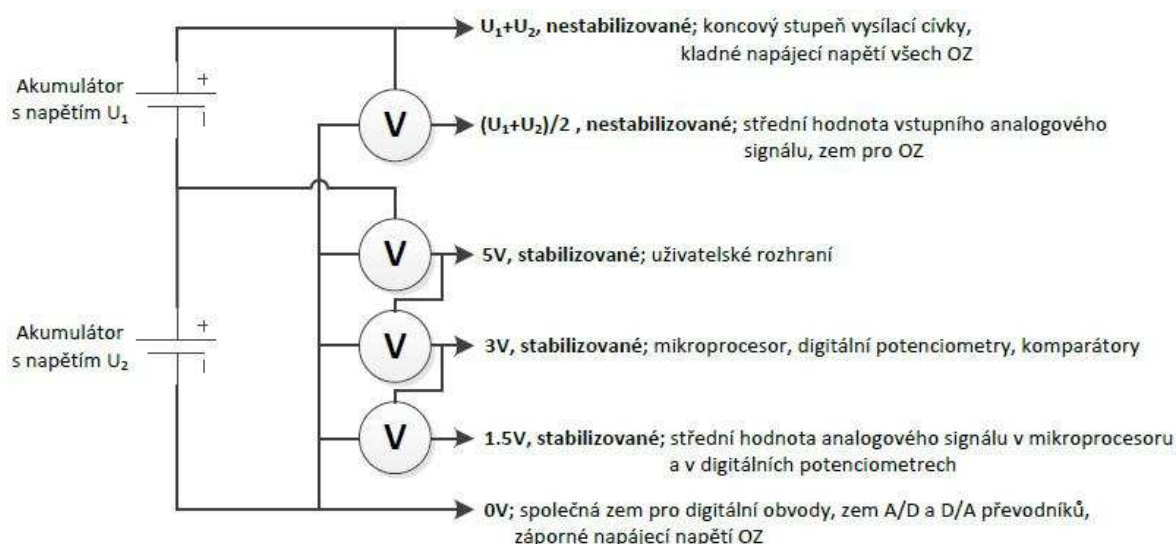
Je tedy použito větší množství napájecích napětí, takže pro přehlednost jsou tato napětí a jejich použití znázorněna na obrázku. Napětí jsou odvozena od 12V olověného akumulátoru.



Obrázek 18 - Blokové schéma zdrojové části s jedním akumulátorem

Je tedy zřejmé, že je možné použít jakýkoliv akumulátor (případně více akumulátorů do série), které jsou omezeny minimálním a maximálním napětím daným

napájenými obvody. Touto zdrojovou částí je také zajištěno, že při použití více akumulátorů do série (Li-Pol atd.) budou všechny články vybíjeny stejným proudem, a bude tak možné jejich sériové nabíjení. Tato vlastnost ale způsobuje horší účinnost u lineárního stabilizátoru AP1117 a zároveň je díky použitým lineárním stabilizátorům značně omezeno maximální napětí akumulátoru. Stabilizátor MCP1802 má totiž maximální vstupní napětí 12V, a stabilizátor AP1117 má toto napětí maximálně 18V. Proto jsou oba použité stabilizátory MCP1802 napájeny až z výstupu stabilizátoru AP1117. Maximální možné napájecí napětí je tedy shora omezeno na 18V, což umožňuje použít jeden 12V olověný akumulátor, až 12 NiCd nebo NiMh akumulátorů do série, případně až 4 sériově spojené akumulátory LiPol. Aby bylo možné použít i větší napájecí napětí, lze jednoduchým přepojením rozdělit zdrojovou část pro použití dvou akumulátorů, jak je vidět na následujícím blokovém schématu.



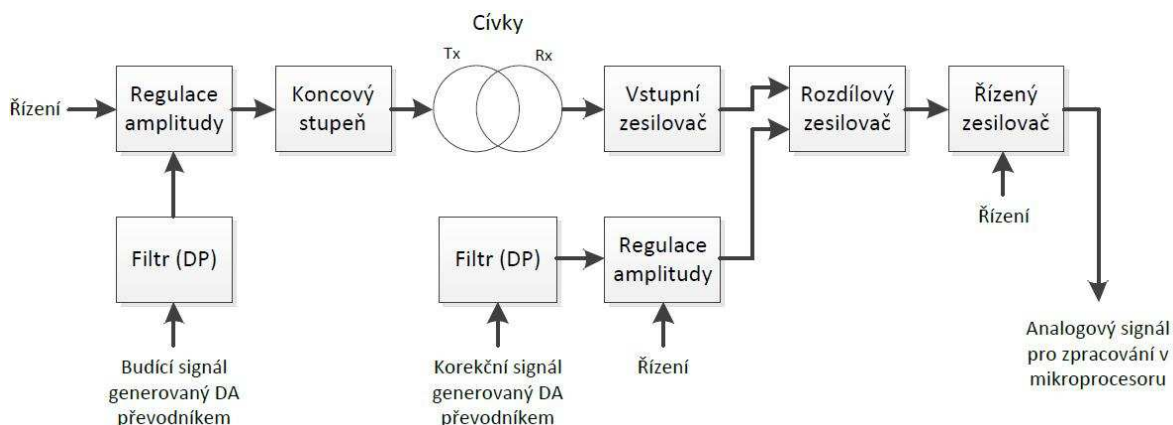
Obrázek 19 - Blokové schéma zdrojové části s dvěma akumulátory

Druhý akumulátor s napětím  $U_2$  je shora omezen jako v předchozím případě maximálním vstupním napětím stabilizátoru AP1117 na 18V. Protože se jedná o nízkoúbytkový stabilizátor, je v tomto zapojení vhodné zvolit napětí  $U_2$  kolem 6V, což zajistí malou výkonovou ztrátu na stabilizátoru. Vhodné je tedy použití 6V olověného akumulátoru, 5 sériově spojených NiCd, NiMh akumulátorů, nebo 2 LiPol akumulátory v sériovém zapojení. Napětí  $U_1$  je pak možné volit mnohem vyšší. Toto napětí je omezeno hlavně maximálním možným napájecím napětím vstupních operačních zesilovačů, které budou dále popsány. Napětí pro koncový stupeň a vstupní operační zesilovače nesmí překročit vzhledem k zemi (0V) 36V, takže pokud by byl akumulátor  $U_2$  složen s pomocí jednoho výše uvedeného příkladu, bylo by možné pro zdroj s napětím  $U_1$  použít až dva sériově zapojené 12V olověné akumulátory, až 19 sériově spojených NiCd, NiMh akumulátorů, nebo až 4 LiPol články v sériovém zapojení. V tomto zapojení zdrojů bude akumulátor s napětím  $U_2$  vybíjen větším proudem, a proto bude pro co nejdelší výdrž detektoru nutné volit tento akumulátor s vyšší kapacitou než akumulátor s napětím  $U_1$ . Sériové nabíjení jednou nabíječkou není možné, a proto má tento způsob zapojení zdrojové

části nevýhodu ve složitější konstrukci případné zdvojené nabíječky. V dalším popisu návrhu detektoru kovu bude pro jednoduchost velikost všech napětí odvozena od jednoho olověného akumulátoru, jako je to uvedeno v prvním blokovém schématu zdrojové části.

## 2.2 Analogová část

Do analogové části lze zařadit všechny obvody, do kterých vstupuje spojitý analogový signál a zároveň je také jejich výstupním signálem. Celá analogová část detektoru je znázorněna na obrázku.



Obrázek 20 - Blokové schéma analogové části detektoru

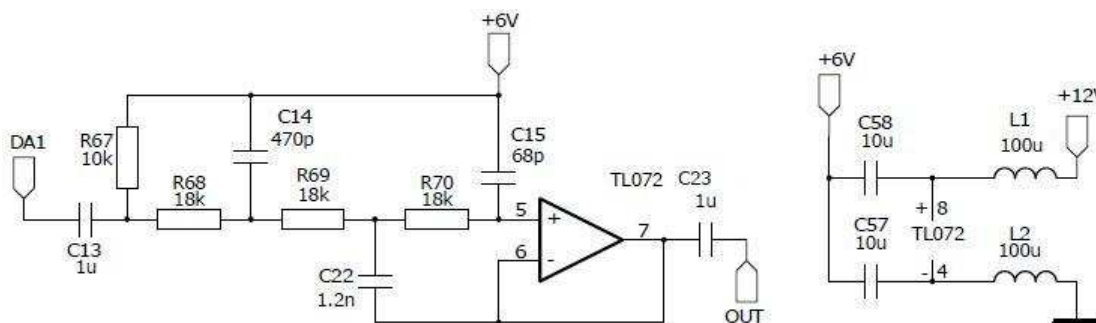
Vytvořený budicí signál se nejprve upraví ve filtru typu dolní propust, kde se odstraní většina nežádoucích kmitočtů vytvořená strmými hranami na D/A převodníku. Aby bylo možné programově regulovat výkon signálu v budicí cívce, je zařazen i regulátor amplitudy, což je řízený odporový dělič vytvořený digitálním potenciometrem. Následuje výkonový zesilovač, na který je připojena vysílací cívka. Tyto obvody budou dále nazývány jako výstupní obvody pro vysílací cívku.

Obvody pro přímé zesílení vstupního signálu budou dále nazývány jako vstupní obvody přijímací cívky. Ty tvoří pouze vstupní rozdílový zesilovač, na který jsou připojeny oba vývody přijímací cívky. Další bloky pak lze zařadit mezi výstupní obvody pro měření, které tvoří rozdílový a řízený zesilovač. Rozdílový zesilovač je v detektoru pro možnost odečtení zbytkového nežádoucího signálu na přijímací cívce daného nenulovou vzájemnou vazbou mezi cívkami. Do tohoto zesilovače vstupuje korekční signál vygenerovaný dalším D/A převodníkem, který prochází dolní propustí a digitálním potenciometrem stejně jako u budicího signálu. Posledním blokem je řízený zesilovač, který dále zesiluje ideálně už pouze žádaný signál s požadovanou informací.



### 2.2.1 Výstupní obvody pro vysílací cívku

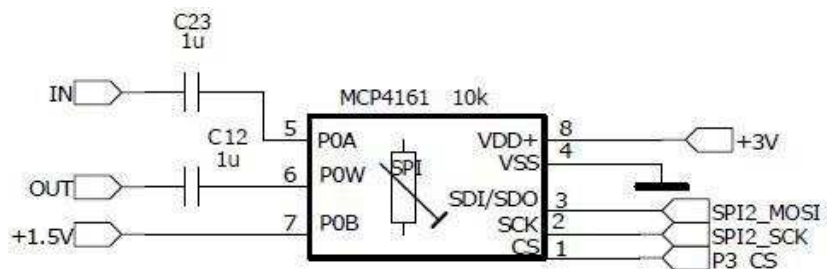
Prvním blokem, přes který prochází budicí signál vygenerovaný D/A převodníkem, je filtr typu dolní propust. Tento filtr odstraňuje velmi strmé přechody při změnách výstupního napětí D/A převodníku. Jedná se o aktivní dolní propust třetího řádu typu Butterworth zapojenou podle následujícího schématu.



Obrázek 21 - Schéma zapojení filtru typu dolní propust

Zapojení a vzorce, podle kterých byly vypočteny hodnoty součástek, jsou převzaty z [19]. Se součástkami na schématu má tato dolní propust zlomový kmitočet kolem 26kHz, což zajistí dostatečný rozsah použitelných frekvencí pro balanční detektor. Tento kmitočet, ale i ostatní vlastnosti vypočítaného filtru, je pouze přibližný díky zaokrouhlení hodnot vypočítaných součástek (kondenzátorů) k běžně vyráběným řadám. Důležitou vlastností je nezvlněné propustné pásmo, díky kterému se na žádném používaném kmitočtu nemůže přebudit následující člen. Vlastnosti vyplývající z fázové charakteristiky nejsou pro tento případ důležité, protože rozdílný fázový posun různých frekvencí procházející přes filtr lze řešit pomocí programu v mikroprocesoru. I při použití filtru typu Bessel by se musel tento jev řešit programově, protože signál prochází také přes další prvky v obvodu, které všechny vykazují stejný jev. Použitý filtr je svou strmostí a všemi dalšími parametry pro tuto práci dostatečný. Do zapojení byl přidán kondenzátor C13 a rezistor R67 na oddělení rozdílných stejnosměrných úrovní (+1,5V a +6V). Rezistor R67 byl zvolen s ohledem na výstupní odpor D/A převodníku, protože tento odpor nejvíce snižuje vstupní odpor celého filtru. Kondenzátory C13 a C23 pro oddělení stejnosměrných úrovní mají dostatečně velkou kapacitu vzhledem k používaným frekvencím, a proto lze zanedbat jejich vliv na tento filtr. Jako aktivní prvek byl použit běžný operační zesilovač TL072 popsáný v [20], napájený přes LC filtry pro co největší omezení šumu přenášeného přes napájení obvodu.

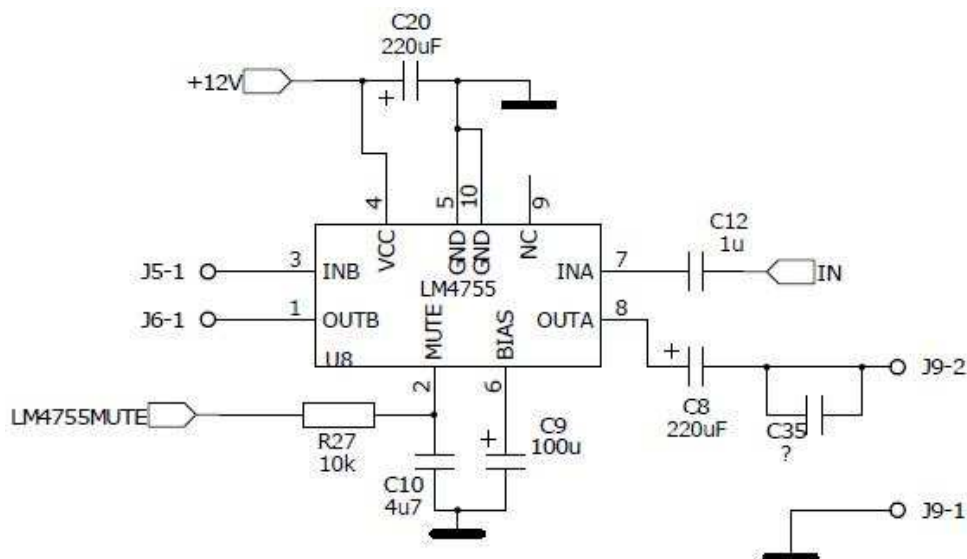
Dalším blokem, který upravuje budicí signál je odporový dělič, což je vlastně pasivní regulátor amplitudy. Je tvořen pouze digitálním potencioemetrem MCP4161 podrobně popsáném v katalogovém listu [21], který je zapojen podle následujícího schématu.



Obrázek 22 - Schéma zapojení digitálních potenciometrů MCP4161

Potenciometr je řízen mikroprocesorem pomocí SPI sběrnice a signálu CS, který zapíná sběrnici v daném potenciometru. Kvůli řízení přes sběrnici musí mít potenciometr společnou zem a stejné napěťové úrovně na sběrnici jako jsou v mikroprocesoru, a proto má napájecí napětí +3V. Velikost napájecího napětí ale u digitálních potenciometrů přímo ovlivňuje maximální i minimální možné napětí na analogových vstupech. Proto je vstup i výstup stejnosměrně oddělen kondenzátory C23 a C12. Zároveň je pomocí vnitřního celkového odporu potenciometru (10k) nastavena klidová střední hodnota signálu za kondenzátorem C23 na hodnotu +1,5V. Na tento vstup nesmí přijít signál s amplitudou větší než 1,5V, jinak by potenciometr tento signál zkreslil. Toto je zajištěno regulací amplitudy při generování signálu v D/A převodníku.

Posledním prvkem, přes který prochází signál pro vysílací cívku, je koncový stupeň. Jedná se o výkonový zesilovač, který zesiluje napěťově i proudově daný signál a umožňuje tak připojit nízkoimpedanční zátěž. Vysílací cívka je tvořena většinou několika desítkami závitů měděného drátu, což představuje pro koncový stupeň odpor v řádu jednotek ohmů. Vlastností každé cívky je kromě reálného odporu i její reaktance, která je přímo úměrná indukčnosti cívky a frekvenci signálu. U balančních detektorů se mohou používat i cívky s průměrem v desítkách cm, což indukčnost a následně i impedanci značně zvětšuje. Proto je důležité pro dosažení co největšího výkonu signálu mít co možná největší napájecí napětí, které pak zajistí velkou amplitudu výstupního signálu a tím i velký výkon. Dalším důležitým prvkem je účinnost koncového stupně, protože buzení cívky bude představovat značnou část proudového odběru z akumulátoru, a jakákoliv výkonová ztráta, která se přemění na teplo, je nežádoucí. Kvůli těmto vlastnostem je pro tuto aplikaci vhodný koncový stupeň ve třídě D. Tyto zesilovače vynikají vysokou účinností, a zároveň díky pulznímu výstupu i dobrým napěťovým rozkmitem vzhledem k napájecímu napětí. Po praktických testech s obvodem TPA3121 bylo i s použitím výstupního filtru zapojeného podle katalogového listu [22] do budící cívky přenášeno velké množství nežádoucích frekvencí a rušení způsobeného právě dvoustavovým pulzním výstupem tohoto obvodu. Dalším zdrojem rušení byl vnitřní hodinový signál obvodu, který po jeho zapnutí velmi znehodnotil signál na vstupních obvodech, takže bez další filtrace by tento signál nebyl použitelný. Proto byl nakonec zvolen podobně jako ve zdrojové části kompromis, a byl použit lineární koncový stupeň ve třídě AB. Tyto typy zesilovačů nejsou zdrojem žádného rušení a téměř nezkrusují signál, ale mají nižší účinnost než zesilovače třídy D.



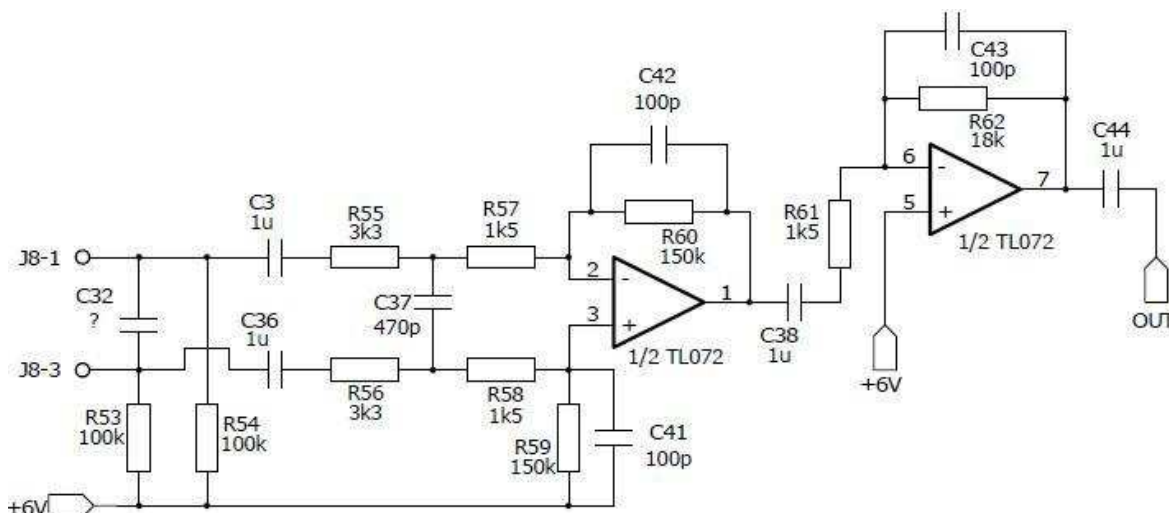
Obrázek 23 - Schéma zapojení koncového zesilovače LM4755

Jedná se o katalogové zapojení obvodu LM4755 podle katalogového listu [23]. Přidán je stejně jako v předchozích případech oddělovací kondenzátor C12 na vstup zesilovače. Obvod je zapojen pro případ nesymetrického napájení a svoji umělou zem na poloviční hodnotě napětí si vytváří sám na pinu BIAS. Tato zem je ale zároveň i úroveň napětí na výstupu v klidovém stavu (střední hodnota výstupního signálu), a protože je zátěž (cívka) zapojena proti zemi je nutné ji oddělit kondenzátorem (C8) aby neprotékal nežádoucí stejnosměrný proud. Tento typ zesilovače je zdvojený a je tedy možné vynechat tento oddělovací kondenzátor a vstup zapojit mezi piny INa a INb a výstup pak mezi OUTa a OUTb. Tím se dosáhne stejné klidové napěťové úrovně na obou vývodech zátěže (cívky) a neprotéká nežádoucí stejnosměrný proud. Toto můstkové zapojení nebylo nakonec použito kvůli vyšší výkonové ztrátě na zesilovači a druhý zesilovač v tomto pouzdře byl zapojen pouze na konektory J6 a J5 pro případné jiné budoucí využití.

Vysílací cívky mají běžně reálný odpor v řádu jednotek ohmů, ke kterému se ještě přičítá reaktance. Proto je zvolené napájecí napětí z jednoho olověného akumulátoru, vzhledem k maximálnímu dosažitelnému výkonu, minimální pro běžné použití. Ve výsledném zařízení tedy bude možnost napájet tento zesilovač samostatně větším napětím (až 40V) pomocí dalšího akumulátoru, a nebo je na plošném spoji připraven k osazení kondenzátor C35. Pokud se zvolí správná hodnota vzhledem k výstupní frekvenci, bude vysílací cívka s tímto kondenzátorem tvořit sériový RLC rezonanční obvod a bude tak dosaženo větších výkonů. V tomto zapojení je možné vynechat oddělovací kondenzátor C8, protože jeho funkci nahradí kondenzátor C35. Zapojení do rezonančního obvodu lze ovšem použít pouze pro buzení cívky jednou frekvencí, u ostatních frekvencí, které budou ležet mimo vliv rezonančního obvodu, se projeví nezanedbatelnou reaktancí přidaného kondenzátoru. To bude znamenat pouze další snížení možného vysílacího výkonu.

## 2.2.2 Vstupní obvody přijímací cívky

Mezi vstupní obvody přijímací cívky lze zařadit dvoustupňový zesilovač, který zesiluje nízkou napěťovou úroveň signálu na přijímací cívce. Dva stupně zesilovače byly zvoleny kvůli možnosti dosažení většího napěťového zesílení na vyšších frekvencích, než by to bylo možné pouze s jedním běžně dostupným operačním zesilovačem.



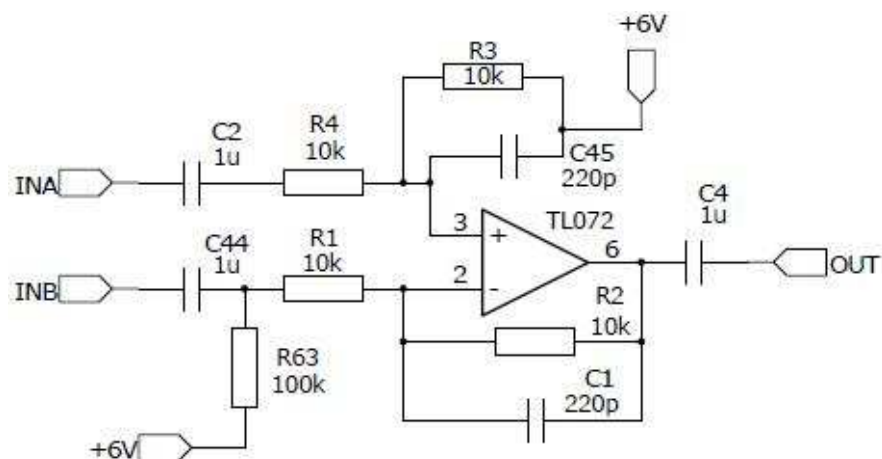
Obrázek 24 - Schéma zapojení vstupního zesilovače

Na vstupní svorky J8 je připojena přijímací cívka, která má rezistory R53 a R54 nastavenou klidovou úroveň na +6V, což je úroveň země pro operační zesilovače. Následují oddělovací kondenzátory C3, C36 a symetrický RC článek tvořený rezistory R55, R56 a kondenzátorem C37, který omezuje nežádoucí vysoké kmitočty a zabraňuje tak spolu s kondenzátory C42, C41 a C43 kmitání signálu na výstupech operačních zesilovačů. Stejně jako ve výše popsaných obvodech byl použit operační zesilovač TL072, který má v napájení filtrační LC článek. Tento typ operačního zesilovače nejlépe ze zkoušených typů omezoval nežádoucí kmitání signálu na výstupu. První stupeň zesilovače je rozdílový, jehož zesílení je nastaveno rezistory R55, R57, R60 a R56, R58, R59 na hodnotu 31,2 ale zároveň tato hodnota klesá s rostoucí frekvencí díky omezovacím kondenzátorům. Druhý stupeň zesilovače tvoří invertující zesilovač, který má zesílení nastaveno rezistory R61 a R62 na hodnotu 12. Tato hodnota je také snižována s rostoucí frekvencí díky klesající impedanci kondenzátoru C43. Celkové napěťové zesílení obvodu pro signál o frekvenci 1kHz je 371, pro 10kHz je 270 a pro 20kHz je 169. Maximální zesílení je navrženo pro parametry zkušební používané soustavy cívek, takže pokud by se připojila jiná soustava cívek s větší vzájemnou vazbou, bylo by nutné zesílení snížit, aby nebyl signál na výstupu v limitaci. Změna napěťového zesílení vzhledem k frekvenci signálu je negativní jev, který při použití více signálů s různou frekvencí musí být kompenzován v programu mikroprocesoru, nicméně je tím omezen aliasing při vzorkování A/D převodníkem. Dalším negativním jevem tohoto zapojení je rozdílný vstupní odpor obou vstupů rozdílového zesilovače. Na svorce J8-1 je to odpor  $R55+R57$  a na svorce J8-3 pak  $R56+R58+R59$ . Tento odpor je ale o několik řádů větší než je odpor přijímací cívky, a proto lze tento nedostatek zanedbat. Při použití jednoho budicího signálu lze využít i kondenzátor C32,

který při vhodně zvolené kapacitě vytvoří s přijímací cívkou paralelní RLC rezonanční obvod. Tento obvod pak výrazně omezí ostatní nežádoucí signály na jiných frekvencích, takže se v přijímaném signálu omezí šum.

### 2.2.3 Výstupní obvody pro měření

Mezi výstupní obvody pro měření lze zařadit druhý rozdílový zesilovač, díky kterému se může odečíst nežádoucí signál, který je na přijímací cívce v klidovém stavu (bez přítomnosti kovů blízko soustavy cívek). Tento signál vzniká díky nenulové vzájemné indukčnosti přijímací a vysílací cívky a pro detekci kovů nepřináší žádnou novou informaci, a proto může být odečten.



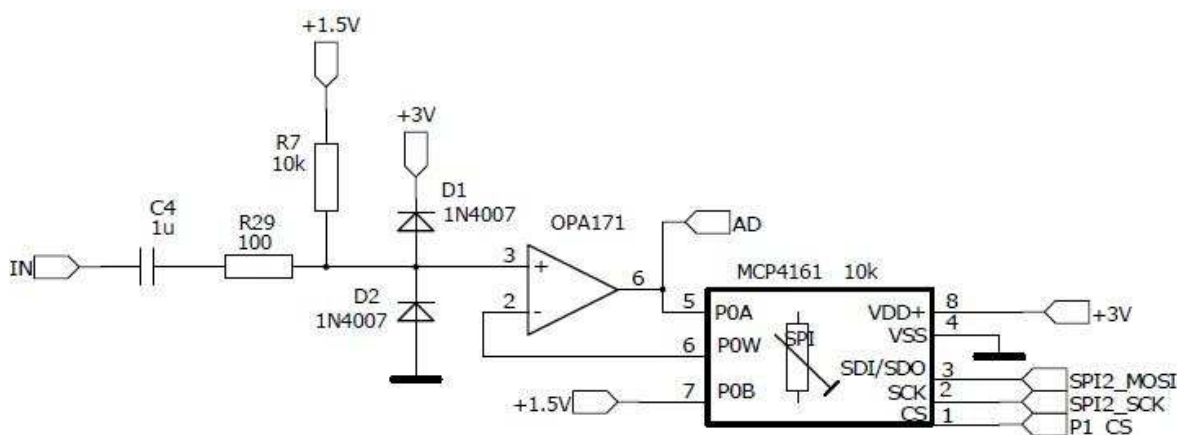
Obrázek 25 - Schéma zapojení rozdílového zesilovače

V tomto zesilovači je jako v předchozích případech použit operační zesilovač TL072 napájený přes LC filtr omezující rušení, který je popsán výše. Na invertující vstupní část zesilovače (INb) je připojen signál z přijímací cívky zesílený výše popisovaným dvoustupňovým zesilovačem a na neinvertující část je připojen korekční signál. Korekční signál připojený na vstup INa je generován mikroprocesorem, za kterým ještě prochází přes filtr typu dolní propust a řízený regulátor amplitudy. Tyto dva bloky jsou stejné jako již výše popsané v části výstupní obvody pro vysílací cívku a za nimi je doplněn invertující zesilovač doplněný o možnost ručně ladit pomocí trimru maximální možnou velikost amplitudy vstupující na tento rozdílový zesilovač.

Rozdílový zesilovač má na obou vstupech nastaveno zesílení 1. To je nastaveno rezistory R3, R4 a R1, R2 a mění se, stejně jako v předchozích případech, díky osazeným omezovacím kondenzátorům C1 a C45, které omezují nežádoucí vysoké kmitočty v signálu. Kondenzátory C2, C4 a C44 slouží jako oddělovací od případné jiné stejnosměrné napěťové úrovně na vstupech nebo výstupu. Rezistorem R4, R3 a R63 jsou nastaveny klidové napěťové úrovně na vstupech rozdílového zesilovače.

Za tímto rozdílovým zesilovačem je zařazen poslední analogový stupeň před A/D převodníkem v mikroprocesoru, a to řízený zesilovač. Další zesilovač je možné přidat právě díky malé amplitudě signálu na výstupu předchozího rozdílového zesilovače.

V ideálním případě je totiž na vstupu řízeného zesilovače bez přítomnosti kovu v blízkosti cívek nulové napětí, a je tedy možné použít vysoké zesílení, což značně zvyšuje citlivost celého detektoru. V praxi ovšem nelze díky různým nelinearitám odečíst všechny nežádoucí signály a tím je pak omezeno i maximální zesílení řízeného zesilovače. Dalším omezením zesílení je maximální možné napájecí napětí, které je na stejné úrovni jako napájecí napětí mikroprocesoru (3V). Tím je zajištěno, že i při limitaci výstupu řízeného zesilovače výstupní napětí nepřesáhne napájecí napětí A/D převodníku v mikroprocesoru.



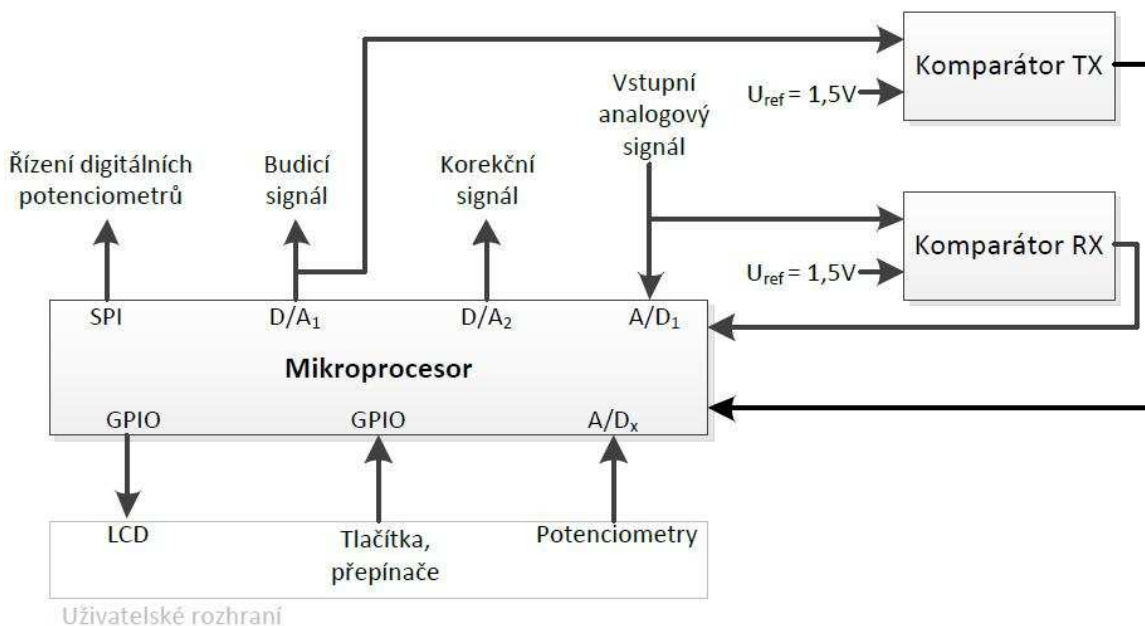
Obrázek 26 - Schéma zapojení řízeného zesilovače

Jedná se o klasické zapojení operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení, který má ve zpětné vazbě místo odporového děliče nastavujícího pevné zesílení zapojen digitální potenciometr. Kondenzátor C4 odděluje rozdílnou stejnosměrnou úroveň vstupního signálu (6V) od stejnosměrné úrovně signálu na operačním zesilovači (1,5V) nastavené rezistorem R7. Kvůli většímu napájecímu napětí předcházejícího obvodu (rozdílového zesilovače) může být jeho výstupní signál přivedený na kondenzátor C4 s amplitudou větší než 1,5V. Proto jsou do zapojení přidány diody D1 a D2, které oříznou případný větší signál (vyzkrajují na napájecí napětí) na vstupu a nehrozí tak zničení operačního zesilovače. V okamžiku kdy by docházelo k oříznutí signálu, by byl předchozí obvod nadměrně proudově zatěžován a právě tento proud omezuje rezistor R29. Maximální zesílení tohoto řízeného zesilovače, které bylo zjištěno měřením na hodnotě 45, je dáno maximálním nastavitelným odporem mezi výstupem a invertujícím vstupem operačního zesilovače, dále pak jednotlivým odporem vývodů digitálního potenciometru. Velikost možného nastavitelného zesílení bez limitace výstupu operačního zesilovače je omezena nízkým napájecím napětím operačního zesilovače, a proto byl zvolen právě typ OPA171, který umožňuje rozkmit signálu na výstupu až k hodnotám blízkým napájecímu napětí (rail-to-rail provedení).

## 2.3 Digitální část

Mezi prvky digitální části v návrhu detektoru kovu se řadí hlavně řídicí mikroprocesor, ale i jeho podpůrné obvody jako komparátory, digitální potenciometry a

nakonec z části i uživatelské rozhraní. Všechny tyto prvky pracují s dvoustavovým signálem na vstupech nebo i výstupech a umožňují řídit a zpracovávat data z analogové části detektoru a následně provádět digitální zpracování signálu.



Obrázek 27 - Blokové schéma digitální části detektoru

Dále budou popsány jednotlivé části tohoto blokového schématu.

### 2.3.1 Mikroprocesor

Volba typu mikroprocesoru byla nejdůležitější částí návrhu, protože jeho možnosti přímo ovlivní parametry celého detektoru kovu. Cílem bylo vybrat takový typ, který by v sobě zahrnoval co nejvíce potřebných periférií, a také byl dostatečně rychlý pro výpočet všech algoritmů a zároveň měl nějakou rezervu ve výkonu pro případné další využití. Pro tuto práci byl nejvhodnější volbou mikroprocesor STM32f407, jehož základní parametry jsou:

- Jádru
  - ARM 32-bitové, FPU
  - 224 instrukcí, RISC
  - 13x32bit registrů pro všeobecné použití
  - až 210DMIPS při 168MHz oscilátoru
- Paměť
  - 512kB Flash paměť programu
  - 192kB paměť dat (SRAM)
- Komunikační sběrnice
  - 3x I<sup>2</sup>C

- 4x USART (10,5MBit/s)
- 3x SPI (37,5MBit/s)
- 2x CAN (2.0B Active)
- USB 2.0 full/high speed
- 10/100 Ethernet

- Periferie

- 12x 16-bitové čítače/časovače + 2x32-bitové čítače/časovače s předděličkou, IC,OC,PWM, pulzní mód
- 24-kanálový 3x 12-bitový A/D převodník, 2,4MSPS
- 2x12-bitový D/A převodník

- Univerzální DMA (16 streamů)

- Programování/ladění pomocí SWD & JTAG rozhraní

- Řízení napájení, hodiny, reset

- Napájecí napětí 1,8V až 3,6V
- Externí krystalový oscilátor 4 až 26MHz
- Interní nastavitelný RC oscilátor 16MHz
- Kalibrovaný oscilátor 32kHz pro RTC
- POR, PDR, PVD, BOR
- 3 úsporné režimy (Sleep,Stop,Standby)

Je to nízkopříkonový 32bitový mikroprocesor s jádrem RISC ARM Cortex-M4 od firmy STMicroelectronics využívající 3 stupňovou (pipeline) Harvardskou architekturu. Disponuje velkou vnitřní pamětí typu Flash, která se programuje a ladí přes sériové rozhraní SWD. Obsahuje také jednotku pro výpočet v plovoucí řádové čárce (FPU) a část instrukcí je stejná jako u digitálních signálových procesorů, což dohromady tvoří velmi rychlý mikroprocesor. Rychlost je také dána velkou možností nastavení hodinové frekvence pomocí děličů a PLL násobičky. Tímto lze dosáhnout i při malé frekvenci externího krystalu hodinové frekvence jádra procesoru až 168MHz. S rostoucí frekvencí ale roste i spotřeba mikroprocesoru, která je u tohoto typu při 168MHz 40mA a při zapnutí všech periférií dále roste až na hodnotu kolem 100mA. Pro případ tohoto detektoru kovu je díky napájení z akumulátoru nutné používat pouze ty části na takové frekvenci, které jsou nezbytné pro správnou funkci všech naprogramovaných algoritmů. Podrobný popis tohoto mikroprocesoru lze nalézt hlavně v katalogovém listu [24], v referenčním manuálu [25] a v programovacím manuálu [26].Všechny funkce mikroprocesoru jsou pokročilé a na popis velmi obsáhlé, proto budou dále stručně popsány pouze ty periferie, které jsou využity a tvoří základ tohoto detektoru kovu.

První z nich je 12-bitový D/A převodník, který generuje budicí i korekční signál. Tento převodník má dva nezávisle říditelné kanály se dvěma výstupy, takže je možné generovat dva na sobě nezávislé signály. Tyto signály mají analogovou zem společnou se zemí mikroprocesoru, a je možné pro lepší rozlišení regulovat kladné referenční napětí



převodníku od napájecího do 1,8V. Dále je možné využít předdefinované signály pro generování trojúhelníkového průběhu nebo gaušovského šumu, což nebylo použito. Převod čísla na analogovou napěťovou úroveň je možné zahájit pomocí softwarového nebo jiných předdefinovaných spouštěcích impulsů, převážně přerušením od přetečení některých časovačů. Pro oba kanály je také možné nastavit společný impuls pro zahájení převodu a tím tak dosáhnout synchronního převodu obou nezávislých číselných hodnot na dvě napěťové úrovně. Číselné hodnoty pro převod lze také D/A převodníku předávat přes DMA, což zajistí přímý přístup do paměti a umožní například postupné posílání předdefinovaných hodnot z pole v přesných časových intervalech při přetečení časovače bez vytížení jádra mikroprocesoru.

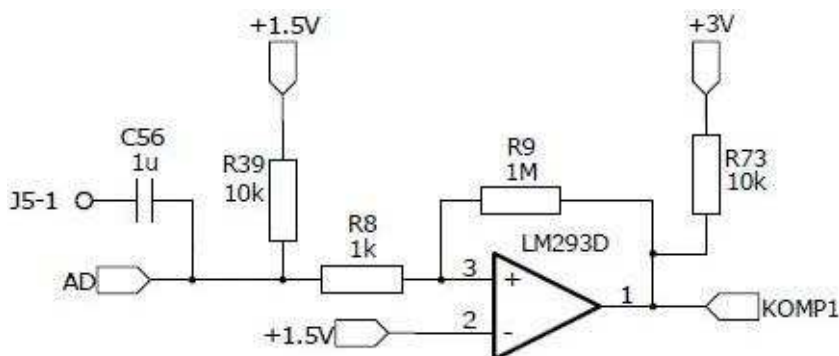
Další použitou periferií je A/D převodník. Slouží ke vzorkování signálu z přijímací cívky, který prošel analogovou částí detektoru. Dále je použit i v uživatelském rozhraní pro vyhodnocování polohy potenciometrů a také pro měření stavu akumulátoru. Mikroprocesor STM32f407 obsahuje 3 samostatné kanály 12 bitového A/D převodníku, které lze multiplexovat na 16 externích pinů mikroprocesoru. Další základní vlastnosti se velmi podobají D/A převodníku. Analogová zem je společná se zemí mikroprocesoru a je možné i snižovat napájecí napětí A/D převodníků až do 1,8V. A/D převodník lze spustit na jeden samotný převod, spouštěný softwarově nebo většinou pomocí přerušení od přetečení některých časovačů. Je možné spustit i kontinuální převod a dokonce i postupné skenování vybraných vstupních pinů připojených ke vstupnímu analogovému multiplexeru A/D převodníku. Výsledek převodu je možné vyčíst z příslušného registru nebo pomocí DMA přenášet do vybrané proměnné bez vytížení jádra procesoru.

Velmi používanou funkcí v mikroprocesoru jsou časovače. Svým principem se neliší od jiných mikroprocesorů. Základem je tedy registr (CNT), který s každým hodinovým pulzem přičte nebo odečte svoji hodnotu. Tento stav se opakuje až do přetečení 16(32)-bitového čísla uloženého v registru, při kterém je možné vyvolat přerušení. Všechny časovače mají i vstupy představující příslušné piny na pouzdru mikroprocesoru, pomocí kterých lze nahradit hodinový signál pro změnu registru. Časovače dále umožňují i další nastavení, které pak zbytečně nezatěžují jádro procesoru, jako je měření délky úrovní impulsů pomocí vstupních hranových detektorů (IC jednotka), automatická změna úrovní některých výstupů mikroprocesoru při překročení nastavené hodnoty v registru CNT (OC), případně lze vygenerovat pouze jeden pulz. Čítačem lze také generovat žádost pro zahájení DMA přenosů, nebo další přerušení při dosažení komparační hodnoty v OC režimu a přerušení při detekci nastavené hrany v IC režimu na vstupech čítače.

Poslední používanou funkcí tohoto mikroprocesoru je externí přerušení, které je členěno do skupin podle číselného označení vývodů mikroprocesoru. Je možné nastavit reakci na sestupnou a náběžnou hranu nebo na jakoukoliv změnu hrany.

### 2.3.2 Komparátory

Komparátory sice nepatří do digitálních obvodů, ale protože jejich výstupní signál lze považovat za dvoustavový, tak budou popsány zde. Jedná se vlastně o operační zesilovač, jehož vnitřní struktura je přizpůsobená na rychlé změny stavu na výstupu. V detektoru kovu bylo použito klasické neinvertující zapojení podle obrázku.



Obrázek 28 - Schéma zapojení ½ komparátoru LM293D

Byl použit nízkonapěťový komparátor LM293 [27], který má hysterezi nastavenou externími rezistory R8 a R9 na hodnotu 3mV. Celý obvod má stejné napájecí napětí jako mikroprocesor (3V), a proto je výstupní signál dvoustavový o napěťových úrovních 0V a 3V. Jako referenční napětí je použita úroveň 1,5V, což je i střední hodnota signálů D/A a A/D převodníků. Komparátor tedy v tomto zapojení bude měnit výstupní stav při průchodu vstupního signálu nulou (střední hodnotou). Tímto lze pak jednoduše změřit fázi signálu mezi přijímaným a budícím signálem, na který je připojen stejně zapojený komparátor. V obvodu je dále i rezistor R73 zajišťující kladnou výstupní úroveň na výstupu komparátoru, protože vnitřní výstupní zapojení komparátoru je řešeno pomocí tranzistoru s otevřeným kolektorem. Kondenzátor C56 odděluje stejnosměrnou úroveň předcházejícího obvodu a rezistor R39 nastavuje novou stejnosměrnou úroveň pro signál na komparátoru. Pro správnou a bezpečnou funkci detekce průchodu nulou se tedy na vstupní konektor J5-1 dá připojit signál s amplitudou maximálně 1,5V.

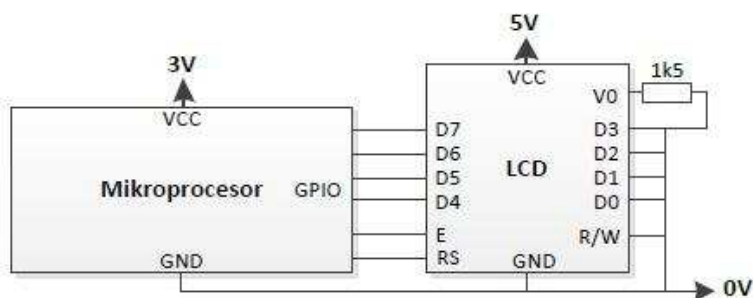
### 2.4 Uživatelské rozhraní

Do uživatelského rozhraní lze zařadit všechny prvky, kterými lze detektor kovu ovládat nebo zjišťovat údaje o nalezených kovech v okolí soustavy cívek. Základním použitým ovládacím prvkem jsou tlačítka a přepínače. V návrhu byly využity 4 tlačítka se spínacím kontaktem, kde je u všech jeden vývod zapojený na zem mikroprocesoru, a druhý přímo na piny mikroprocesoru, u kterých jsou zapnuty vnitřní pull-up rezistory. Stejným stylem jsou zapojeny i přepínače. V zapojení byl využit dvoupolohový přepínač na volbu režimu detekce s diskriminací některých kovů nebo detekce všech kovů, dále pak šestipolohový otočný přepínač na nastavení módu měření jako bezpohybový a pohybový režim, režim pro přesné zaměření předmětu, režim nastavení detektoru a servisní režim.

Všechny kontakty přepínačů, které určují jejich aktuální polohu, jsou tedy zapojeny na volné piny mikroprocesoru, u kterých jsou aktivovány pull-up nebo pull-down rezistory.

Dalším použitým prvkem pro ovládání detektoru jsou potenciometry. V zapojení byly použity tři, jeden pro regulaci hlasitosti signalizačního reproduktoru nebo sluchátkového výstupu, druhý pro regulaci citlivosti detekce a třetí pro nastavení citlivosti odladění vlivu země. Stav potenciometru pro regulaci hlasitosti není vyhodnocován pomocí mikroprocesoru, ale je jím přímo řízena amplituda signálu do koncového stupně pro signalizační reproduktor. Druhý a třetí potenciometr na řízení citlivostí je vyhodnocován pomocí A/D převodníku v mikroprocesoru, takže jsou zapojeny jako děliče napětí napájené stejným napětím jako je napájecí napětí mikroprocesoru.

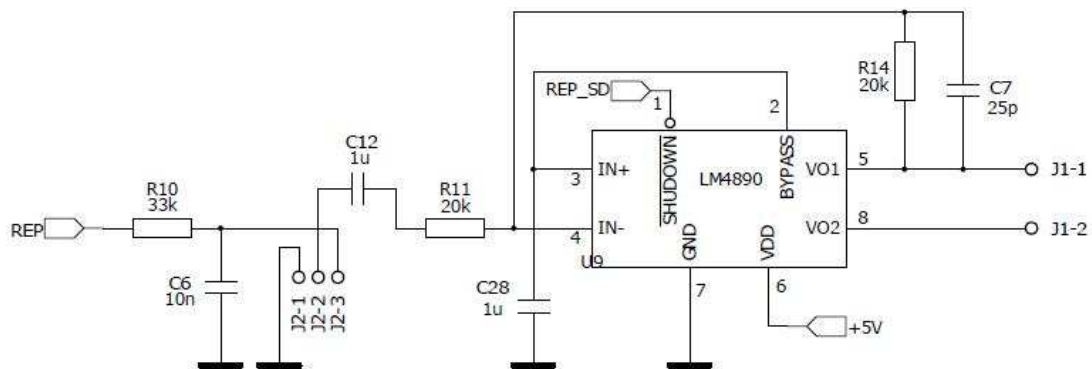
Pro zobrazování naměřených údajů nebo nastavení detektoru je použit znakový dvouřádkový LCD displej s délkou 16 znaků na řádek. Jedná se o klasický LCD displej ovládaný mikroprocesorem pomocí standardu kompatibilního s HD44780. Připojení k mikroprocesoru je na obrázku.



Obrázek 29 - Blokové schéma připojení LCD

Kvůli rozdílným napájecím napětím mikroprocesoru a LCD displeje byl použit LCD displej typu ATM1602B, který má tolerantní vstupy pro 3V logiku a je možné ho řídit bez dalších úprav úrovní na ovládacích vodičích. Datová sběrnice je zapojena jako 4bitová kvůli úspoře pinů mikroprocesoru. Rezistor pro nastavení kontrastu je osazen přímo na desce displeje. Displej má i integrované LED podsvětlení, které zůstalo nezapojeno, protože při práci detektoru by podsvětlení představovalo velkou zátěž pro akumulátory. Dalším důvodem nezapojeného podsvětlení je, že displej představuje pouze doplňkový prvek uživatelského rozhraní, takže je možné detektor používat i bez něj a vyhodnocování nalezených kovů provádět pomocí zvukového výstupu.

Posledním prvkem v uživatelském rozhraní je koncový stupeň signalizačního reproduktoru, který je zapojen podle obrázku.

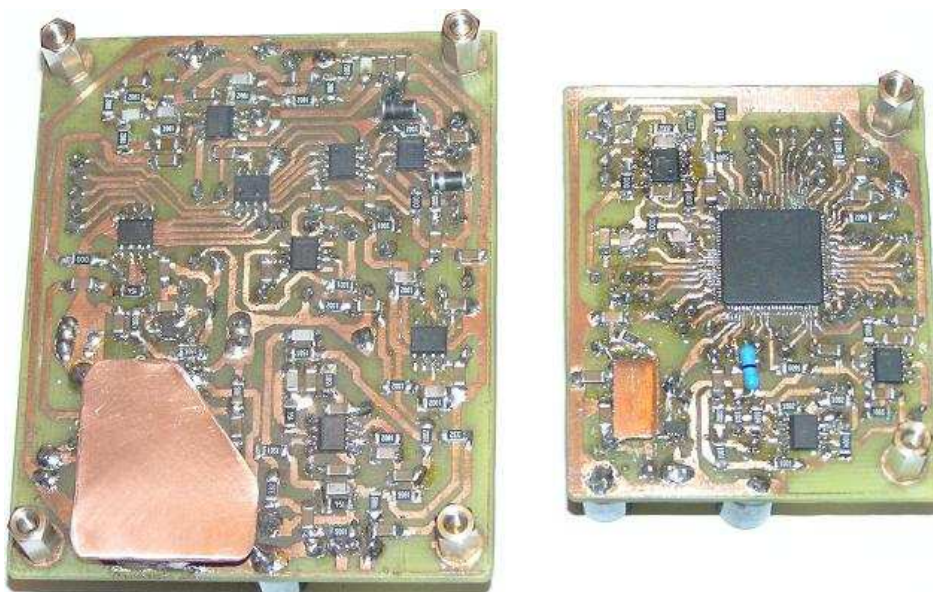


Obrázek 30 - Schéma zapojení koncového zesilovače signalizačního reproduktoru

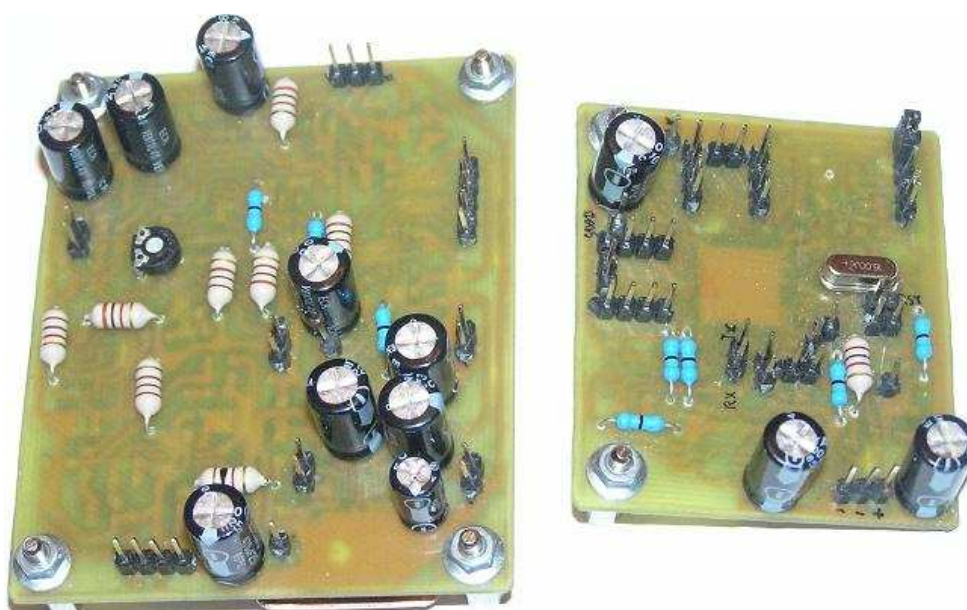
Zapojení vychází z katalogového listu integrovaného lineárního zesilovače LM4890 [30]. Vstupní obdélníkový signál, který je generovaný časovačem mikroprocesoru pomocí OC jednotky, je přiveden na svorku REP. Dále pak prochází dolní propustí tvořené rezistorem R10 a kondenzátorem C6, která odfiltruje vysoké kmitočty ze signálu aby nebyl výsledný reprodukováný zvuk příliš "ostrý". Na konektor J2 je možné připojit potenciometr pro regulaci hlasitosti (při realizaci byl použit 100k/G) nebo jumper pro přemostění konektoru. Kondenzátor C12 odděluje odlišnou stejnosměrnou úroveň signálu od úrovně na vstupu zesilovače. Rezistory R11 a R14 je nastavené zesílení koncového stupně a kondenzátor C7 zmenšuje přenášené pásmo zesilovače do reproduktoru. Reprodukter je zapojen na konektor J1 a kvůli maximálnímu proudu a maximální povolené výkonové ztrátě koncového stupně je nutné volit jeho impedanci nejméně  $8\Omega$ , do které je koncový stupeň schopný dodat až 1W, což je pro tento účel dostatečné.

## 2.5 Realizace a konstrukční řešení

Cílem realizace bylo předešlý návrh obvodů zdrojové, analogové a digitální části přenést na desku plošných spojů, aby mohl být detektor naprogramován. Snahou bylo tento proces co nejvíce zjednodušit a pokusit se o kompletní realizaci v domácích podmínkách. Nejjednodušší je výroba jednostranného plošného spoje, proto byl proveden návrh vodivých cest umístěných na jedné straně desky. Tento návrh má při velkém počtu použitých součástek jen velmi málo nebo dokonce žádné řešení, proto je v této realizaci využito větší množství nulových rezistorů (drátových propojek). Pro co nejmenší rozměry byly z velké části použity SMD součástky, které způsobují většinou ještě obtížnější návrh. Tato komplikace ale následně výrazně zjednoduší fyzickou výrobu a osazení desky plošných spojů. Návrh byl proveden v softwaru Pads Logic, Layout a Router. Nakonec byly pro jednodušší testování a úpravy prototypu vyrobeny dvě desky, které jsou víceméně rozděleny na analogovou a digitální podle analogové a digitální části popsané výše v návrhu hardwaru.



**Obrázek 31 – Analogová (vlevo) a digitální (vpravo) deska plošných spojů, Bottom**

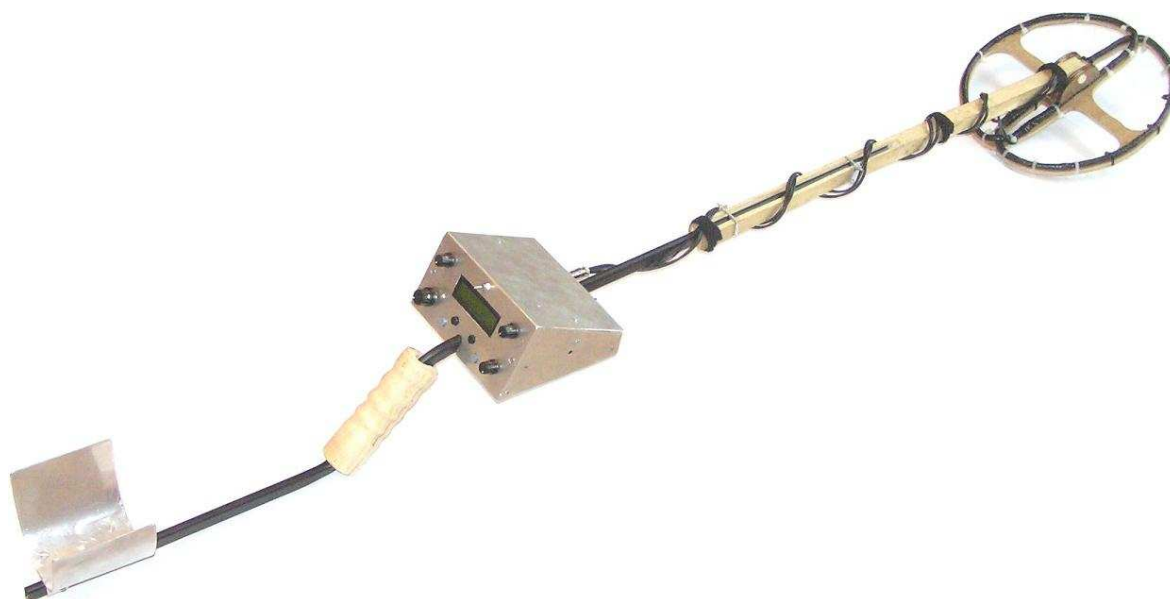


**Obrázek 32 - Analogová (vlevo) a digitální (vpravo) deska plošných spojů, Top**

Kromě výroby desek plošných spojů bylo nutné vyřešit ještě mechanickou konstrukci celého detektoru kovu. Konstrukční řešení detektoru sice není cílem stanoveným v zadání práce, nicméně pro správné odladění softwarové části je nutné detektor vyzkoušet v reálných venkovních podmínkách kde se naplno projeví vliv země nebo jiné negativní rušení. To představuje nutnost výroby přenositelné konstrukce, která bude obsahovat všechny části dosud popsané v návrhu detektoru. Stejně jako u návrhu desek plošných spojů i v tomto případě bylo cílem realizovat mechanickou konstrukci v

domácích podmínkách z běžně dostupných prvků. Je možné vytvořit mnoho variant řešení, ale u všech je nutné dodržet základní požadavky a to zejména nízkou hmotnost a zajistit aby v okolí soustavy cívek nebyl přítomen žádný kov.

V návrhu byla pro nízkou hmotnost využita hliníková středová nosná oválná trubka ohnutá do požadovaného tvaru, na kterou se ve spodní části napojuje dřevěný čtyřhran. Tím je zajištěno, že soustava cívek bude minimálně 30cm od nejbližší kovové části konstrukce. Soustava cívek je přidělána plastovým šroubem do spodní části dřevěného čtyřhranu. Vzdálenost cívek od nejbližší kovové části byla zvolena odhadem s ohledem na předpokládaný možný dosah detektoru. Dosah cívek a tedy i vzdálenost, kdy jsou cívky měřitelně ovlivněny mechanickou kovovou konstrukcí, je dán i jejich velikostí, a proto byla při předpokladu použití různých cívek tato vzdálenost zvolena také jako kompromis mezi hmotností detektoru a mírou ovlivnění cívek. Obecně ale platí, že je vždy lepší mít jakýkoliv kovový prvek konstrukce co nejdále od cívek, i když jeho vliv lze do značné míry vykompenzovat softwarově s pomocí rozdílového zesilovače popsaného v popisu analogové části detektoru. Desky plošných spojů jsou umístěny v hliníkové krabici, která je připevněna k nosné tyči tak, aby její přední panel byl dobře viditelný při práci s detektorem. Na předním panelu jsou umístěny všechny prvky uživatelského rozhraní kromě signalizačního reproduktoru. Pro napájení bylo nakonec použito 5 Li-pol akumulátorů, takže díky jejich nízké hmotnosti a rozměrech je bylo možné umístit spolu s ostatní elektronikou také do této krabice, což zjedušilo výrobu mechanické konstrukce detektoru. V zadní části krabice je umístěn vypínač a nabíjecí konektor. Protože středová nosná trubka je poměrně úzká, bylo do mechanické konstrukce pro jednoduchou manipulaci přidáno dřevěné držadlo a zadní hliníková loketní opěrka. Celá výše popsaná mechanická konstrukce není pro tuto práci příliš důležitá, a proto zde nejsou uvedeny žádné konkrétní rozměry.



**Obrázek 33 - Testovací mechanická konstrukce detektoru kovu**

Do mechanické konstrukce detektoru lze zařadit i samotnou soustavu cívek (hledací cívku). Při návrhu detektoru sice bylo využito továrně vyráběné cívky, ale pro další testy a hlavně závěrečné srovnání dvou různých cívek, byla vytvořena další hledací cívka v domácích podmínkách. Jako v předchozím případě ani návrh nebo výroba cívky nebyla součástí zadání této práce, takže byla provedena odhadem, a to jak návrh výsledného tvaru, tak průměru cívek, průřezu vodičů nebo počtu závitů. Předpokladem tedy bylo, že navržený detektor dokáže pracovat se všemi druhy cívek. Výroba 2D cívky představovala navinutí dvou stíněných kruhových vzduchových cívek, každá se 75 závitů z Cu vodiče o průměru 0,5mm na průměr 26cm, a následné upravení přibližně do tvaru písmena D. Dále pak byly tyto cívky umístěny přes sebe do výsledného tvaru zobrazeného v dostupné literatuře (např. [31]) a s pomocí osciloskopu nalezena malými změnami jejich vzájemné polohy nejmenší vzájemná vazba. V tomto stavu byla cívka upevněna na dřevěnou podložku. Výše popsaná konstrukce pro svoji nízkou mechanickou pevnost není vhodná pro extrémní venkovní podmínky (nárazy, práce pod vodou, kroucení vlivem změny vlhkosti dřevěné podložky), ale pro účely testování je dostatečná. Navržený detektor si navíc s malými změnami vzájemné vazby cívek při jejich deformaci dokáže poradit při kalibraci, při které jsou díky rozdílovému zesilovači tyto jevy odfiltrovány na co možná nejlepší úroveň.



Obrázek 34 – Použité hledací cívky, vpravo Ø 11cm, vlevo Ø26cm

### 3 Software

Část návrhu detektoru kovu zabývající se softwarovým vybavením je velice důležitá pro správnou funkci všech digitálních obvodů, které jsou bez nahraného programu v mikroprocesoru nefunkční. Dále bude tedy proveden popis procesu programování a samotného programu použitého mikroprocesoru STM32f407.

#### 3.1 Programování mikroprocesoru

Aby mikroprocesor vykonával činnost stanovenou podle napsaného programu, musí se do něj tento program nahrát pomocí programátoru. U použitého mikroprocesoru se pro nahrávání programu používá rozhraní SWJ-DP, které v sobě obsahuje jak běžně používané JTAG rozhraní pro programování i ladění, tak i jeho zdokonalenou verzi SWD. SWD verze byla využita i při programování mikroprocesoru v této práci. Jedná se o 2-vodičové sériové rozhraní, kde jeden vodič (SWCLK) představuje hodinový signál, pomocí kterého se synchronně přenáší vstupní i výstupní data přes druhý datový vodič (SWDIO). Pro správné definování napěťových úrovní při přenosu je třeba mít i společnou zem programátoru s programovaným mikroprocesorem. Jako programátor bylo využito hotové řešení dodávané výrobcem mikroprocesoru a to programátor ST-LINK/V2, který je součástí vývojového kitu STM32F4DISCOVERY. Tento kit má vyvedeno SWD rozhraní na výstupní konektor, který lze aktivovat pomocí jumperů. V době psaní této práce byl tento způsob nejdostupnější při programování externích mikroprocesorů osazených mimo vývojové desky.

Důležitou částí je i vývojové prostředí, ve kterém lze samotný program napsat, přeložit a případně i provádět ladění. Existuje mnoho vývojových prostředí podporujících použitou řadu mikroprocesorů, ale většina je omezena buď časovým intervalem použití, nebo maximální velikostí zdrojového kódu většinou do 32kB, což je pro procesor s 16x větší pamětí velmi malá hodnota. Tato omezení lze odstranit až po zakoupení příslušné licence. K dispozici je ale i vývojové prostředí Eclipse, což je open-source prostředí pro programování v různých programovacích jazycích. Je vytvořené v programovacím jazyku Java a je tak přenositelné i na různé operační systémy. Úprava pro konkrétní programovací jazyk se pak provádí pomocí dostupných pluginů a rozsáhlých možností nastavení. Toto nastavení je ale značně komplikované, takže nakonec bylo využito jiné vývojové prostředí. Jedná se o volně dostupné prostředí CoCox (CoIDE), které je založené právě na Eclipse a je již upravené pro programovací jazyk C, programování mikroprocesorů řady STM32F4 a zároveň zjednodušené vypuštěním nepotřebných funkcí. Po instalaci CoIDE je třeba pouze nastavit cestu ke kompilátoru (Toolchain Path) a pak je už možné po výběru použitého mikroprocesoru začít programovat v jazyku symbolických adres (JSA – assembler), nebo v jazyku C, který byl v této práci využit. Instalační soubory a návod k instalaci je možné najít v [29]. Vývojové prostředí CoIDE má také vestavěný balík knihoven CMSIS, které je možné použít při nastavování všech parametrů a periférií mikroprocesoru. Není tedy nutné zabývat se programováním na úrovni registrů mikroprocesoru, ale pouze se volají funkce s určitými parametry (většinou strukturami), které se o správné nastavení registrů postarají

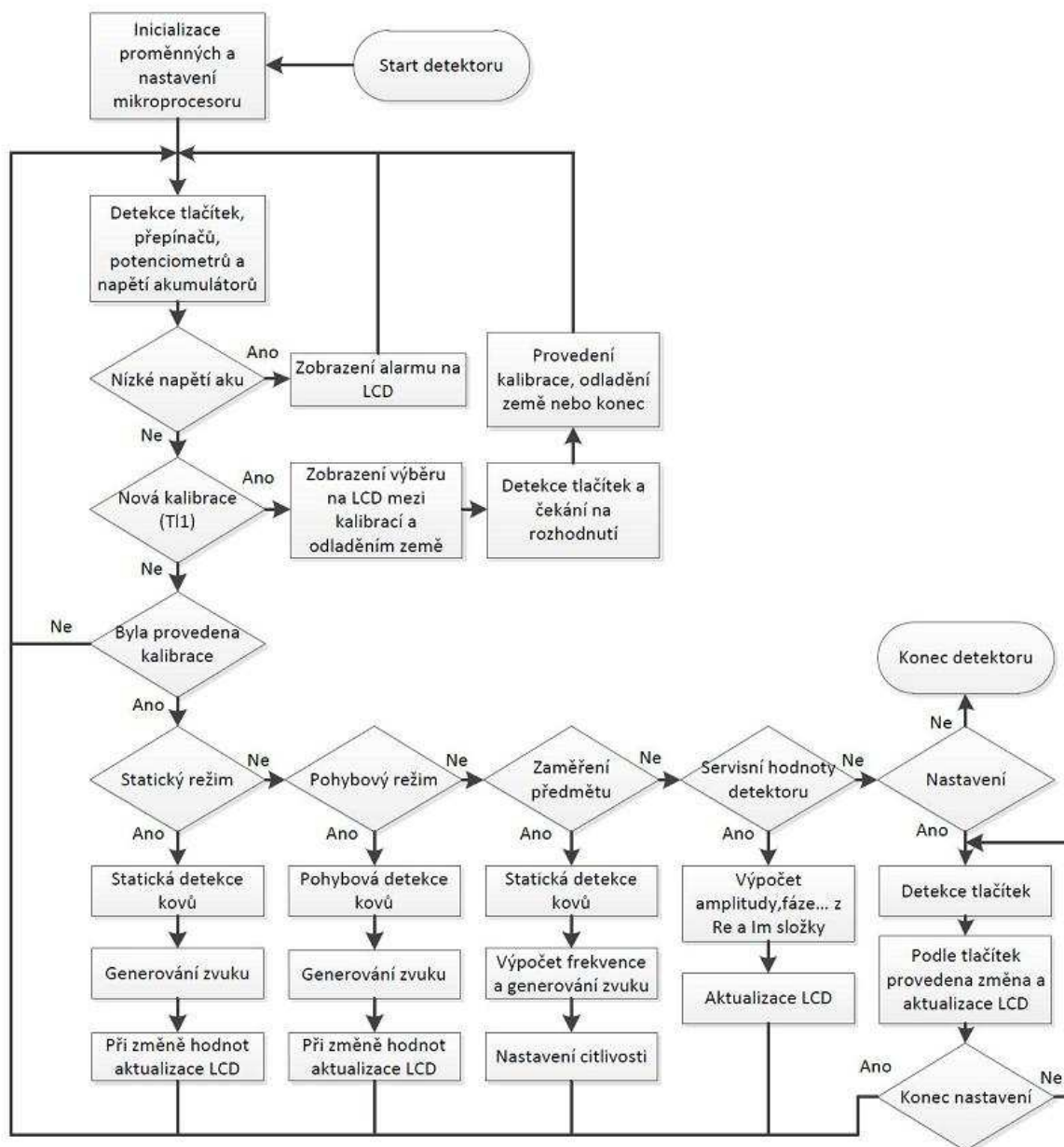


bez aktivní účasti programátora. Tento přístup je v této práci plně využíván, což ve většině případů zjednodušilo vývoj programového vybavení a zpřehlednilo výsledný program. Nicméně pro nastavování parametrů mikroprocesoru je stejně většinou nutné nastudovat funkci ovládaných periférií v Reference manuálu nebo minimálně vyhledat podporované hodnoty v manuálu CMSIS knihovny, takže výsledný čas pro sestavení programu není o mnoho menší, než při přímé práci s registry mikroprocesoru. Manuál a samotné knihovny pro obsluhu periférií lze stáhnout z internetových stránek výrobce mikroprocesoru [28].

### 3.2 Zpracování signálu

Vstupem pro algoritmy zpracování signálu jsou veličiny, které vzešly z předchozího hardwarového návrhu detektoru. Pro detekci a klasifikaci kovových předmětů je využito vstupního analogového signálu, který prošel od přijímací cívky úpravou v několika stupních. Mezi další zpracovávané signály lze řadit i polohu potenciometrů, přepínačů, stav tlačítek na předním panelu a napětí akumulátorů. Všechny tyto signály jsou snímány s ohledem na minimální vytížení jádra mikroprocesoru. Vstupní analogový signál je vzorkován nepřetržitě spuštěným A/D převodníkem a výsledky převodu jsou přes DMA periférii přenášeny do proměnné. Pokud je tedy potřeba aktuální vzorek amplitudy, je vybrán z této proměnné s předpokladem, že je aktuální. To sice vnáší do výsledku jistou chybu, ale vzorkovací frekvence převodníku je o několik řádů větší než frekvence vzorkovaného signálu, a proto je tato chyba malá a je zanedbána. Výběr vzorků je řízen v přerušení komparátorů s pomocí časovače tak, aby byla vždy získána amplituda signálu za jeden až dvě periody signálu (podle fázového posunu mezi Tx a Rx signálem). Z přerušení komparátorů je pak dopočítána i fáze mezi signálem pro vysílací cívku a příchozím vzorkovaným signálem. Pro algoritmy detekování kovu bylo využito hlavně vyjádření signálu pomocí reálné a imaginární složky. Tyto dvě hodnoty jsou snímány pomocí kvadrurní demodulace nezávisle na výše popsané detekci amplitudy a fáze. Kvadrurní demodulace je synchronizována pomocí přerušení komparátoru Tx signálu a časovače a je více popsána v další kapitole. Ostatní analogové hodnoty jsou vzorkovány dalším A/D převodníkem nastaveným na skenovací režim, který periodicky projíždí všechny předvolené kanály a převedené hodnoty posílá přes DMA periférii do pole, ze kterého lze vždy vybrat aktuální hodnotu příslušného signálu. Vzorkovací frekvence je sice pomalejší než v předchozím případě, ale měřené hodnoty jsou téměř stálé, takže hodnoty převodu ukládané do pole lze považovat také za aktuální. Výše popsané procesy jsou řešeny vždy po částech v různých přerušeních, které se vykonávají nezávisle na sobě, a proto není možné uvést nějaký jednoduchý vývojový diagram.

Následující diagram zachycuje základní nekonečnou smyčku, ve které se po zapnutí detektoru vykonávají všechny další algoritmy popsané v této kapitole a ve které se také vyhodnocuje většina pomocných signálů jako jsou tlačítka, potenciometry a přepínač volby funkce detektoru.



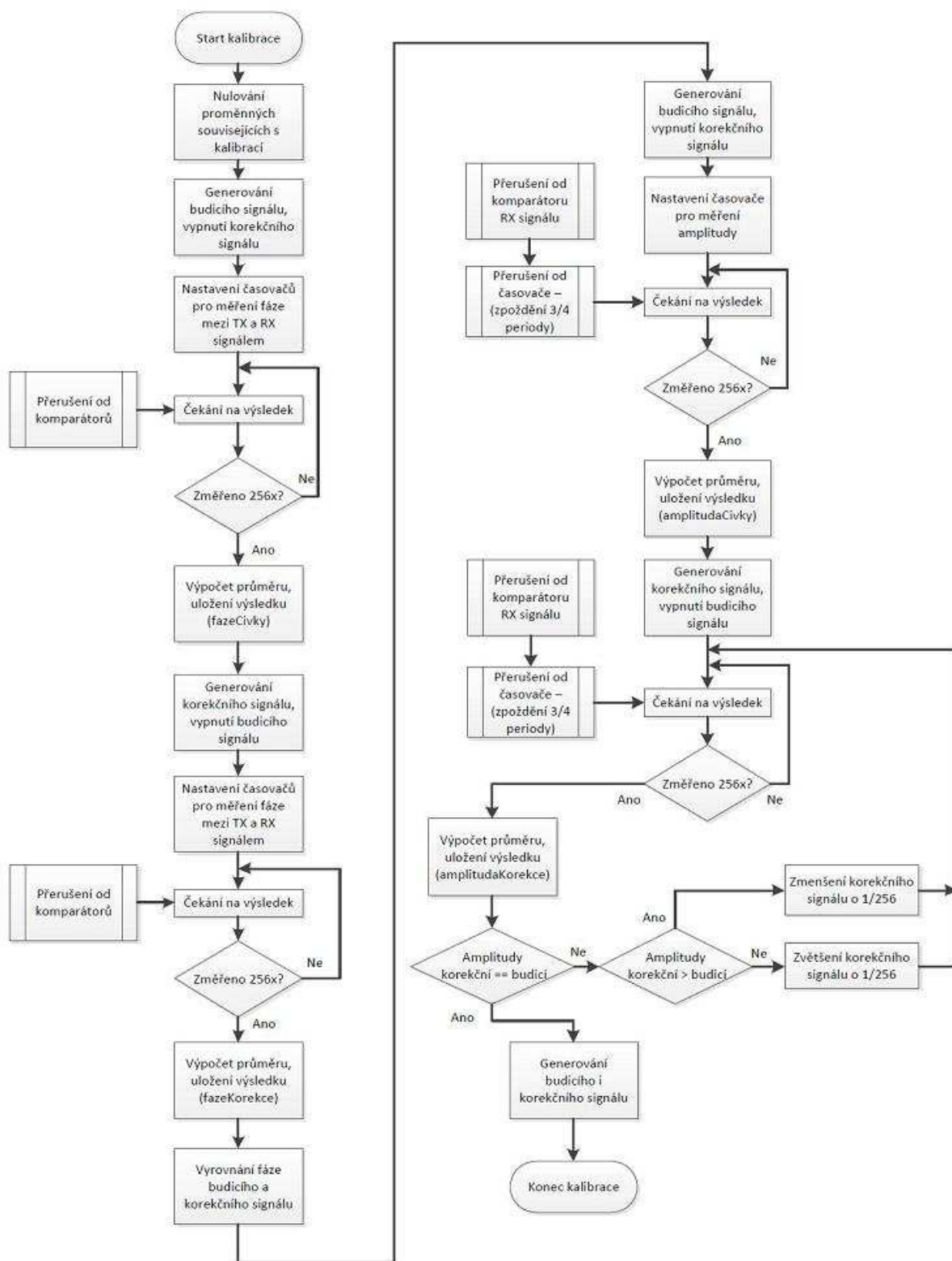
Obrázek 35 – Vývojový diagram základní nekonečné smyčky

### 3.2.1 Kalibrace s použitím komparátoru

Kalibrace slouží k základnímu nastavení analogové části detektoru kovu. V první fázi se nastaví všechny počáteční hodnoty proměnných a podle aktuální velikosti napájecího napětí se určí nastavení digitálního potenciometru před koncovým stupněm tak, aby nebyl jeho výstup v limitaci. V další fázi se pak nastavuje fáze a amplituda korekčního signálu na takovou hodnotu, aby na rozdílovém zesilovači byla stejná jako fáze a amplituda vstupního signálu z přijímací cívky. Nastavení fáze je řešeno výpočtem pomocí signálu z komparátorů a nastavení amplitudy korekčního signálu probíhá iteračně. Tímto procesem se vykompenzuje zbytkový nežádoucí signál z přijímací cívky, který vzniká nenulovou vzájemnou indukčností přijímací a vysílací cívky. Tato kompenzace je hlavním cílem kalibrace detektoru. Vlivem různých nelinearit v obvodech, kterými procházejí

budicí, přijímací a korekční signál a neúplným potlačením souhlasného napětí rozdílového zesilovače tento proces není absolutní. Proto se vždy i po kalibraci objeví na vstupu A/D převodníku a komparátoru Rx nenulový signál, který nenese žádnou důležitou informaci. Zbytkový signál je využit pouze k výpočtu základního průměru reálné a imaginární složky signálu, což je dále využíváno jako startovací referenční hodnota dlouhodobého plovoucího průměru při detekci kovů. Velikost zbytkového signálu je také ovlivněna počtem vzorků na jednu periodu korekčního a budicího signálu generovaného D/A převodníky, protože pro vyrovnání fáze obou signálů na rozdílovém zesilovači je možné posunovat fázi pouze v krocích daných tímto počtem. V této práci byl korekční i budicí signál generován pomocí 64 vzorků na periodu. Podobně je tomu i při regulaci amplitudy, která je ovlivněna počtem řídicích bitů použitých digitálních potenciometrů (8bitů, 256 kroků). Posouvání fáze i regulace amplitudy jde dále zjemnit změnou velikosti vzorků v poli pro generování budicího nebo korekčního signálu, což v tomto případě pro jednoduchost nebylo využito.

Kalibrace se musí provést vždy při rychlé změně některého parametru v analogové části detektoru nebo okolních podmínkách v okolí vysílací a přijímací cívky, kterou už nedokáže vykompenzovat zvolená metoda detekce nebo dlouhodobý plovoucí průměr vstupního signálu počítaný při detekci kovů. Jedná se například o velkou a rychlou změnu vlastností půdy, malou mechanickou deformaci při nárazu soustavy cívek do překážky, rychlý pokles napájecího napětí koncového stupně budicí cívky nebo skokovou změnu teploty. Kalibrace a hlavně její stabilita v čase je velmi důležitá pro statický režim detekce, kde se od klidové hodnoty získané při kalibraci odvozuje pásmo necitlivosti detektoru. Naopak pro pohybový režim není klidová hodnota nebo její malá změna v čase příliš důležitá, ale je vždy dobré mít klidové hodnoty signálu (amplitudu) na co nejnižší úrovni pro co největší měřicí rozsah detektoru.



Obrázek 36 – Vývojový diagram kalibrace detektoru

### 3.2.2 Odladění vlivu země

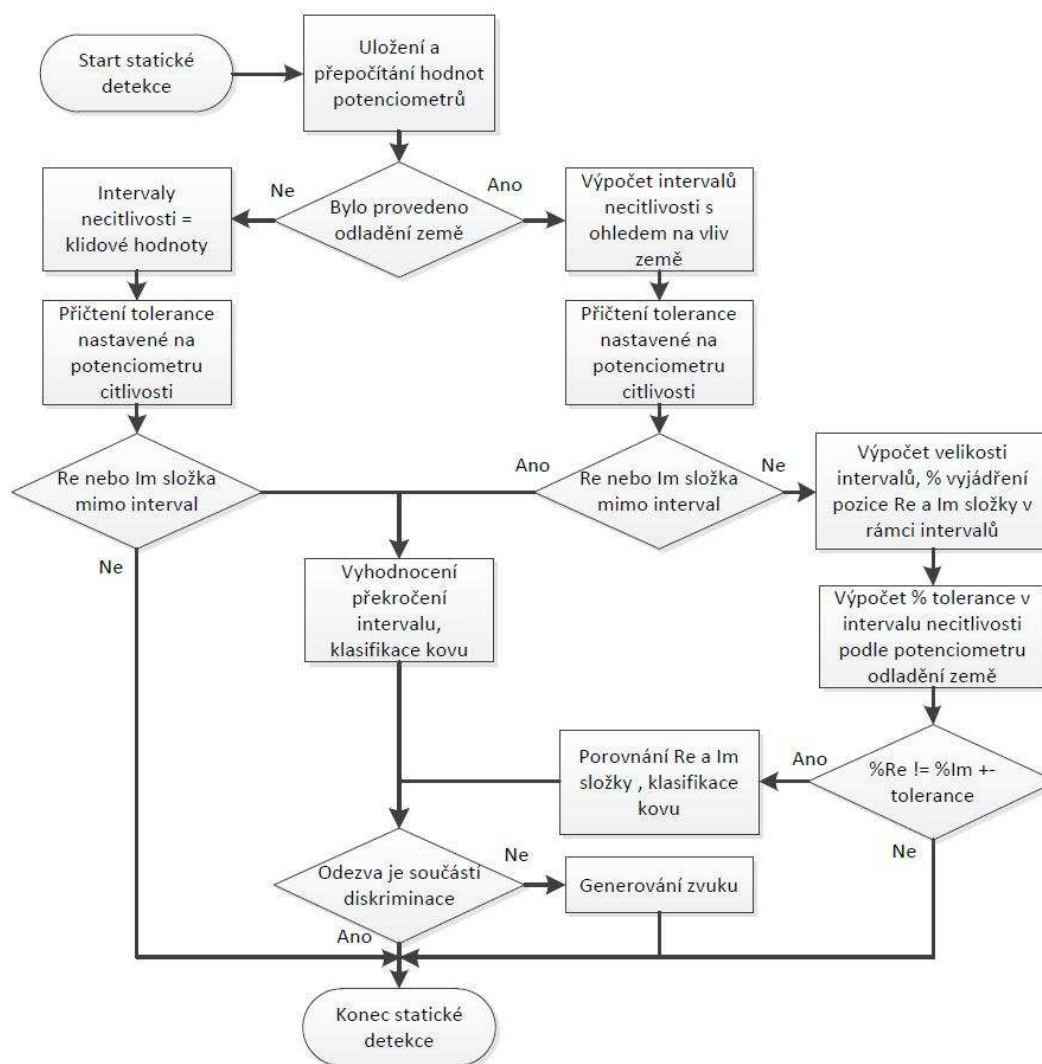
Při práci s detektorem v reálných podmínkách způsobí přiblížení cívky k zemi změnu hodnoty amplitudy a fáze proti hodnotám naměřených ve vzduchu. Tento vliv je

nutné odstranit, protože při procházení terénem by bylo velmi obtížné udržet cívku konstantně nad zemí. Lze předpokládat, že vliv země bude největší těsně nad zemí a nejmenší v největší vzdálenosti od ní. Proto při odladění stačí zaznamenat hodnotu amplitudy a fáze (reálné a imaginární části) signálu u země a ve větší vzdálenosti. Pro lepší odladění se zaznamenává maximální a minimální hodnota vlivu, která je získána z několika pohybů cívky k zemi a od země. Všechny následně změřené hodnoty, které se budou pohybovat v naměřeném nebo vypočteném vlivu země lze v další detekci zanedbat. Odladění vlivu země je tedy stejný proces jako diskriminace kovů, kdy se určitá předem definovaná odezva signálu ignoruje. Bohužel vliv země není všude konstantní a mění se pozvolna vlivem složení půdy, ale i rychle vlivem znečištění půdy kameny, sutí a jinými nekovovými předměty, které způsobí "nehomogenitu" půdy a tím i jinou odezvu proti místu, kde k odladění země došlo. Pomalé změny lze odladovat průběžně pomocí průměru amplitud a fází v místech bez přítomnosti kovů, ale není možné odlišit rozdíl mezi dlouhodobou změnou polohy cívky vůči zemi proti pomalé změně vlastností půdy. Proto vždy při použití takového průměru časem dojde k rozladění detektoru a je nutné provést nové odladění země. Ve výsledku je tedy jedno, jestli se nové odladění země provede kvůli změně vlastností půdy, nebo kvůli změně terénu (polohy cívky nad povrchem), a proto v této práci není tento průměr využíván. Tento průměr lze použít pouze za předpokladu, že se cívka dlouhodobě pohybuje v konstantní vzdálenosti nad terénem, což v praxi nelze splnit. Kvůli rychlým změnám v půdě je pak možnost vliv země vyjádřený uloženými hodnotami zvětšit potenciometrem na předním panelu detektoru. Čím je interval odladění země větší, tím méně vzniká falešných nálezů, ale také se může ingorovat slabá odezva od malých předmětů a tím klesat citlivost detektoru. Uvedené závěry nelze vztahovat na pohybový režim detekce předmětů, u kterého je odladění země využito jiným způsobem, což bude dále popsáno.

### **3.2.3 Detekce a klasifikace kovových předmětů - statický režim**

Statický režim detekce a klasifikace kovových předmětů je nezávislý na rychlosti pohybu cívky nad terénem, takže detekce kovů probíhá na základě porovnání aktuálně měřených hodnot s nějakými referenčními. Pro tento režim detekce bylo využito vyjádření signálu pomocí reálné a imaginární složky získané z procesu kvadrurní demodulace vzorkovaného signálu a jako vstupní hodnoty byly použity výstupy plovoucích průměrů obou složek s délkou 256 navzorkovaných hodnot. V algoritmu tohoto režimu se nejprve provede výpočet dvou intervalů necitlivosti pro reálnou i imaginární složku signálu a dále při jeho překročení se podle směru vychýlení složek signálu vůči intervalu klasifikuje detekovaný kov, což je pomocí uživatelského rozhraní vyjádřeno hlavně generováním tónu s příslušnou frekvencí. Klasifikace kovů je díky negativním jevům popsáným v teoretické části práce u podpovrchových detektorů možná pouze s rozlišením na železné a neželezné kovy a provádí se pomocí směru vychýlení reálné složky vůči imaginární. Pro rozlišení jednotlivých materiálů v daných skupinách by bylo nutné dodržet řadu podmínek, které při použití klasické koncepce detektoru (ruční zařízení, neznámé předměty v neznámé hloubce pod povrchem) nejdou splnit. Pro rozlišené skupiny je pak možnost přepínačem zapnout

diskriminaci, kterým je možné nastavit ignorování některé skupiny (většinou železa). Je možné napsat i algoritmy na diskriminaci konkrétních předmětů, které se projevují konkrétní odezvou (např. železná víčka flašek), ale to pro podpovrchový detektor, u kterého je každý v předmět v neznámé vzdálenosti i poloze od hledací cívky, není spolehlivé, a proto to v algoritmu klasifikace kovů nebylo použito. Velikost intervalů necitlivosti je bez použití odladění země ovlivněna jen potenciometrem citlivosti. Při použití odladění vlivu země jsou stanoveny nové hranice intervalů, které odpovídají odezvě ze vzduchu a u země bez přítomnosti kovu. Protože ignorování celých intervalů po odladění země by velmi snížilo citlivost detekce, je dále v rámci těchto intervalů rozlišován směr vychýlení reálné a imaginární složky. Předpokladem pro tento krok je, že vliv země se projevuje se vzdáleností cívky od povrchu vždy stejně. Aktuální naměřené hodnoty reálné a imaginární složky signálu jsou v rámci intervalů s přihlednutím ke směru vychylování vlivem země přepočítány na procenta velikosti intervalů, takže je možné je mezi sebou porovnávat i přes různou velikost obou intervalů. Pokud se procentuální vyjádření těchto složek od sebe liší více než je nastaveno potenciometrem odladění země, je provedena klasifikace kovu a generován příslušný tón. Statická detekce je tedy především o stanovení intervalů necitlivosti a vyhodnocení směru vychýlení reálné vůči imaginární složce signálu, takže tyto procesy jsou zachyceny ve vývojovém diagramu.

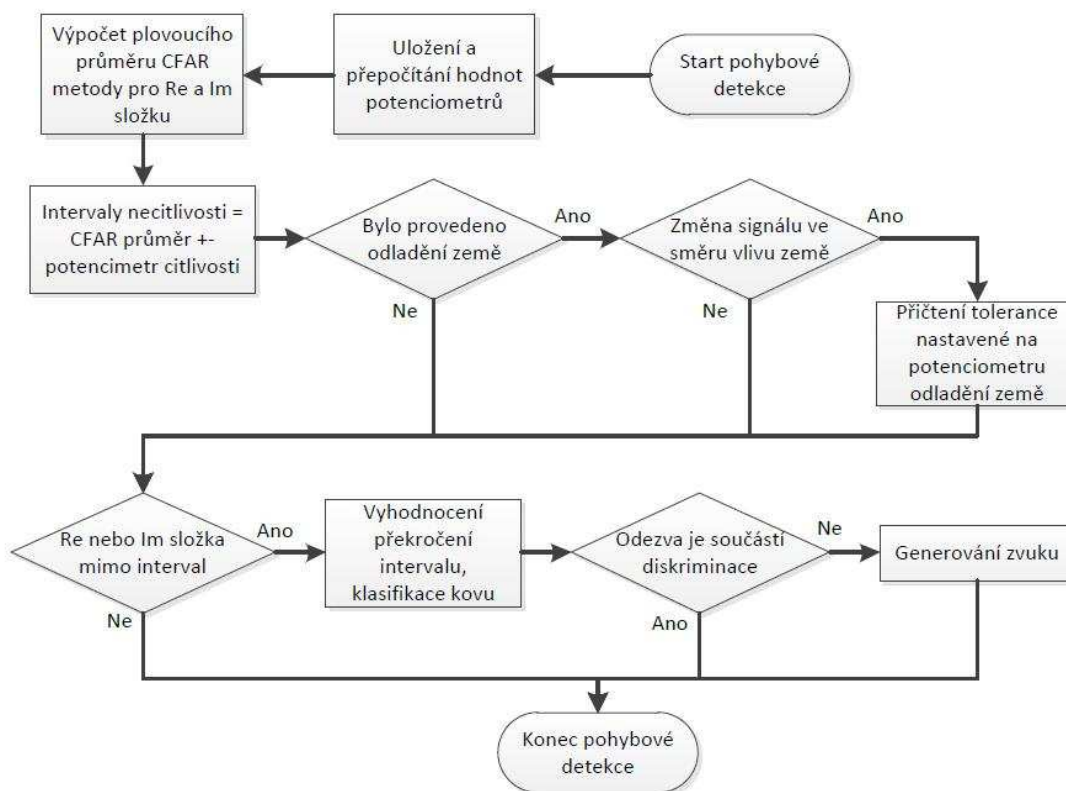


Obrázek 37 - Vývojový diagram statického režimu

### 3.2.4 Detekce a klasifikace kovových předmětů – pohybový režim

Pohybová detekce kovových předmětů pracuje pouze pokud se cívka pohybuje nad hledaným předmětem. Vstupní signál je stejně jako u statického režimu zpracováván pomocí reálné a imaginární složky a vstupní hodnoty do tohoto algoritmu pak odpovídají výstupu plovoucího průměru v obou složkách o délce 256 hodnot. Tento režim vyhledávání předmětů je založen na jednorozměrné metodě CFAR (CA-CFAR) používané při vyhodnocení cílů u radarů. Jedná se o výpočet plovoucího průměru z příchozích vzorků, jehož velikost se porovnává vždy se vzorkem, který se nachází uprostřed pole hodnot vstupujících do tohoto průměru. Výsledek plovoucího průměru je tedy práh, kde při jeho překročení prostřední hodnotou v poli vzorků plovoucího průměru znamená detekování cíle, v tomto případě detekování kovového předmětu. Plovoucí průměr je vypočítáván ze všech vzorků pole plovoucího průměru, kromě právě vyhodnocované hodnoty a dvou okolních hodnot v poli, které se nazývají ochranné buňky. Délka plovoucího průměru byla zvolena na 256 hodnot, což je kompromis mezi rychlostí detekování předmětu, citlivostí detektoru na malé předměty a minimální rychlostí pohybu

cívkou nad terénem. Metoda je lépe vysvětlena v [32]. Pro potřeby detekování kovu je metoda mírně upravena. Do pole hodnot plovoucího průměru nevstupuje absolutní hodnota signálu, takže je kov detekován i pokud je testovaná hodnota v poli menší než práh. Dále byla vypuštěna adaptace velikosti prahu s ohledem na pravděpodobnost falešných detekcí, a předpokladem je proto konstantní úroveň šumu. Po těchto úpravách by představoval práh pouze jedno číslo (necitlivá oblast), takže se dále tento práh rozšíří oběma směry o hodnotu nastavenou na potenciometru citlivosti, kterým se také zvětšuje odolnost proti šumu. Tím vznikne interval necitlivosti detektoru, který nastavuje uživatel až podle skutečných podmínek. Plovoucí průměr vystupující z používané metody tedy představuje střední hodnotu intervalu necitlivosti, která se při každém posunutí vzorků v poli plovoucího průměru mění. Popsaná metoda vyhodnocení je použita pro reálnou i imaginární část vstupního signálu. Klasifikace kovu je stejná jako u statické detekce. Odlišně je pak provedeno odladění země, protože zde nelze využít procentuální vyjádření jako u statické detekce. Pokud je tedy odladění země provedeno a obě složky signálu se mění ve stejném směru jako při vlivu země, jsou intervaly necitlivosti reálné i imaginární složky zvětšeny o hodnotu odpovídající intervalům ovlivnění země, nastavením potenciometru odladění země a pevnou konstantou. Nicméně vliv odladění země v tomto režimu nemá z principu tak velký dopad na falešné detekce nebo na omezení dosahu, takže použití této metody může být v oblastech s velkým vlivem země výhodnější a citlivější než statický režim detekce kovů.



Obrázek 38 - Vývojový diagram pohybového režimu



### 3.2.5 Zaměření předmětu

Režim zaměření předmětu slouží k přesné lokalizaci předmětu v zemi. Předpokladem pro správnou funkci je, že největší odezva (amplituda signálu) od hledaného předmětu je v jeho nejmenší vzdálenosti od středu cívky. Princip funkce je velmi podobný statickému režimu detekce popsanému výše. Na začátku se provede výpočet velikosti intervalů necitlivosti pro reálnou i imaginární složku signálu. Tyto intervaly ovšem slouží pouze k ovládní reproduktoru tak, že pokud se reálná i imaginární složka pohybuje v necitlivém pásmu je reproduktor vypnutý. Pro signál mimo necitlivé pásmo se provede klasifikace předmětu, a pokud není výsledkem odezva spadající do nastavené diskriminace, je reproduktor zapnut. Provádí se tedy kompletní algoritmus statické detekce kovů až na proces generování zvuku. V tomto režimu se negenerují tóny podle výsledků klasifikace předmětu, ale využívá se hodnoty aktuální amplitudy signálu. Podle její velikosti je řízena frekvence tónu, která je nejvyšší při největší odezvě (největší amplitudě signálu). Velikost ovlivnění výšky tónu amplitudou signálu je možné tlačítky nastavit v několika stupních citlivosti. Dále je možné nastavit přeskočení výše popsaného ovládní aktivace reproduktoru a nechat generovat zvuk, i pokud není v dosahu žádný předmět. Detekci předmětu pak provádí sám uživatel detektoru pouze sluchem bez nějakých podpůrných algoritmů. Toto nastavení je velmi podobné jednoduchým absorpčním detektorům, a protože je založeno pouze na hodnotě amplitudy, není možné rozlišit ani železné kovy od neželezných, ale pouze jejich přítomnost pod povrchem.

## 4 Možné modifikace detektoru

Návržený detektor kovu je možné modifikovat i pro jiné způsoby získávání a zpracování signálu. Teoretický princip funkce detekování kovu se ale nijak nemění, a dále zde tedy budou přiblíženy jiné možnosti snímání amplitudy a fáze přijímaného signálu, případně metody pro nahrazení komparátorů, které byly doposud využívány. Všechny dále uvedené postupy bude vždy možné provést bez úprav na hardwaru detektoru, a bude se tedy jednat o změny v softwarovém vybavení, které ale nějakým způsobem změní získávání informací ze signálu.

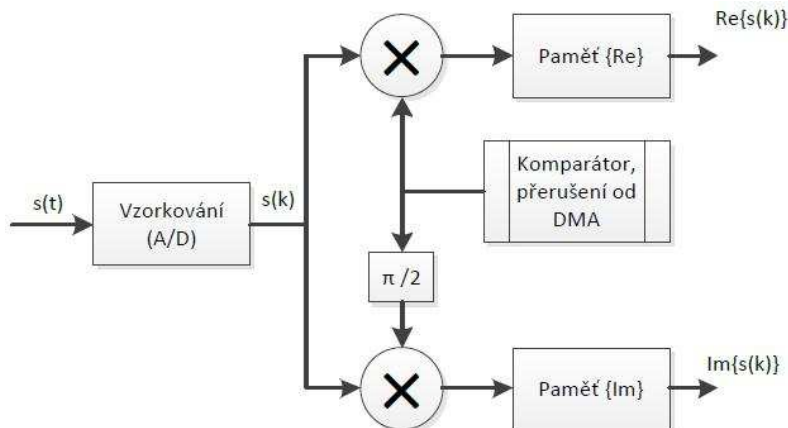
### 4.1 Vysokofrekvenční vzorkování

První možnou modifikací detektoru je vysokofrekvenční vzorkování, u kterého je možné díky velkému počtu vzorků v jedné periodě signálu určovat výpočtem amplitudu a fázi. Největší úprava na perifériích mikroprocesoru bude hlavně nastavení A/D převodníku na větší vzorkovací frekvenci, která bude přímo ovlivňovat přesnost měření. Tato frekvence musí splňovat Nyquistův vzorkovací teorém. Amplitudu signálu bude možné získávat programově pomocí hledání maxima v poli ukládaných vzorků. Funkce sinus je v okolí maxima amplitudy málo strmá, takže přesnost měření amplitudy bude dostatečná už od nízkých vzorkovacích frekvencí. Daleko větší nároky na velikost vzorkovací frekvence bude vyžadovat měření fáze. Minimální krok ve fázi ve stupních signálu bude dán jako  $360/N$ , kde  $N$  je počet vzorků na jednu periodu signálu. Použitelná minimální hodnota je podle praktických testů asi 100 vzorků za periodu, takže pro signál o frekvenci 1KHz bude vzorkovací frekvence A/D převodníku 100kHz. Zvyšováním vzorkovací frekvence pak povede ke zvětšení přesnosti měření fáze (i amplitudy) až do hodnoty omezené především šumem v signálu. Tento způsob měření amplitudy a fáze tedy nepotřebuje pro svoji funkci komparátor na přijímaném signálu, protože se fáze dopočítá z pozice umístění maximální hodnoty v poli uložených vzorků. Velkou nevýhodou je zvětšení výpočetních nároků na jádro procesoru, protože každou hodnotu amplitudy a fáze je nutné dopočítat v reálném čase z velkého počtu převedených hodnot A/D převodníku. Z tohoto důvodu tato metoda není příliš vhodná pro vyhodnocování signálu v detektorech kovu.

### 4.2 Kvadrurní demodulace

Tato metoda byla z části použita i v předchozí kapitole. Jedná se o jinak vyjádřené měření amplitudy a fáze pomocí dvou vzorků za jednu periodu, kde je první vzorek výsledkem převodu A/D převodníku ze vstupního signálu v referenčním časovém okamžiku a druhý vzorek pak převod zpožděný o  $90^\circ$ . Pokud představuje referenční časový okamžik nulovou fázi, tak je první vzorek reálná část a druhý imaginární část komplexního vyjádření přijímaného signálu. Je tedy možné použít vzhledem k vzorkovanému signálu malou vzorkovací frekvenci A/D převodníku, ale zároveň je nutné použít převodník s dostatečně krátkým výběrovým oknem, aby spektrum výběrového okna příliš nezkruslovalo vzorkovaný signál. Tento parametr ale A/D převodník v mikroprocesorech řady STM32f4 splňuje s velkou rezervou, a proto je tato metoda

vzorkování vhodná i pro tento detektor. Metoda kvadrurní demodulace plně zastoupí vysokofrekvenční vzorkování nebo případné využití komparátoru na přijímaném signálu, ale vyjádření pomocí reálné a imaginární složky signálu poněkud ztíží kalibraci detektoru. Při kalibraci je totiž nutné fázově posunout pole vzorků korekčního signálu vůči budicímu, což se daleko lépe počítá ze znalosti fáze vyjádřené ve stupních.



Obrázek 39 - Blokové schéma kvadrurní demodulace

### 4.3 Softwarové nahrazení komparátorů

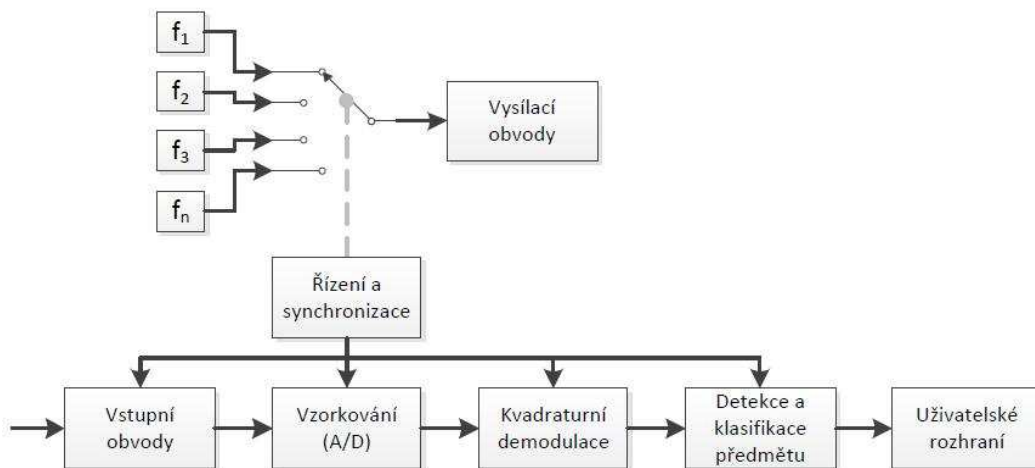
V obou výše uvedených případech není sice potřeba komparátor na přijímaném signálu, ale je nutné pro měření fáze stanovit nějaký referenční časový okamžik, od kterého bude fáze přijímaného signálu měřena. Tento bod musí být vztažen k budicímu signálu generovanému D/A převodníkem a nesmí v čase fluktuovat, jinak by fluktovala i absolutní naměřená fáze vůči vysílanému signálu. V této práci byl k synchronizaci použit komparátor detekující průchod nulou na Tx signálu a pro jeho nahrazení jsou reálně dostupné tři způsoby synchronizace. První je pomocí časovače, který má periodu stejnou jako výstupní signál. Tento způsob by sice zaručil pevný referenční bod, který by ale byl určen pouze relativně, což by znamenalo i relativní určení fáze mezi vysílaným a přijímaným signálem. Bylo by tedy možné určit pouze změnu fáze. Druhým způsobem je generování přerušení od dokončení D/A převodu. Proti použití časovače má jistou výhodu díky možnosti určit fázi mezi signály absolutně, ale toto přerušení je generováno s každým novým převáděným vzorkem z pole vzorků, což by při velkém počtu vzorků na jednu periodu signálu výrazně zatížilo jádro procesoru díky velmi časté obsluze tohoto přerušení. Třetí způsob se nabízí při použití generování signálu pomocí DMA, kde je výstupní signál daný číselnou posloupností v poli vzorků, které se opakují. Použitá řada mikroprocesorů STM32f4 umožňuje vygenerovat přerušení od nulové hodnoty offsetu pro adresování pole vzorků, takže pokud toto pole představuje jednu periodu signálu, je vygenerováno přerušení také každou periodu signálu. Toto přerušení plně nahradí komparátor detekující průchod nulou na vysílaném signálu, a je to tedy pro tento případ nejvhodnější způsob synchronizace bez použití komparátorů.

## 4.4 Vícefrekvenční buzení cívky

Jak již bylo uvedeno v teoretické části práce, tak vícefrekvenční buzení vysílací cívky může v některých případech vylepšit citlivost a hloubkový dosah detektoru. Generování takového signálu je stejné jako pro jednofrekvenční buzení, tzn. pomocí D/A převodníku a nějaké číselné posloupnosti vzorků uložených v poli se tyto číselné vzorky postupně převádí na příslušné napěťové úrovně. Pro generování více frekvencí najednou se pouze použije posloupnost vzorků, která vznikne sečtením příslušných hodnot se stejnou fází ostatních posloupností, které představují jednotlivé frekvence obsažené ve výsledném signálu. Aby při opakování posloupnosti nenastala skoková změna fáze, je nutné zvolit frekvence, které budou mít v posloupnosti celý počet period a budou tedy celočíselným násobkem nějaké základní frekvence. Volbou amplitudy jednotlivých frekvenčních složek v signálu lze výrazně měnit výsledný tvar signálu v časové oblasti, a proto se pro tento případ nedají nijak použít komparátory. Referenční bod pro měření fáze je pak nejlepší řešit pomocí DMA v přerušení generovaném při nulovém offsetu při adresaci z pole vzorků pro D/A převodníky, jak bylo popsáno výše. Větším problémem pak bude zpracování signálu a hlavně kalibrace detektoru, kde bude nutné nastavit fázi korekčního signálu tak, aby se každá z frekvencí odčítala na rozdílovém zesilovači ve fázi s příslušnou frekvencí v přijímaném signálu. To samé pak platí i pro amplitudy a bylo by tedy nutné regulovat amplitudy pomocí změny velikosti číselných vzorků v paměti mikroprocesoru. Každá frekvenční složka signálu má totiž na všech prvcích jiný fázový posun, případně jiné zesílení, než ostatní složky. Jinak řečeno bude nutné na rozdílovém zesilovači dosáhnout takového tvaru korekčního signálu, který bude odpovídat tvaru přijímaného signálu. Dále popsané metody budou využívat výše popsané metody vzorkování a budou se tak na ně vztahovat i stejné závěry jako při použití metod pouze pro jednu budicí frekvenci. Bude se jednat hlavně o přesnost měření, která bude dána vzorkovací frekvencí A/D převodníku. Vzorkovací frekvence pak přímo ovlivní hlavně přesnost měření fáze, ale při použití FFT i velikost amplitudy.

### 4.4.1 Vyhodnocení pomocí přepínání frekvencí

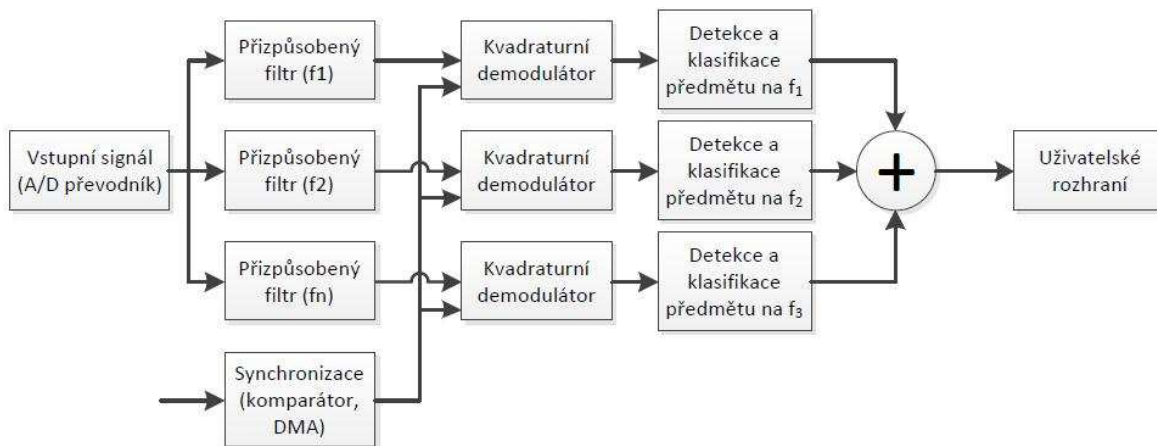
Prvním způsobem jak řešit zpracování signálu a kalibraci detektoru při použití vícefrekvenčního buzení je postupné přepínání frekvencí. Budicí signál by tedy byl vždy jednofrekvenční a po nějakém časovém úseku by se frekvence signálu změnila na jinou hodnotu a tento proces by se neustále opakoval. Kalibrace by pak byla provedena způsobem popsaným v předchozí kapitole, ale pro každou frekvenci zvlášť, a její výsledek ve formě nastavení příslušných digitálních potenciometrů by byl uložen v paměti mikroprocesoru. Tento způsob je při použití více frekvencí pro buzení vysílací cívky nejjednodušší, ale s rostoucím počtem frekvencí roste i časová odezva detektoru na nalezený kov z důvodu potřebného času pro změnu, změření a vyhodnocení signálu všech použitých frekvencí.



Obrázek 40 - Blokové schéma přepínání frekvencí

#### 4.4.2 Vyhodnocení pomocí korelace

Kalibrace i vyhodnocení přijímaného signálu je možné provádět i pro všechny použité frekvence najednou. Prvním způsobem je například rozdělení signálu na více větví, kde by paralelně v každé větvi probíhalo vyhodnocení amplitudy a fáze přijímaného signálu o určité frekvenci. Synchronizace i generování signálu by bylo stejné jako v předchozí uvedené metodě. Základem takového algoritmu by byl určitý počet přizpůsobených filtrů, pomocí kterých by bylo možné oddělit žádanou frekvenci od ostatních. Přizpůsobený filtr provádí korelaci hledaného signálu se vstupním signálem, a proto při nalezené shodě by bylo možné z maxima výstupního průběhu (maximum korelace) určit fázi signálu příslušné frekvence vzhledem k referenčnímu časovému okamžiku a zároveň i určit amplitudu signálu, která by byla přímo úměrná hodnotě na výstupu filtru. Měření amplitudy a fáze by na výstupním signálu z filtru bylo možné provádět i následnou kvadraturní demodulací popsanou výše, protože na výstupu filtru by byla číselná posloupnost představující vzorky navzorkovaného sinusového signálu. Při výpočtu hodnot přizpůsobených filtrů by byly dobře využity schopnosti použitého mikroprocesoru, protože základem pro výpočet je instrukce "vynásob a sečti", což je základní instrukcí DSP mikroprocesorů, kterou obsahuje i jádro použitého mikroprocesoru STM32f407. Výhodou by byly také výpočty v pohyblivé řádové čárce, které tento mikroprocesor umožňuje provádět většinou během jednoho instrukčního cyklu. Jistou překážkou pro efektivní realizaci takového algoritmu by bylo programování v jazyku symbolických adres (assembler), což by bylo obtížnější než předchozí metody naprogramované v jazyce C. K programování je ovšem možné využít i ukázkový příklad FIR filtru připravený od výrobce mikroprocesoru, který lze nalézt v [28], v sekci CMSIS DSP Library.

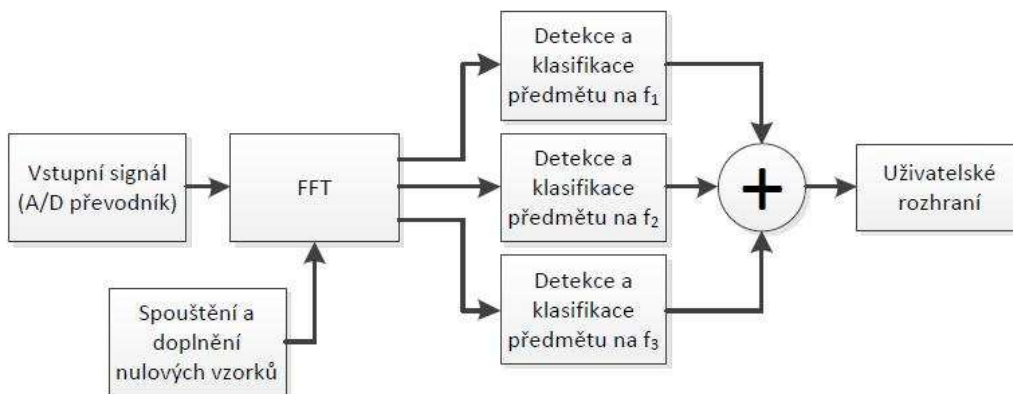


**Obrázek 41 - Blokové schéma použití přizpůsobených filtrů**

#### 4.4.3 Vyhodnocení pomocí FFT algoritmu

Dalším způsobem vyhodnocení všech frekvencí najednou je použití FFT algoritmu. Výstupem z tohoto algoritmu je pole komplexních koeficientů, které pro příslušnou frekvenční složku signálu popisuje amplitudu a fázi (diskrétní spektrum). Stejně jako v předchozím případě by byla nutná synchronizace, která by stanovila časový okamžik začátku vzorkování signálu pro získání diskretních vzorků vstupujících do algoritmu. Vzorkování a výpočet FFT má v tomto případě i omezení, která je nutné pro nezkrácený výsledek dodržet. Výpočet se provádí z nějaké diskretní posloupnosti vzorků s konečnou délkou ( $N$ ), a proto je možné tento výběr považovat za finitní signál a ostatní okolní vzorky mimo algoritmus považovat za nulové. Pro správný převod těchto vybraných vzorků na jejich spektrum pak musí platit, že zpětná FFT z takto vypočítaného spektra vzorků vrátí původní vzorky dané posloupnosti, které vstupovaly do výpočtu. Tato podmínka platí vždy, ale pokud se zpětná FFT rozšíří i na ostatní intervaly signálu přesahující délkou původní posloupnosti ( $N$ ), musí být výsledkem původní navzorkovaný periodický signál, ze kterého původní finitní signál vzniknul. Tento proces je dodržen pouze tehdy, pokud je počet vzorků FFT algoritmu celočíselným násobkem počtu vzorků jedné periody zkoumaného signálu (nejmenší frekvence v signálu). Při nedodržení výše popsané podmínky by pak ve výsledném spektru byly nenulové koeficienty i u okolních kmitočtů, než který by ve skutečnosti daný signál obsahoval, což by přinášelo šum do výsledků FFT algoritmu. Bylo by sice možné ze znalosti použitých frekvencí tento šum vynulovat, ale byly by jím zkresleny i koeficienty zkoumaných frekvencí. Další podmínkou pro rychlý výpočet DFT (FFT), je počet vzorků v algoritmu, který musí být možné vyjádřit jako mocnina dvou. Počet vzorků v algoritmu ovlivní i rozdíl mezi frekvencemi dvou sousedních vypočítaných koeficientů. Musí se tedy zvolit dostatečný počet koeficientů vstupujících do algoritmu ( $N$ ), který zajistí jemné rozdělení frekvenčního spektra na  $N$  částí, mezi kterými budou i zkoumané frekvence v přijímaném signálu. Vstupní vzorky FFT algoritmu tedy mohou pro zjemnění obsahovat více než jednu celou periodu nejmenší frekvence obsažené v signálu, a pokud se tento počet nebude rovnat přesně mocnině dvou, je možné ho do této hodnoty doplnit nulovými vzorky. S rostoucí délkou FFT ale roste i výpočetní náročnost, proto lze v případě dodržení výše popsaných podmínek použít i

malou délku FFT algoritmu (minimálně jednu periodu signálu), u kterého bude spektrum rozděleno hrubě, ale některé jednotlivé koeficienty budou představovat přesně frekvence obsažené ve zkoumaném signálu. Tuto podmínku je možné splnit, protože hodnoty všech frekvencí jsou známy a hlavně volitelné už při generování budicího signálu.



**Obrázek 42 - Blokové schéma použití FFT**

Pro splnění všech podmínek bude nutné zvolit vhodnou vzorkovací frekvenci A/D převodníku vzhledem k délce FFT algoritmu, k přesnosti výpočtu koeficientů a současně i k vybraným frekvencím obsažených v budicím signálu. Také jako v případě programování přispůsobených filtrů je k programování díky náročnosti na hardware mikroprocesoru výhodnější použít assembler a je i možné využít předem připravenou ukázkou FFT algoritmu od výrobce mikroprocesoru [28].

## 5 Naměřené parametry

Parametry a schopnosti navrženého detektoru lze nejlépe vyjádřit pomocí naměřených hodnot. Pro statický a pohybový režim detekce bylo využito vyjádření signálu pomocí reálné a imaginární složky získané z procesu kvadraturní demodulace, takže i v následujících tabulkách budou tyto hodnoty uvedeny. Všechny naměřené hodnoty jsou úměrné vstupnímu napětí na vstupu A/D převodníku podle následujícího vztahu.

$$AD = \frac{V_{IN} \cdot (2^N - 1)}{V_{REF}}$$

kde  $AD$  - výsledek A/D převodu [-]

$V_{IN}$  - vstupní napětí na vstupu A/D převodníku [V]

$N$  - počet bitů A/D převodníku [-]

$V_{REF}$  - napájecí napětí A/D převodníku (mikroprocesoru) [V]

Mikroprocesor STM32f407 má 12bitový A/D převodník a napájecí napětí je podle návrhu zdrojové části detektoru 3V. Vstupní napětí je omezeno hardwarem detektoru na interval od 0V do 3V a vstupní analogový signál má střední hodnotu 1,5V. Pokud tedy na vstup není přiveden střídavý signál, vrací A/D převodník vzorek s hodnotou 2048 (2047). Pro zpřesnění celočíselných plovoucích průměrů z měřených hodnot a celočíselnému zpracování je výsledek převodu v programu normován na hodnoty v rozsahu od 0 do 10000 podle následujícího vztahu.

$$AD_{NORM} = \frac{AD \cdot 10000}{2^N - 1}$$

kde  $AD_{NORM}$  - normovaný výsledek A/D převodu [-]

$AD$  - výsledek A/D převodu [-]

$N$  - počet bitů A/D převodníku [-]

Takto jsou převedeny všechny hodnoty reálné a imaginární složky, takže lze vzorky signálu pomyslně zakreslit do komplexní roviny se středem v bodě [5000,5000]. Maximální možná amplituda je tedy dána kružnicí o poloměru 5000. Pokud je v některých následujících tabulkách tato amplituda překročena, byl výstupní signál posledního zesilovacího stupně před A/D převodníkem díky omezení napájecím napětím v limitaci, tzn. na vstupu A/D převodníku byl harmonický signál s oříznutými vrcholy. Pro detekci a klasifikaci signálů ovšem nejsou podstatné absolutní velikosti reálné a imaginární složky signálu, ale jejich rozdíly proti klidovým hodnotám, kdy v dosahu cívky detektoru není žádný kov, protože klidové hodnoty se mění vždy podle výsledku kalibrace detektoru a podle vlivu některých rušivých hodnot a jejich změn v čase (napětí akumulátorů).



## 5.1 Hloubkový dosah a klasifikace kovů

Pro otestování hloubkového dosahu a schopnosti klasifikace kovů bylo provedeno měření na objektech jednoduchých tvarů. Pro všechny typy předmětů byly změřeny hodnoty v horizontální (H) i vertikální (V) poloze. V obou polohách byly předměty umístěny svojí větší plochou rovnoběžně s plochou Tx a Rx cívky, nebo rovnoběžně s větším rozměrem oblasti překryvu Tx a Rx cívky, a v případě některých předmětů byly použity oba parametry umístění současně. Uvedené hodnoty v tabulkách představují rozdíly reálných a imaginárních složek naměřeného normovaného signálu od klidových normovaných hodnot uvedených v levé horní části tabulek. Na posledním řádku v obou tabulkách jsou pak uvedeny maximální dosahy na dané předměty v daných polohách za použití statického režimu detekce, bez odladění vlivu země. Všechny hodnoty jsou měřeny při frekvenci signálu 2,5kHz s použitím hledací cívky o průměru 26cm "ve vzduchu" a nejsou tak zkresleny vlivem země.

Tabulka 1 - Měření mincí

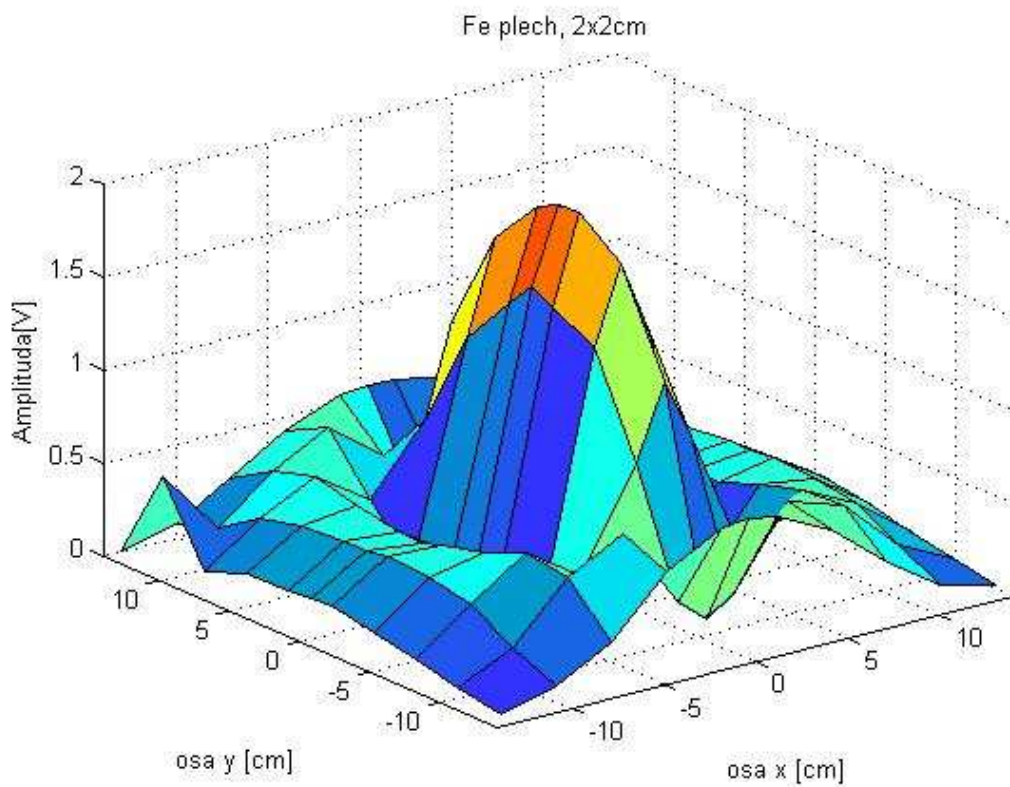
Klid.hodnoty		Druh mince												
Re	5310	1 Kč		2 денари		50 BANI		100Forint		6Kreucer-Ag		20Corone-Au		
Im	4112	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	
Vzdálenost od cívky [cm]	0	Re	+4689	-5304	+4670	-5389	+2570	-5190	+4689	-5301	-220	+2580	+90	+900
		Im	-1740	+1160	-4111	+5887	-4111	+5887	+660	-910	-1462	+5180	-2600	+5274
	5	Re	+2260	-1110	+460	-510	+240	-265	+3760	-1750	-40	+52	-40	+57
		Im	-135	+100	-1135	+1170	-855	+820	+255	+54	-287	+351	-682	+753
	10	Re	+673	-170	+83	-160	+53	-70	+1233	-290	+5	+15	0	+5
		Im	0	+48	-130	+400	-132	+300	+90	+70	-10	+55	-10	+146
	15	Re	+140	-10	+15	-40	+5	-10	+310	-20	0	+5	-5	+3
		Im	-3	+15	-23	+140	-23	+100	+27	+32	-10	+12	-5	+40
	20	Re	+55	-10	+5	-10	-5	0	+95	+10	x	x	0	+5
		Im	+8	+20	+3	+138	-2	+140	+8	+20	x	x	+5	+15
	25	Re	+15	+5	-7	0	-10	0	+20	+10	x	x	x	x
		Im	+2	-2	0	+10	+10	+5	+10	+5	x	x	x	x
	dosah [cm]		26	15	12	23	13	24	23	14	8	11	12	20

Tabulka 2 - Měření drátů a závitů

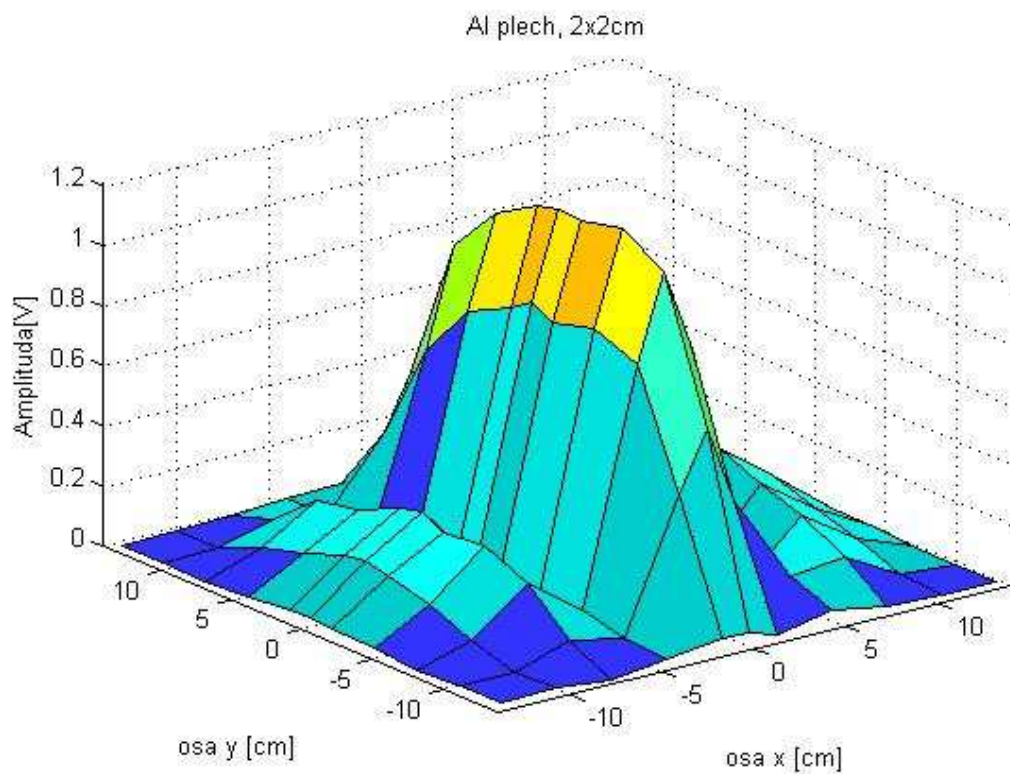
Klid.hodnoty		Druh objektu [závit Ø42mm, drát 8cm], Fe průřez 4mm <sup>2</sup> , Cu a Al průřez 5,5mm <sup>2</sup>												
Re	5400	drát - Fe		drát - Al		drát - Cu		závit - Fe		závit -Al		závit - Cu		
Im	4480	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	
Vzdálenost od cívky [cm]	0	Re	+1480	+4540	+5	-10	-80	-120	+4585	-5380	-4	+5	+4596	-5400
		Im	+2400	+4850	+266	+540	+540	+770	+1620	+130	+20	-69	-4480	+2405
	5	Re	+2440	+80	0	0	0	0	+2800	-3932	0	0	+4501	-5389
		Im	+910	-5	-15	+30	-15	+20	+210	+400	+10	+50	-3930	+5410
	10	Re	+725	+170	-3	0	-10	-5	+910	-450	0	0	+900	-4250
		Im	+260	0	0	+10	0	+20	+190	+300	+5	+32	-580	+2890
	15	Re	+150	-10	0	0	-10	-10	+190	-30	-3	0	+40	-830
		Im	+40	0	0	0	0	+10	+50	+80	+4	+10	-30	+561
	20	Re	+75	+15	x	x	0	+5	+70	-20	0	-1	0	-380
		Im	+15	0	x	x	0	+1	+25	+40	0	+5	+10	+250
	25	Re	+30	0	x	x	x	x	+30	0	x	x	+5	-20
		Im	+10	0	x	x	x	x	+5	+10	x	x	-5	+75
	dosah [cm]		25	18	6	12	7	13	31	22	10	16	20	36

## 5.2 Citlivost hledací cívky

Dalším režimem často používaným v detektorech kovu je kromě statického a pohybového režimu i režim zaměření předmětu. Pro tuto funkci je velmi důležité prostorové rozložení citlivosti hledací cívky v rámci její plochy. Proto bylo provedeno měření citlivosti pomocí železného a hliníkového plechu o rozměrech 2x2cm, který se vyskytoval v předem určeném rastru 6cm nad hledací cívkou a byl orientován svoji větší plochou rovnoběžně s plochou hledací cívky. Celkové rozměry použitého rastru byly zvoleny 27x27cm, aby pokryly celkové rozměry soustavy Tx a Rx cívek. Osa y tohoto rastru byla rovnoběžná s větším rozměrem oblasti překryvu Tx a Rx cívky a osa x pak byla rovnoběžná s rotační osou plastového šroubu spojujícího soustavu cívek k nosné tyči detektoru. Protože v režimu zaměření předmětu je předmět vyhodnocován pomocí výšky tónu uživatelem detektoru, jsou výsledky měření zobrazeny ve formě 3D grafu, což lépe než hodnoty v tabulce vystihne možnosti zaměření předmětu v okolí hledací cívky. Tabulka naměřených hodnot je dostupná na přiloženém CD. Pro tato měření byly také zaznamenány normované rozdíly hodnot reálné a imaginární složky od normovaných klidových hodnot a výsledná amplituda pak byla z těchto hodnot vypočítána a její velikost odnormována zpět na velikost amplitudy signálu na vstupu A/D převodníku. Při měření byla frekvence budicího signálu nastavena na 2,5kHz.



**Obrázek 43 - Citlivost cívky pro železné kovy**



**Obrázek 44 - Citlivost cívky pro barevné kovy**

### 5.3 Vliv země, frekvence a průměru hledací cívky

Ostatní vlivy, které působí na měřený signál, jsou zobrazeny ve dvou následujících tabulkách. V první je přiblížena velikost vlivu země, která je různá pro různé frekvence budicího signálu. Jsou uvedeny normované rozdíly od normovaných klidových hodnot změřených "ve vzduchu", ze kterých je patrná míra ovlivnění signálu zemí. Hodnoty jsou pouze orientační, jejich maximální a minimální hodnoty jsou zaznamenány v okruhu několika metrů vždy co nejbíže u země. Tyto hodnoty se mohou lišit podle lokalit a ostatních vlastností detektoru (např. hledací cívky, budicího proudu Tx cívky atd.). Bohužel je výsledek měření vlivu země poněkud zkreslen právě změnou budicího proudu Tx cívky při změně frekvence signálu, a proto je uvedena i druhá tabulka, kde je tento vliv vyjádřen jednoduše (bez vlivu země) pomocí dosahu statické detekce kruhových závitů měřených výše. Závitů bylo umístěno svojí větší plochou rovnoběžně s plochou hledací cívky. Při analýze dat lze tedy provést korekci změny impedance cívky, která budicí proud ovlivňuje.

Tabulka 3 - Vliv země v závislosti na frekvenci a průměru hledací cívky

Vliv země X frekvence X průměr cívky								
			Hledací cívka Ø11cm			Hledací cívka Ø26cm		
			klidové hodnoty	minimální rozdíl	maximální rozdíl	klidové hodnoty	minimální rozdíl	maximální rozdíl
frekvence [kHz]	2,5	Re	6430	+220	+570	5650	+320	+610
		Im	4400	+20	-45	4320	-40	-58
	5	Re	6310	+120	+290	4960	+390	+400
		Im	4522	-22	-42	4090	-40	-117
	10	Re	5000	+130	+205	6080	+170	+255
		Im	5160	-10	-12	4780	-280	-448

Tabulka 4 - Vliv průměru hledací cívky a frekvence signálu na dosah

Dosah[cm] X frekvence X průměr cívky							
		Hledací cívka Ø11cm			Hledací cívka Ø26cm		
		závit Fe	závit Al	závit Cu	závit Fe	závit Al	závit Cu
frekvence [kHz]	2,5	10	11	16	22	16	36
	5	15	12	20	21	13	29
	10	12	10	18	18	10	24

## Závěr

Podařilo se navrhnout podpovrchový detektor kovu, který splňuje všechny podmínky dané zadáním této práce. V teoretické části byly popsány dva principy detekce kovů, které mají vliv na odezvu podpovrchových detektorů, ale i všechny negativní jevy, které tyto principy provázejí. Právě tyto jevy nejvíce ovlivnily návrh hardwaru i softwaru detektoru, ale také výrazně omezují možnosti jakéhokoliv ručního podpovrchového detektoru kovu. Jedná se hlavně o hloubkový dosah, který je při detekci nejdůležitější. Bohužel ten ovlivňuje mnoho parametrů popsanych v teoretické části práce, které jsou na sobě často závislé a jednotlivé parametry nejdou vykompenzovat bez současného zhoršení ostatních parametrů. Typickým příkladem pro zvětšení dosahu detektoru je zvětšení průměru hledací cívky, díky kterému se sice zvýší indukčnost a tím i velikost magnetického pole generovaného cívkou, ale současně se zvětší i její impedance a klesne tak při stejném napájecím napětí velikost budicího proudu cívkou, což zase velikost magnetického pole zmenší. K tomu lze ještě přičíst vliv frekvence budicího signálu, kde se s rostoucí frekvencí také zvyšuje impedance, ale zároveň dochází k většímu generování vířivých proudů v hledaných předmětech, což dosah detektoru zvětšuje. Vířivé proudy se ale s větší frekvencí zvyšují i v okolní půdě, ve které je předmět umístěn, což dosah detektoru snižuje. Najít nejlepší průnik mezi všemi parametry je velmi obtížné a navíc i závislé na lokalitě kde se detektor používá. Důležitý je i předpoklad pro jaký účel se bude detektor používat. Při srovnání naměřených výsledků s běžně prodávaným detektorem, který pracoval na frekvenci 17kHz s téměř stejně velkou hledací cívkou, byly zaznamenány velké (dvonásobné) rozdíly v hloubkovém dosahu v závislosti na materiálu hledaného předmětu. Použití nižších frekvencí (2,5kHz) je vhodné pro detekci železných cílů ale nevhodné pro detekci dobře vodivých předmětů (stříbro, zlato) a opačně pak pro vyšší frekvence (17kHz). Tato závislost je dobře vidět z naměřených hodnot mincí uvedených v poslední kapitole, kde byl hloubkový dosah na stříbrné a zlaté mince proti železným velmi malý.

Pro klasifikaci předmětu, tedy rozpoznání materiálu daného předmětu nebo typu předmětu, jsou důležité hlavně jeho rozměry, tvar, vzdálenost od hledací cívky i jeho natočení vůči hledací cívce. Bohužel všechny tyto parametry jsou pro podpovrchové detektory neznámé, proto nelze z principu spolehlivě rozlišovat jednotlivé typy předmětů mezi sebou, ale nelze ani rozlišit materiály hledaných předmětů. Rozlišení tedy probíhá pouze mezi železnými a neželeznými kovy, takže detekované kovy jsou řazeny do dvou skupin představující malou a velkou relativní permeabilitu materiálu. Snadno lze ovšem například při natáčení předmětu v okolí cívky dosáhnout opačné detekce, takže klasifikace je pouze orientační. Ze stejných důvodů nelze pro neznámé předměty stanovit přesnou hloubku předmětů v zemi (vzdálenost od hledací cívky). Tyto jevy jsou dobře patrné z naměřených hodnot mincí, drátů a závitů v různých polohách z různých materiálů uvedených v poslední kapitole.

Přes všechny výše uvedené problémy byl detektor navrhován tak, aby měl co nejlepší citlivost na malé předměty a zároveň co nejlepší možnou klasifikaci kovů alespoň do výše zmíněných dvou skupin, která velmi závisí na stabilitě a šumu celého zařízení. Zvyšování citlivosti a tím i dosahu lze při návrhu docílit hlavně zvětšením napájecího napětí, které umožní větší napěťový rozkmit budicího signálu. Bohužel se při návrhu a testech nepodařilo pro zvětšení tohoto napětí odladit DC-DC měnič, aby nerušil okolní obvody a nezvyšoval tak nežádoucí šum, který je nutné udržet pro dobrou citlivost, hloubkový dosah a klasifikaci na nízké úrovni. Hlavně pro kompenzaci zbytkového nežádoucího vstupního signálu byla navržena analogová část detektoru, díky které lze zvětšit celkové zesílení detektoru bez přebuzení A/D převodníku, a tím velmi zlepšit citlivost detekce. Zároveň je možné pomocí digitální části detektoru řídit důležité prvky v analogové části, takže je vytvořený hardware detektoru velmi univerzální a lze jen pomocí změny programu v mikroprocesoru měnit i základní principy zpracování signálu. Změnou programu v mikroprocesoru a zvolenou metodou zpracování signálu lze výrazně ovlivnit citlivost i dosah detektoru. I přes základní softwarové vybavení a vytvoření všech prvků detektoru v domácích podmínkách bylo dosaženo poměrně dobrých a stabilních výsledků, které jsou patrné z naměřených hodnot uvedených v poslední kapitole.

## Literatura

- [1] **ZAJÍC, Jan. 2004.** Fyzika II (Elektřina a magnetismus). Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-641-9.
- [2] **VYBÍRAL,Bohumil.** Elektromagnetická indukce (Elektrodynamika 3) : Studijní text pro soutěžící FO a ostatní zájemce o fyziku [Online]. [200-?]. [Citace: 20. 11. 2012]. Dostupný z WWW: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/indukce.pdf>
- [3] **BRUSCHINI, Claudio. 2002.** A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining [Online]. [2002]. [Citace: 14. 11. 2012]. Dostupný z WWW: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.117.7277&rep=rep1&type=pdf>
- [4] **NDT Resource Center.** Mutual Inductance (The Basic for Eddy Current Inspection) [Online]. [200-?]. [Citace: 21. 11. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/mutualinductance.htm>
- [5] **NDT Resource Center.** Display – Complex Impedance Plane (eddy scope) [Online]. [200-?]. [Citace: 22. 11. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Instrumentation/impedanceplane.htm>
- [6] **NDT Resource Center.** Depth of Penetration & Current Density [Online]. [200-?]. [Citace: 22. 11. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.htm>
- [7] **RICHTER, Rostislav.** Mikroelementy v půdě [Online]. [2007]. Brno: Ústav agrochemie a výživy rostlin, 2007 [Citace: 29. 11. 2012]. Dostupný z WWW: [http://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/vyziva\\_rostlin/html/agrochemie\\_pudy/puda\\_mikroelementy.htm](http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_mikroelementy.htm)
- [8] **VOJÁČEK, Antonín.** Princip citlivého detektoru kovů pro průmysl [Online]. [2006]. [Citace: 18. 11. 2012]. Dostupný z WWW: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006041701>
- [9] **NDT Resource Center.** Phase lag [Online]. [200-?]. [Citace: 29. 11. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/phaselag.htm>

- [10] **KEMPNÝ, Milan.** Moderné systémy detekcie kovov [Online]. [200-?]. Bratislava: FEI STU Bratislava. [Citace: 30. 11. 2012]. Dostupný z WWW: [http://www.kme.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/SOBO/Moderne\\_systemy\\_detekcie\\_kovov2.pdf](http://www.kme.elf.stuba.sk/kme/buxus/docs/predmety/SOBO/Moderne_systemy_detekcie_kovov2.pdf)
- [11] **JARCHOVSKÝ, Z, SOCHÁŇ, P.** Soustava cívek s nulovou vzájemnou indukčností [Online]. [200-?]. [Citace: 28. 11. 2012]. Dostupný z WWW: [http://www.hq-elektronic.eu/data/patent\\_z\\_jarch.pdf](http://www.hq-elektronic.eu/data/patent_z_jarch.pdf)
- [12] **NDT Resource Center.** Introduction to Eddy Current Testing [Online]. [200-?]. [Citace: 29. 11. 2012]. Dostupný z WWW: [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc\\_ec\\_index.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm)
- [13] **SKULA, David.** Základní prvky konstrukce elektronického kompasu. Elektrovue [Online]. [2009], roč 2009, č. 26 [Citace: 29. 11. 2012], s. 1-6. Dostupný z WWW: <http://www.elektrovue.cz/cz/download/zakladni-prvky-konstrukce-elektronickeho-kompasu-2/>. ISSN 1213-1539
- [14] **SCHÜLLER, Wolfgang. 2004.** Vyhledávací technika pro profesionály. Překlad Jan Hájek. Praha : Nakladatelství BEN – technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-85-6.
- [15] **Texas Instruments.** LM27313/LM27313Q [Online]. [2006]. [Citace: 3. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm27313.pdf>
- [16] **National Semiconductor.** LM158/LM258/LM358/LM2904 [Online]. [1994]. [Citace: 4. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS007787.PDF>
- [17] **Diodes, Inc. AP1117** [Online]. [2011]. [Citace: 4. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.diodes.com/datasheets/AP1117.pdf>
- [18] **Microchip.** MCP1802 [Online]. [2007]. [Citace: 4. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22053C.pdf>
- [19] **BELZA, Jaroslav. 2004.** Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky. Praha : Nakladatelství BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-115-2.
- [20] **STMicroelectronics.** TL072A – TL072B [Online]. [2001]. [Citace: 5. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2298.pdf>
- [21] **Microchip.** MCP414X/416X/424X/426X [Online]. [2008]. [Citace: 5. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22059b.pdf>



- [22] **Texas Instruments.** TPA3121D2 [Online]. [2010]. [Citace: 5. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3121d2.pdf>
- [23] **Texas Instruments.** LM4755 [Online]. [2018]. [Citace: 5. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4755.pdf>
- [24] **STMicroelectronics.** STM32F405xx, STM32F407xx [Online]. [2012]. [Citace: 11. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>
- [25] **STMicroelectronics.** RM0090 Reference Manual [Online]. [2012]. [Citace: 11. 12. 2012]. Dostupný z WWW: [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/DM00031020.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf)
- [26] **STMicroelectronics.** PM0081 Programming manual [Online]. [2011]. [Citace: 11. 12. 2012]. Dostupný z WWW: [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/programming\\_manual/DM00046982.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/programming_manual/DM00046982.pdf)
- [27] **STMicroelectronics.** LM193, LM293, LM393 [Online]. [2012]. [Citace: 13. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2164.pdf>
- [28] **STMicroelectronics.** STM32F4 DSP and standart peripherals library [Online]. [2012]. [Citace: 17. 12. 2012]. Dostupný z WWW: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/st\\_prod\\_software\\_internet/resource/technical/software/firmware/stm32f4\\_dsp\\_stdperiph\\_lib.zip](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/st_prod_software_internet/resource/technical/software/firmware/stm32f4_dsp_stdperiph_lib.zip)
- [29] **CooCox.** ARM cortex MCU Development Tools [Online]. [2011]. [Citace: 28. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.coocox.org/>
- [30] **National Semiconductor.** LM4890 [Online]. [2002]. [Citace: 30. 12. 2012]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/LM4890.pdf>
- [31] **SEHNAL, Zdeněk ml.** Aktualizovaný návod na výrobu DD cívky [Online]. [200-?]. [Citace: 4. 1. 2013]. Dostupný z WWW: <http://www.hq-elektronic.eu/dd.html>
- [31] **PELIKÁN, Daniel.** Akumulátory [Online]. [200-?]. [Citace: 27. 1. 2013]. Dostupný z WWW: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=cats&category=126>
- [32] **BEZOUŠEK, Pavel.** Radiové systémy určování polohy (přednáška 8) Pardubice :UPCE, 12.2.2013.

## Příloha A – Obsah CD

Na přiloženém disku se nachází adresáře s následujícím obsahem:

- SixtaM\_DetekceKlasifikace\_PR\_2013 – obsahuje text diplomové práce ve formátu PDF

složka program:

- obsahuje program pro mikroprocesor STM32F407 v jazyce C, napsaný ve vývojovém prostředí CoIDE 1.7.0 s použitím GCC ARM kompilátoru verze 4\_7-2012q4

složka software:

- obsahuje vývojové prostředí CoIDE 1.7.0 a GCC ARM kompilátor verze 4\_7-2012q4

složka podklady:

- obsahuje schéma a výkresy desek plošných spojů vytvořené v programu PADS 2007.4 a podklady pro jejich výrobu (\*.pdf)

složka dokumentace:

- obsahuje katalogové listy všech použitých integrovaných obvodů
- složka STM32F4xx\_DSP\_StdPeriph\_Lib\_V1.0.0 – obsahuje balík knihoven CMSIS + manual

složka mereni:

- obsahuje naměřené hodnoty citlivosti hledací cívky uvedené formou grafů v kapitole 5