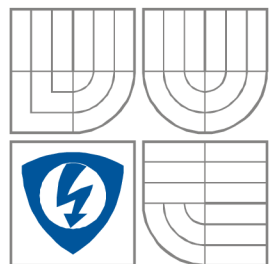




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# PI DETEKTOR KOVŮ S DSP ZPRACOVÁNÍM

THE PI METAL DETECTOR WITH USING DSP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

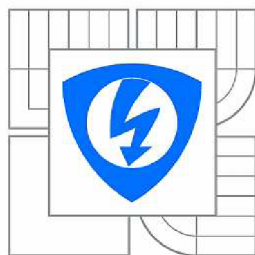
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Radomír Betlach

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Radomír Betlach

**ID:** 125368

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

**NÁZEV TÉMATU:**

## PI detektor kovů s DSP zpracováním

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor řešení detektoru kovů. Navrhněte detektor kovů založený na pulzně-indukčním principu. Využijte možnost digitálního zpracování signálu odezvy v DSP s následným vyhodnocením druhu kovu. Navrhněte obvodové schéma a desku plošných spojů detektoru. Osadte desku plošných spojů a oživte analogový subsystém detektoru. Sestavte firmware pro řídicí systém a signálovou část detektoru. Proveďte podrobné měření parametrů detektoru.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HÁJEK, J. JARCHOVSKÝ, Z. Detektory kovů - návod na stavbu. BEN - technická literatura, Praha, 2010.

[2] WILHELM, R. Hledače kovů. Nakladatelství HEL, Ostrava, 2003.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tématem práce je návrh pulzně-indukčního detektor kovu. Hledač má pracovat s využitím již známého principu detekce, avšak v inovovaném pojetí. Při návrhu má být využito nových technologií a postupů. V práci je popisován návrh celkové koncepce a dílčích částí hledače. Jsou diskutovány důvody využití jednotlivých postupů, jejich výhody, eventuálně celkový dopad zjištěných parametrů zapojení na výsledné vlastnosti detektoru. Při návrhu obvodového řešení má být uvažováno následné zpracování signálu pomocí DSP. Následně, za použití teorie, má být vytvořen funkční prototyp detektoru a ověřeny dosažené parametry.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Detektor kovů, pulzní indukce, zpracování signálu

## **ABSTRACT**

The subject of Bachelor's thesis is design of pulse-induction metal detector. The detector is designed to operate with already-known principle of detection, yet at an innovative concept. In design will be used new technologies and procedures. In the thesis is described design of the general conception and components of the detector. The arguments for utilization separate procedures are discussed, as well as their advantages, eventually general impact of parameters of wiring against final properties of the detector. In design of wiring solution should be considered the following signal processing by DSP. Another subject of this thesis is to apply mentioned theory in practise and create a working sample of metal detector.

## **KEYWORDS**

Metal detector, pulse induction, signal processing

BETLACH, R. *PI detektor kovů s DSP zpracováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 31 s., 8 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma PI detektor kovů s DSP zpracováním jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>ix</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Principy detekce kovů</b>	<b>2</b>
1.1 Konvenční principy detekce .....	2
1.2 Pulzně – indukční princip .....	3
<b>2 Návrh detektoru</b>	<b>4</b>
2.1 Vysílací část .....	5
2.1.1 Hledací cívka .....	5
2.1.2 Budící a výkonový stupeň.....	6
2.1.3 Parametrická analýza navrženého obvodu.....	8
2.2 Přijímací část.....	10
2.2.1 Vstupní zesilovač s řízeným zesílením.....	10
2.2.2 Diferenční zesilovač .....	11
2.2.3 Simulace navrženého zapojení.....	12
<b>3 Ověření parametrů dílčích částí detektoru</b>	<b>14</b>
3.1 Hledací cívka .....	14
3.2 Výkonový stupeň .....	15
3.3 Signálová část .....	16
<b>4 Výroba a oživení detektoru</b>	<b>20</b>
4.1 Návrh DPS .....	20
4.2 Oživení kompletního zapojení .....	21
4.3 Sestavení řídicího firmware .....	21
<b>5 Zpracování signálu</b>	<b>24</b>
5.1 Záznam užitečného signálu.....	24
5.2 Zpracování v časové oblasti.....	24
5.3 Zpracování ve frekvenční oblasti.....	26

5.3.1	Fourierova transformace .....	26
5.3.2	Vyhodnocení výsledků spektrální analýzy .....	27
<b>6</b>	<b>celkové shrnutí</b>	<b>30</b>
6.1	Dosažené parametry .....	30
6.2	Náměty pro vylepšení a rozšíření .....	32
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>33</b>
	<b>Literatura</b>	<b>34</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>35</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>36</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Zjednodušené principiální schéma impulzního detektoru kovů .....	3
Obr. 2:	Zjednodušené blokové schéma hledače s DSP zpracováním signálu .....	4
Obr. 3:	Náhradní zapojení skutečné cívky .....	5
Obr. 4:	Schéma zapojení vysílací části detektoru .....	7
Obr. 5:	Zpracování navrženého obvodu pro simulaci .....	8
Obr. 6:	Napětí indukované na cívce, proud cívkou .....	9
Obr. 7:	Výkon vyzářený cívkou, ztrátový výkon spínacího tranzistoru.....	9
Obr. 8:	Návrh zapojení přijímací části hledače .....	12
Obr. 9:	Schéma zapojení zesilovače pro simulaci .....	12
Obr. 10:	Vstupní signál, signál po zesílení.....	13
Obr. 11:	Časový průběh napětí na hledací cívce .....	16
Obr. 12:	Vstupní a výstupní signál zesilovače s AD8138.....	17
Obr. 13:	Vývojový diagram hlavního programu pro řízení hledače .....	17
Obr. 14:	Časový průběh řídicích signálů pro volbu přenosu VGA .....	18
Obr. 15:	Stavový diagram řídicího programu .....	22
Obr. 16	Vliv magnetické vodivosti na signál odezvy .....	25
Obr. 17	Zaznamenané časové průběhy signálu odezvy .....	26
Obr. 18	Spektrum signálu získané výpočtem FFT .....	27
Obr. 19	Spektrální funkce pro předložené vzorky .....	28
Obr. 20	Porovnání odlišností spektrálních funkcí.....	29
Obr. 21	Výsledky rozpoznání kovu .....	30
Obr. 22	Výsledky opakovaných testů .....	31



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Závislost přenosu $A_U$ na decimální hodnotě řídicího slova pro VGA .....	11
Tabulka 2: Parametry hledací cívky.....	15
Tabulka 3: Výsledky všech pokusů o rozlišení kovu.....	31

# ÚVOD

Elektronické detektory kovu jsou zpravidla běžnou veřejností považovány za „hledače pokladů“. Většina doposud známých principů však byla vyvinuta pro armádní účely a jejich hlavním využitím bylo hledání ukrytých min. Postupem času se jejich použití uplatnilo i v jiných oborech, v současnosti jsou využívány v mnoha odvětvích lidské činnosti. Běžná zapojení hledačů pracují převážně na analogovém principu. S vývojem technologií byla některá zapojení výrazně vylepšena, naproti tomu další principy ztratily na svém významu.

Po získání obecného přehledu o známých principech detekce kovu, především pak o problematice pulzně-indukční detekce, a po pochopení činnosti již známých zapojení hledačů je možné přejít k návrhu nového zapojení. Pro zpracování signálu a následné rozlišení druhu kovu, je nutno celé zapojení vhodně uzpůsobit tak, aby bylo optimálně využito možností, které se s využitím DSP nabízí.

Cílem bakalářské práce je vytvoření funkčního vzorku detektoru kovů s DSP zpracováním. Nabízí se tedy nové možnosti řešení jinak již známého principu. S využitím signálového procesoru je možné provést analýzu zpracovávaného signálu a tak může být ověřena možnost rozlišení detekovaného kovu.

# 1 PRINCIPY DETEKCE KOVŮ

Kovy jsou charakteristické strukturou krystalické mřížky. Tato chemická vazba umožňuje volný pohyb uvolněných valenčních elektronů mezi jednotlivými atomy. Vznikají tak kladné ionty, které udávají typickou vlastnost kovů – *vodivost*. Právě elektrická vodivost a do určité míry i tepelná vodivost, jsou hlavní fyzikální vlastnosti kovů, na jejichž základě jsou založeny téměř všechny principy detekce kovů.

Podle principu funkce lze elektronické hledače kovů rozdělit do dvou hlavních skupin. Přístroje pracující se spojitým (analogovým) a většinou sinusovým signálem v rezonančním režimu, jsou již dlouhou dobu známé. V poslední době se však uplatňuje metoda detekce založená na modifikovaném radarovém principu, metoda pulzně - indukční detekce.

## 1.1 Konvenční principy detekce

Jeden z nejstarších využívaných principů je tzv. *záznějový*. Přístroje se skládají ze dvou oscilátorů, pracovního a referenčního. Přiblížením hledací cívky, která je součástí pracovního oscilátoru, ke kovovému předmětu, dojde k rozladění oscilací a vznikne rozdílový kmitočet mezi rozladěným a referenčním kmitočtem.

Dalším principem detekce je metoda *absorpční* [4]. Tyto přístroje vyhodnocují změny energie v rezonujícím obvodu LC, jehož součástí je opět také hledací cívka, případně reagují na změnu jakosti cívky Q. Změna amplitudy oscilací je pak vyhodnocována.

Hledače pracující *se změnou vazby*, někdy uváděné jako *balanční*, jsou tvořeny vysílačem a přijímačem. V obou částech jsou cívky (vysílací a hledací) které jsou pevně uspořádány tak, že mezi nimi nenastává vazba. Vysílač přístroje pracuje zpravidla v oblasti elektroakustických kmitočtů a napájí vysílací cívku. Přiblížením hledací cívky ke kovovému předmětu vznikne deformace pole, vyvolaného přijímací cívkou, tím se změní i vazba mezi cívkami a dojde k narušení vyvážení. Do přijímací cívky se naindukuje napětí, které je zesíleno a indikováno jako nález kovu.

*Můstkové* hledače [5] mají hledací cívku zařazenu do jedné větve střídavého měřicího můstku (v rezonanci i mimo ni), která je, bez přítomnosti kovu v dosahu cívky, v daném impedančním poměru vůči větvi druhé. Jako indikace nálezu je vyhodnocována změna napětí na diagonále referenčních reaktancí.

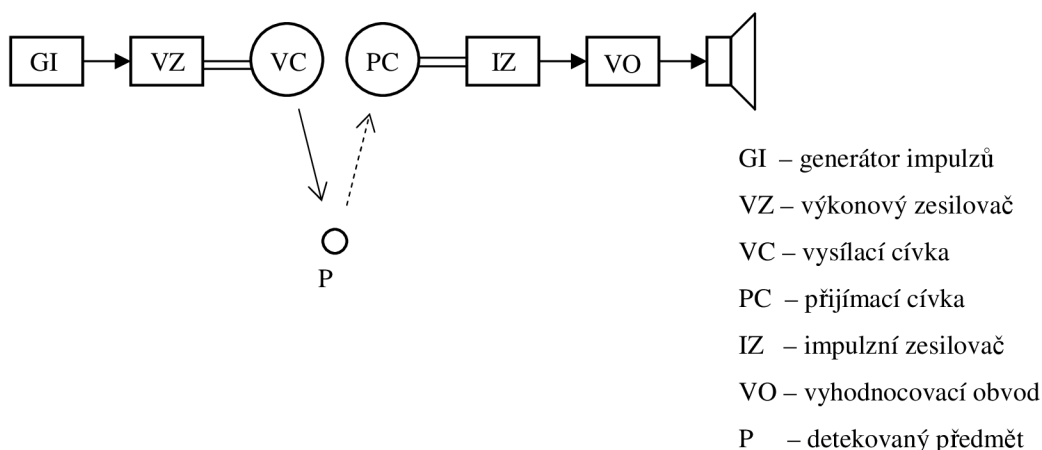
Poslední a poněkud odlišný princip detekce využívají *magnetometry*. Tyto přístroje nevysílají žádným způsobem signál. Jsou to pasivní hledače, které zkoumají homogenitu zemského pole. Systémy magnetometrů jsou známé také jako magnetometry rozdílového pole. Základní princip spočívá ve dvou induktorech, citlivých na magnetické pole, zapojených rozdílově tak, že se vzájemně kompenzují a homogenní magnetické pole se jeví jako nulové. Je – li jeden z induktorů zasažen rušivým polem, vzniká nenulový rozdíl napětí, a ten je využit k vytvoření střídavého signálu pro indikaci rozdílů v magnetickém poli.

## 1.2 Pulzně – indukční princip

Pulzně-indukční hledače kovových předmětů pracují na základě příjmu magnetického pole hledací cívkou, přičemž detekovaný signál je způsoben v důsledku vířivých proudů indukovaných v hledaném kovu. Vířivé proudy (tzv. Foucaultovy) vznikají ve vodivém prostředí vystaveném změnám procházejícího magnetického pole. Jejich velikost je úměrná vodivosti prostředí, intenzitě budícího magnetického pole a rychlosti jeho změny.

Změna proudu, a tedy i magnetického pole není skoková, neboť impedance cívky je v době sepnutí blízká nekonečnu a proud narůstá od nuly exponenciálně až na hodnotu, danou napětím zdroje a odporem obvodu (činným odporem cívky, vnitřním odporem zdroje a odporem spínače, kterým bývá zpravidla spínací tranzistor, zatížený v této chvíli maximálním proudem). Po dosažení nejvyššího proudu je nutné jej přerušit tak, aby změna magnetického pole byla co nejrychlejší. Zde se uplatňuje Lenzovo pravidlo - indukovaný proud působí proti změně, která jej způsobila. To má za následek prudký nárůst napětí na cívce, a tím i na spínači, tedy na kolektoru tranzistoru, který je zatěžován maximálním napětím. Velikost tohoto samoindukovaného napětí dosahuje řádově tisíce V, a tak se může zničit spínací tranzistor napěťovým průrazem. Časový průběh napěťové špičky je závislý především na vlastnostech cívky.

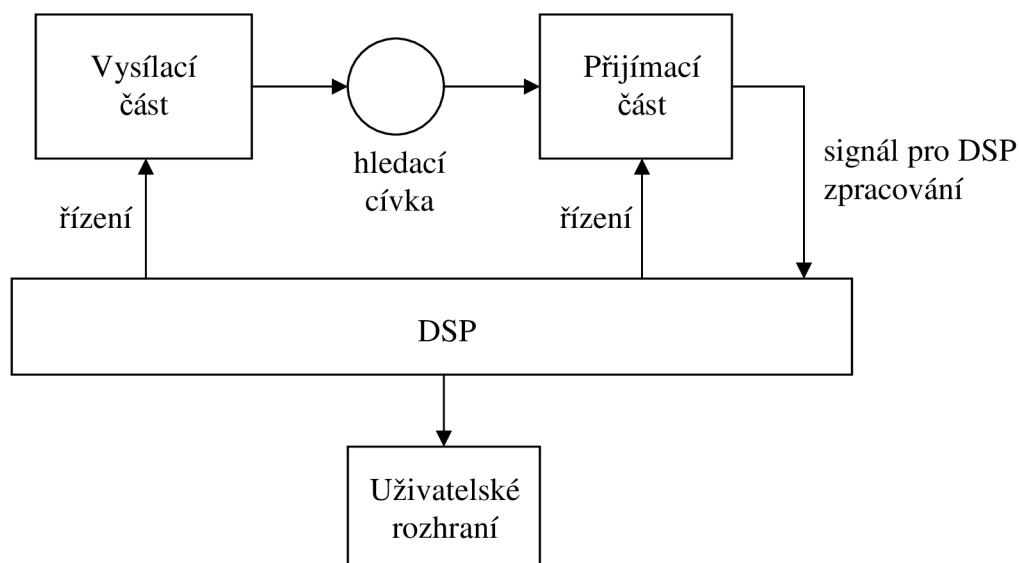
Průchodem proudového pulsu cívkou vzniká kolem ní silné magnetické pole, jehož změny generují vířivé proudy ve vodivých předmětech, nalézajících se v tomto poli. Proudové dráhy lze považovat za jakési závitky spojené nakrátko a vířivé proudy tak vytvářejí kolem sebe magnetické pole. Zatímco nárůst proudového impulsu trvá stovky mikrosekund, je vypnutí proudu mnohem rychlejší a trvá řádově mikrosekundy. Proto mají vířivé proudy těsně po vypnutí největší amplitudu a doznívají exponenciálně, přičemž exponenciální konstanta závisí na elektrické vodivosti materiálu hledaného předmětu a na jeho objemu. Zde se naskýtá možnost zpracováním signálu odezvy získat informaci o detekovaném kovu. Jednoduché hledače přijímají signál zesílí a vzorkováním porovnávají úroveň signálu odezvy s referenční hodnotou.



Obr. 1: Zjednodušené principiální schéma impulzního detektoru kovů

## 2 NÁVRH DETEKTORU

Jak vyplývá ze zadání, navrhovaný detektor kovu má pracovat na pulzně-indukčním principu. V konečné fázi má pomocí signálového procesoru, dále jen DSP (Digital Signal Processor) číslicově zpracovat signál odezvy vířivých proudů, vybuzených v detekovaném předmětu. Zpracování signálu má být provedeno takovým způsobem, aby bylo možno jeho vyhodnocením rozlišit druh kovu, z něhož je tvořen detekovaný předmět. Na blokovém schéma, viz obr. č. 2, je zjednodušeně znázorněna celková koncepce hledače.



Obr. 2: Zjednodušené blokové schéma hledače s DSP zpracováním signálu

Jednotlivé celky navrhovaného zapojení jsou oproti ostatním (analogovým) hledačům, uvedeným například v literatuře [1], [2], centrálně řízeny prostřednictvím výstupů DSP. Programem je ošetřeno správné časování vysílací a přijímací části tak, aby bylo možno využít jedinou cívku, přičemž nesmí dojít k vzájemnému nežádoucímu ovlivňování obvodů. Činnost detektoru je tedy dokonale synchronizována.

Vysílací část, prostřednictvím elektromagnetického pole cívky, budí vířivé proudy v kovových předmětech. Po odeznění přechodových dějů na cívce je přijímací částí odebrán signál odezvy vířivých proudů, zachycený cívkou, a dále je upraven k následnému digitálnímu zpracování.

Zpracování a vyhodnocení signálu odezvy realizuje rovněž DSP, zároveň řídí také výstupní periferie – znakový LCD display a reproduktor. Vzhledem k možnostem signálového procesoru, použitého pro řízení hledače, se nabízí možnost volby parametrů detekce, například vytvořením několika variabilních vyhledávacích režimů. Hledač pracuje cyklicky, obecně lze říci, že jde o modifikaci radarového principu detekce.

## 2.1 Vysílací část

Vysílací část detektoru je tvořena vysílací cívku, která je zároveň využita i jako hledací cívka pro příjem signálu odezvy pro přijímací stupeň. Výkonový stupeň spíná proud hledací cívku, čímž je v jejím okolí vytvářeno elektromagnetické pole. V kovových předmětech, nalézajících se uvnitř tohoto pole, tak dochází ke vzniku vířivých proudů. Na výkonu a způsobu spínání výkonového stupně do značné míry závisí výsledný dosah celého hledače.

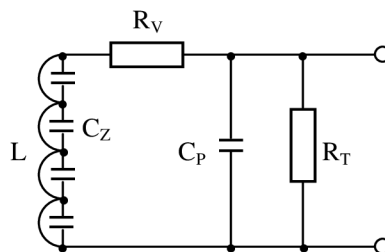
### 2.1.1 Hledací cívka

Pulzně – indukční způsob detekce umožňuje využít jedinou cívku jako vysílací a zároveň i jako přijímací hledací cívku, což je výhodné. Z pochopitelných důvodů je však nutno zmíněnou cívku koncipovat jako kompromis požadovaných parametrů.

Při rozepnutí spínače (výkonového tranzistoru) po nabití cívky proudem, dochází ke vzniku přechodových jevů, jejichž doznívání trvá desítky mikrosekund. Aby bylo možné snímat nejsilnější signál odezvy vířivých proudů, je nutné zajistit co nejrychlejší zánik napětí na cívce, způsobeného samoindukcí po vypnutí proudového impulsu. Časový průběh doznívání samoindukovaného napětí na cívce je popsán lineární diferenciální rovnicí druhého řádu, jejímž řešením jsou tři možné oblasti hodnot diskriminantu  $D$ , který je předurčen vlastnostmi cívky. Pokud je hodnota  $D$  záporná, je časový průběh doznívání sinusový, obvod kmitá v závislosti na jakosti cívky  $Q$  - obvod je tlumen podkriticky. Kladná hodnota  $D$  způsobuje již lepší průběh doznívání, avšak obvod je přetlumen. Přijímaný signál odezvy vířivých proudů v hledaném předmětu je překryt dozníváním napěťového impulsu samoindukce cívky a není možné jej dále zpracovat. Optimální hodnota diskriminantu je  $D = 0$ , kdy je obvod kriticky tlumen. Doznívání přechodového jevu pak probíhá s velkou strmostí neprodleně po doznění pulzu, díky čemuž je možné nejlépe zpracovat odezvu vířivých proudů v kovu.

Ideální cívka má teoreticky pouze jeden parametr - *indukčnost*. Reálná cívka však vykazuje i parazitní vlastnosti, jako vnitřní odpor vodiče, parazitní kapacitu mezi závity, a dále se také projevuje vhodnost materiálu vodiče a konstrukce cívky pro použití ve vysokofrekvenčních aplikacích. Zde se mohou projevit vlivy skin efektu, magnetický rozptyl, případně ztráty v jádře. Náhradní schéma reálné cívky detektoru je na obrázku Obr. 3. Kromě indukčnosti a tlumícího odporu ve spínacím obvodu, je třeba brát v úvahu také kapacitu přívodů, vzájemné kapacity mezi závity, odpor jednotlivých závitů a přívodů.

- $L$  – indukčnost vinutí
- $C_Z$  – parazitní kapacita závitů
- $C_P$  – parazitní kapacita přívodu
- $R_V$  – odpor vinutí a přívodu
- $R_T$  – tlumící rezistor



Obr. 3: Náhradní zapojení skutečné cívky

Pro dosažení maximálního budicího proudu cívkou je nutné zajistit minimální odpor vodiče, kterým je cívka vinuta. Toho je možné docílit vhodnou volbou jeho průřezu. Zvyšovat průřez vodiče nad 0,5 mm<sup>2</sup> je však nevýhodné. Proud cívkou při výkonovém impulsu sice vzroste, neúměrně se však zvětší vířivé proudy vybuzené v samotném vodiči cívky. Vhodným řešením by se jevilo provést vinutí VF lankem, díky jeho výhodným vlastnostem ve VF oblasti, avšak jeho izolace by nebyla dostačující. Při rozeptnutí obvodu dochází k napěťovým špičkám o amplitudě přes 1 kV. Aby byla mezizávitová izolační pevnost zaručena je výhodnější použít vodič s PVC izolací. Dle [1] je optimálním řešením kroucená dvojlanka (tzv. twist), která je opatřena PVC izolací a má průřez žíly 0,5 mm<sup>2</sup>. Vinutí je tak provedeno dvojitě, což sice vede ke zvýšení vnitřních kapacit, avšak tyto nijak výrazně celkové parazitní vlastnosti nezhorší. Výsledný odpor vinutí však klesne, přičemž se i zvětší plocha povrchu vodičů, což je žádoucí.

K eliminaci parazitních kapacit mezi závitů je možné s výhodou použít křížové vinutí, přičemž vrstvy závitů jsou prokládány vhodným izolačním materiálem. Tento princip využívá například Lorenzova cívka. Lorenzovo vinutí vhodnou vzájemnou polohou vodičů, jednotlivých závitů, potlačuje vznik nežádoucích parazitních kapacit. Ty vznikají převážně jen v místech křížení vodičů, jenž jsou meandrovitě stáčený, namísto po celé délce vodičů, jak by tomu bylo při ukládání přesných kruhových závitů. Dalším možným řešením je tzv. pavučinová cívka, avšak její provedení je spíše plošné, což má za následek nevhodné rozložení siločar vyzařovaného magnetického pole. Pro detekci s větším dosahem je tedy méně vhodná.

Indukčnost cívky je limitována vlastnostmi použitých spínacích prvků. Jelikož z principiálních důvodů indukčnost nesmí být přemostěna ochrannou diodou, je spínač namáhán nejen velkým impulsním proudem, ale i značným napětím indukovaným cívkou. Maximální hodnota indukčnosti by neměla přesáhnout hodnotu cca 350 μH, aby bylo minimalizováno nebezpečí průrazu spínacího prvku. Přibližným výpočtem pomocí vzorce (1) je dosaženo požadované indukčnosti navinutím 30 závitů při cívce o průměru 25cm. Ve výpočtu není uvažováno křížové Lorenzovo vinutí, platí pro klasickou kruhovou cívku, avšak pro přibližné určení indukčnosti dostačuje.

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S}{l} \quad (\text{H ; - , - , m}^2, \text{ m}) \quad (1)$$

Výpočtem získaná teoretická hodnota indukčnosti cívky s 30 závitů o průměru 30cm je podle vzorce (1) :

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S}{l} = 30^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi \cdot 0,15^2}{0,03} = 266,48 \mu\text{H}$$

Tato hodnota vyhovuje.

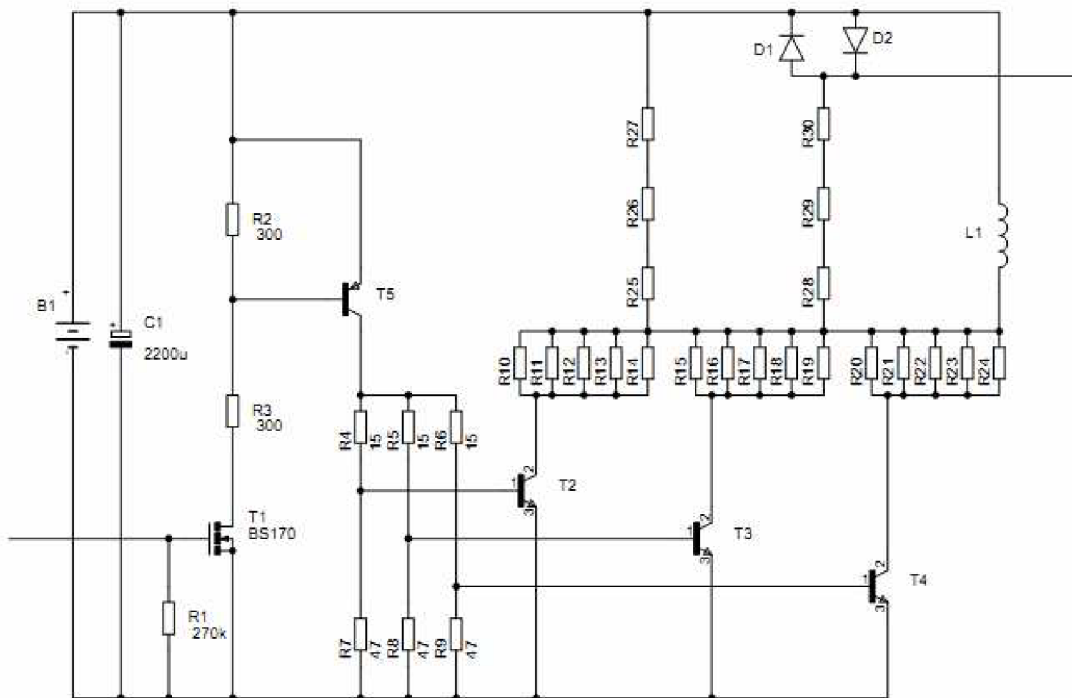
## 2.1.2 Budící a výkonový stupeň

Budící stupeň detektoru má za úkol převést logické úrovně výstupu řídicího mikrokontroléru na spínání řídicího proudu do báze výkonového spínacího tranzistoru. Jelikož výkonové tranzistory zpravidla nemají vysokou hodnotu proudového

zesilovacího činitele, je nutno dodat poměrně velký proud do báze k otevření tranzistoru. Kvůli správnému časování jednotlivých částí detektoru, během hledacího cyklu, je nutno zabezpečit i časově přesné spínání výkonového stupně, bez velkého časového zpoždění. Doby trvání náběžné a sestupné hrany signálu by měly být rovněž co nejkratší, neboť výkonové tranzistory musí pracovat ve spínacím režimu.

Výkonový stupeň hledače musí být schopen pracovat v pulzním režimu s proudem v řádech jednotek až desítek ampér a se závěrným napětím přes 1kV. Spínací prvek s patřičnými parametry není běžně dostupný a jeho pořízení by mohlo být nákladné. Paralelním zapojením více spínacích prvků, s potřebným závěrným napětím a nižším ztrátovým výkonem, je možné jej nahradit.

Obvodové schéma vysílací části detektoru je na obrázku č.3. Na vstupu budícího stupně je tranzistor  $T_1$  (BS170) řízený polem, který spíná proud odporovým děličem  $R_2$  a  $R_3$ . Báze bipolárního PNP tranzistoru  $T_5$  (BD136) je buzena vzniklým úbytkem napětí na  $R_2$ . Budící proud pro trojici výkonových tranzistorů je odebírán z odporových děličů v kolektorovém obvodu tranzistoru  $T_5$ . Kolektorový proud  $T_5$  dosahuje hodnoty přes 1A, neboť básový proud každého z výkonových tranzistorů je cca 200 mA. Výkonové tranzistory BU508 mají v katalogovém listu uvedenou hodnotu maximálního závěrného napětí 1500 V a proud kolektorem 8 A (pulzně až 15 A), přičemž povolený ztrátový výkon je 125 W. Z uvedeného vyplývá, že aby nebyl překročen ztrátový výkon, je nutné rovnoměrně rozložit proud cívkou mezi všechny tři spínací tranzistory a zvolit vhodnou opakovací frekvenci detekčních cyklů. K rovnoměrnému rozložení proudů jsou v kolektorovém obvodu tranzistorů  $T_2$  až  $T_4$  zařazeny rezistory o malé hodnotě, respektive paralelně spojené rezistory s výslednou hodnotou 0,2  $\Omega$ . Hledací cívka je připojena s paralelním tlumícím odporem (rezistory  $R_{25}$  až  $R_{27}$ ) do kolektorového obvodu výkonových tranzistorů.



Obr. 4: Schéma zapojení vysílací části detektoru

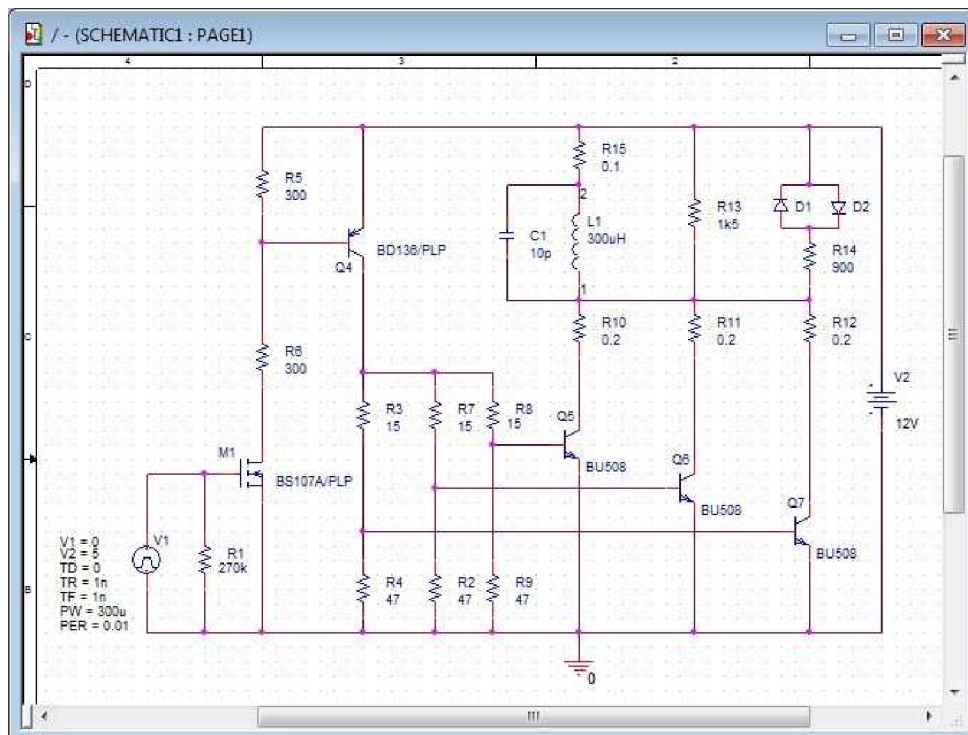


Diody  $D_1$  a  $D_2$ , antiparalelně zapojené, slouží jako napěťový omezovač. Úbytek napětí po vybití cívky a zavření diod je užitečný signál, určený k dalšímu zpracování. Kvůli značnému zatěžování zdroje a možnému vzniku kolísání napětí je v obvodu zapojen paralelně ke zdroji elektrolytický kondenzátor o kapacitě alespoň 2,2 mF.

### 2.1.3 Parametrická analýza navrženého obvodu

Pro získání předpokládaných parametrů navrženého zapojení je výhodná jeho simulace v programu PSpice. Parametrické modely všech součástek jsou již v knihovně programu uloženy. Po překreslení schématu dle předlohy (viz obr. č. 5), vyplněním požadovaných hodnot součástek a jiných parametrů je obvod k simulaci připraven. Vytvořením simulačního profilu v časové oblasti a jeho spuštěním dojde k výpočtům hodnot všech elektrických veličin v obvodu, z nichž je následně sestaven graf požadovaných časových průběhů.

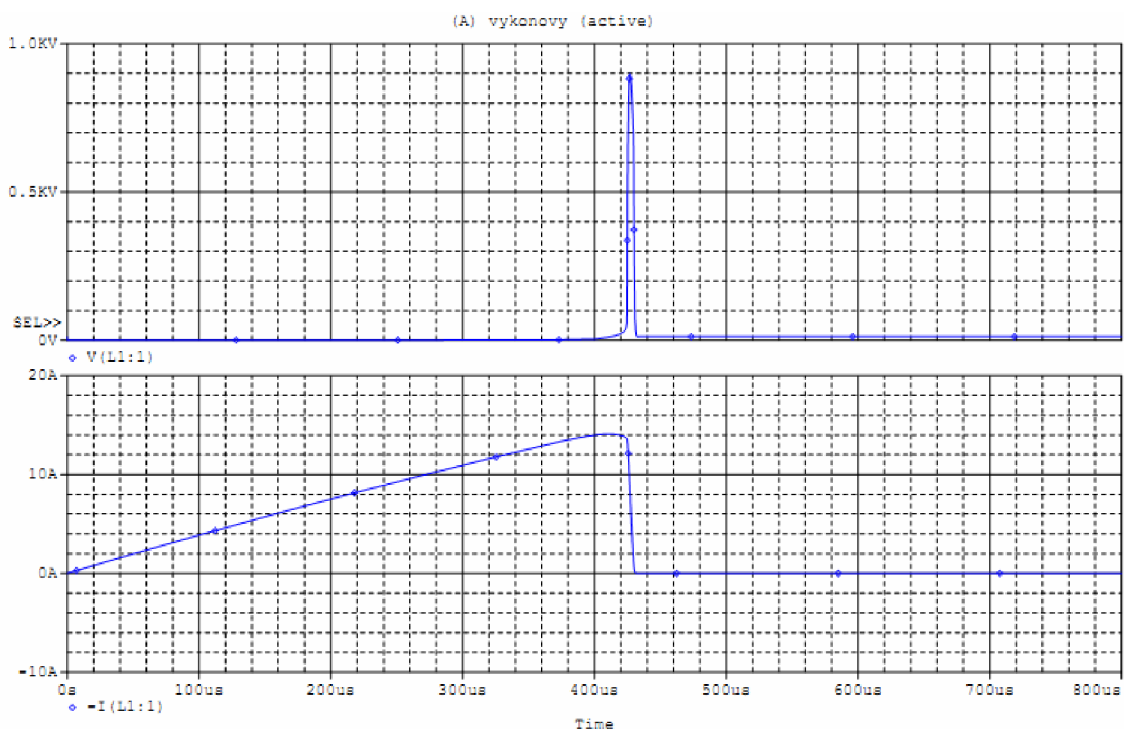
Při simulaci daného zapojení je nutno brát v úvahu, že výpočty v programu pracují s ideálními hodnotami a parazitní vlastnosti skutečných prvků nejsou uvažovány. Cívku je tak nutno alespoň částečně nahradit jejím náhradním schématem, viz obr. č. 3.



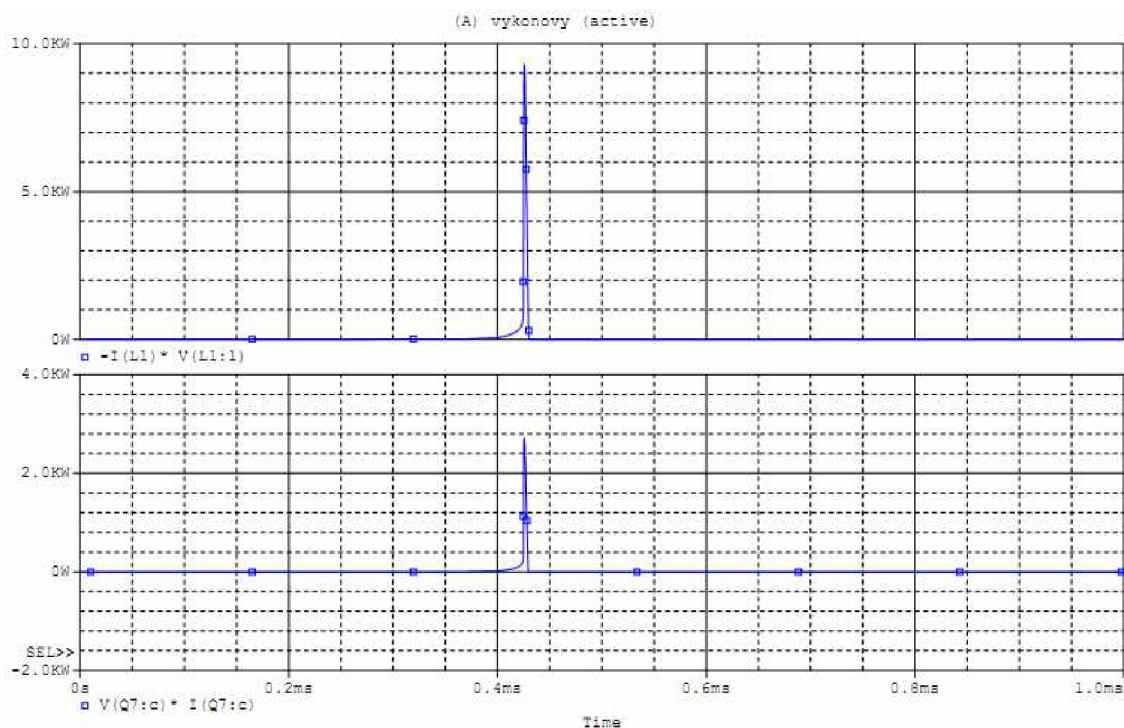
Obr. 5: Zpracování navrženého obvodu pro simulaci

Simulací s rozmítáním volitelných parametrů lze určit přibližnou dobu nabíjení cívky tak, aby nedocházelo k překračování povolených hodnot pro spínací tranzistory. Jak je patrné z grafů na obrázku č. 6, maximální hodnota proudu cívkou při sepnutém výkonovém stupni je přibližně 14 A. Tato hodnota je volena jako kompromis, neboť při dané indukčnosti cívky by při přechodovém jevu, po jejím nabití, došlo k nárůstu napětí až nad povolenou mez výkonových tranzistorů. Doba sepnutí tranzistorů by tedy neměla v žádném případě překročit hodnotu 400  $\mu$ s.

Špičkový výkon na spínacím tranzistoru (viz graf na obr. č. 6) je 2,7 kW, je tedy mnohonásobně překročena povolená hodnota udaná výrobcem. Protože však hledač pracuje v pulzním režimu, je při dostatečně nízké opakovací frekvenci pouzdro tranzistoru vzniklé teplo schopno odvádět. Aby byla zajištěna spolehlivá funkce spínacích prvků a nedošlo k jejich zničení, nesmí opakovací frekvence při maximální šířce pulzu (400 $\mu$ s) vzrůst nad cca 300 Hz.



Obr. 6: Napětí indukované na cívce, proud cívkou



Obr. 7: Výkon vyzářený cívkou, ztrátový výkon spínacího tranzistoru

Impulsní výkon, vyzářený cívkou do okolí, je teoreticky až 9,3 kW. Střední hodnota ztrátového výkonu pro spínací tranzistory je v daném případě přibližně 0,7 W. Celkový střední ztrátový výkon spínacích tranzistorů je tedy 2,1 W.

## 2.2 Přijímací část

Signál odezvy vířivých proudů, vybuzených v kovu uvnitř pole cívky, je přijat totožnou cívkou, která je zapojena i ve vysílací části hledače. Lorenzovo provedení cívky je v tomto případě opět výhodné, neboť tuto cívku lze využít i jako rámovou anténu. Neprodleně po doznění přechodových dějů je nutno zpracovat rychle zanikající signál, jehož úroveň dosahuje řádově pouze desítek až stovek mV v závislosti na druhu kovu, objemu a vzdálenosti hledaného předmětu.

### 2.2.1 Vstupní zesilovač s řízeným zesílením

S ohledem na zamýšlené digitální zpracování signálu odezvy a na charakter zpracovávaného signálu, je vhodné zajistit jednotnou výstupní úroveň signálu pro všechny možné případy, které při detekci mohou nastat. Nelze vycházet z předpokladu, že detekovaný předmět bude vždy vykazovat stejný signál odezvy, ani signál o srovnatelné úrovni.

Řešením je využití zesilovače s nastavitelnou hodnotou zesílení, respektive útlumu. Řízené zesilovače jsou dostupné ve formě integrovaného obvodu, jako operační zesilovače s volitelnou hodnotou napěťového přenosu, tzv. VGA (Variable Gain Amplifier). Dle provedení VGA je hodnota přenosu volena buď analogovou úrovní napětí, přivedenou na řídicí vstup OZ, nebo je hodnota volena digitálně. Pro aplikaci řízenou mikrokontrolérem je z uvedených způsobů výhodnější právě zesilovač s digitálně definovanou hodnotou přenosu, lze jej tedy považovat za programovatelnou periférii. Pro uvedenou aplikaci byl integrovaný obvod AD8321, což je VGA s rozsahem přenosu od -27,4dB po 25dB, programovatelný po krocích 0,7526dB, viz tabulka č. 1. Vstup obvodu lze zapojit jako diferenční, přičemž maximální hodnota vstupního napětí, uvedená výrobcem, je  $\pm 0,5$  V. Tato hodnota plně vyhovuje pro zpracování signálu odezvy, který je odebírán na diodovém omezovači  $D_1$ ,  $D_2$  (Obr. 4) a je přiveden ke vstupu vazebními kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  (Obr. 8).

Jelikož hodnota napětí na cívce během vysílacího impulsu dosahuje příliš vysoké hodnoty, je v obvodu zařazen diodový omezovač, jenž má výstupní napětí omezit na rozsah cca 0,7 V, tj. po prahové napětí diod. Aby v praxi byl chráněn vstup zesilovače i v případě zničení diody, je zařazen v obvodu paralelně k omezovači ještě transil, který zároveň snižuje případné napěťové namáhání přechodů diod.

Obvod AD8321 je řízen přímo z výstupů mikrokontroléru a nevyžaduje převod řídicích úrovní. Komunikace probíhá po sériové lince, k ovládní zesílení postačují 3 vodiče. Obvod je vybaven funkcí PD (Power Down), což je možnost uvedení zesilovače do klidového stavu a omezit tak jeho spotřebu ze zdroje. Tato funkce umožňuje logickou úrovní na řídicím vstupu zesilovače vypnout výstupní zesilovač uvnitř pouzdra a dle výrobce se proudová spotřeba sníží z 90 mA na 52 mA. Při napětí 9 V, což je napájecí napětí obvodu AD8321, je touto funkcí možno snížit výkon zdroje o 0,25 W. Při napájení přístroje z akumulátoru není úspora energie zanedbatelná.

Obvodové zapojení VGA vychází z předepsaných zapojení, uvedených v katalogovém listu výrobcem. Napětí 9V pro napájení je vytvářeno pomocí monolitického stabilizátoru  $U_1$ . Zapojení je zakresleno ve společném schéma na obrázku č. 8.

Tabulka 1: Závislost přenosu  $A_U$  na decimální hodnotě řídicího slova pro VGA

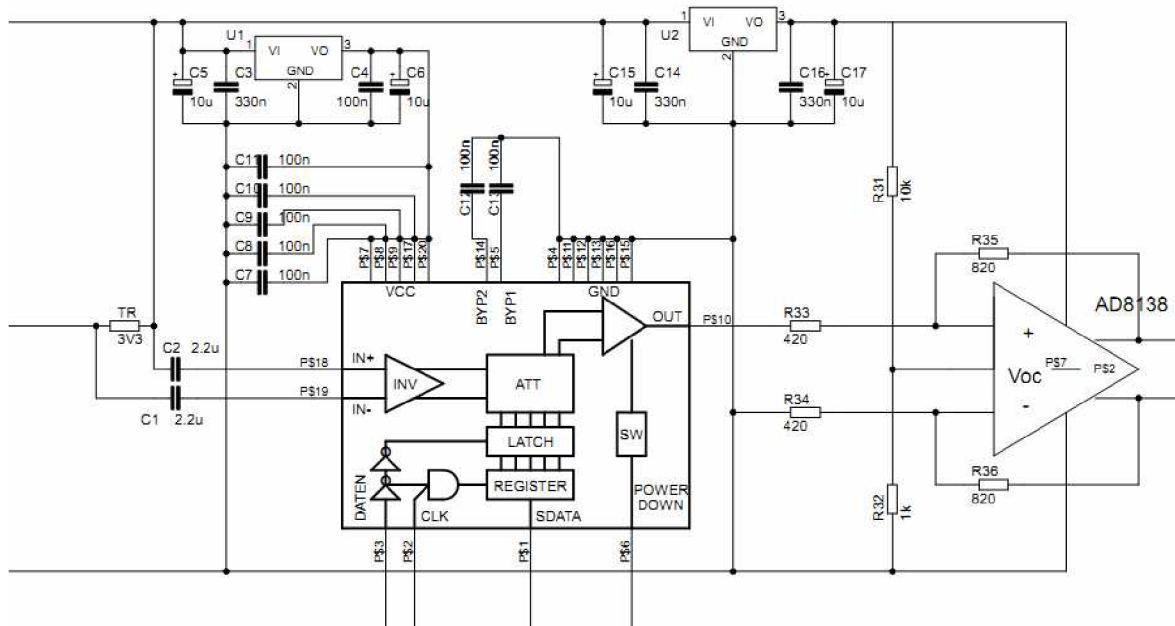
Řídicí slovo	$A_U$	Řídicí slovo	$A_U$
[-]	[dB]	[-]	[dB]
0	-27,43	128	-27,43
1	-26,68	129	-26,68
.	.	.	.
.	.	.	.
70	25,25	198	25,25
71	26,00	199	26,00
72	26,00	200	26,00
.	.	.	.
.	.	.	.
127	26,00	255	26,00

### 2.2.2 Diferenční zesilovač

Diferenční zesilovač tvoří druhý stupeň přijímače detektoru. Jeho úkolem je konečné zesílení přijatého signálu na úroveň, vhodnou k převedení do digitální podoby. Jelikož je uvažováno vzorkování signálu a jeho kompletní A/D převod signálovým procesorem, je nezbytné při převodu využít celý rozsah kvantování a zabezpečit tak převod signálu s maximální možnou dynamikou.

Amplituda výstupního signálu, zesíleného pomocí VGA, má maximální hodnotu přibližně 1,5 V, přičemž užitečný signál k následnému zpracování by měl mít amplitudu alespoň dvojnásobnou. Při využití možnosti vzorkovat pomocí externího zdroje referenčního napětí by bylo teoreticky možné vzorkovat i signál o větší amplitudě, avšak toto řešení by bylo nevhodné. Spolu se zesílen užitečného signálu by došlo i ke značnému zesílení šumu a k výsledné degradaci zpracovávaného signálu.

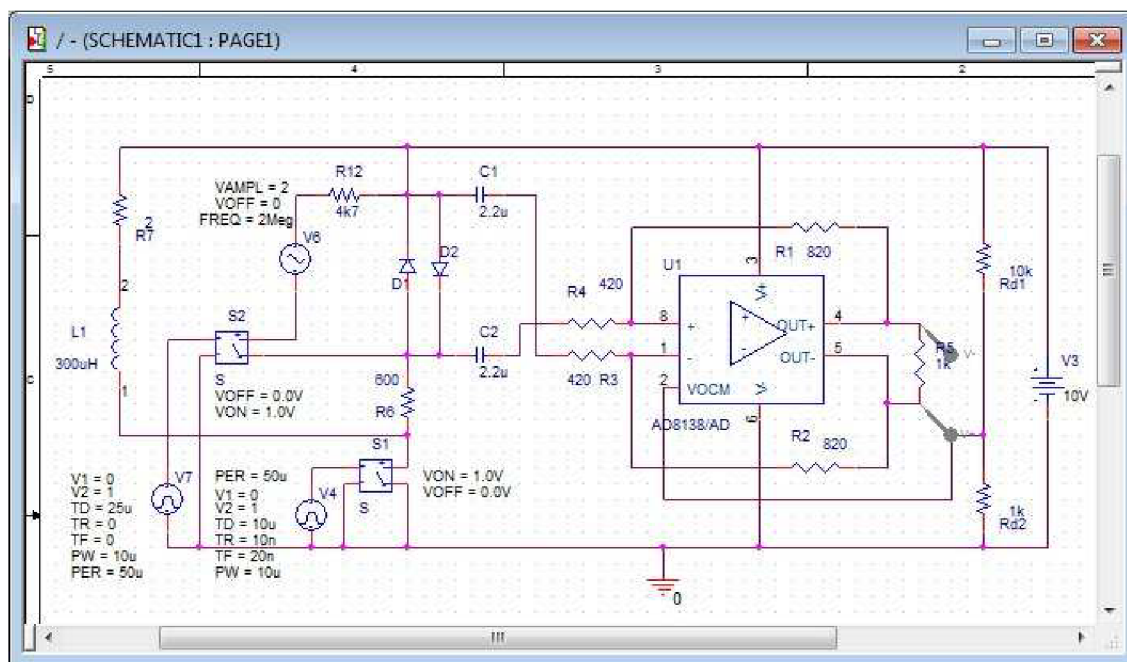
Pro zesílení výstupního signálu VGA je použit diferenční zesilovač AD8138 se značnou rychlostí přeběhu 1150 V/ $\mu$ s a šířkou pásma 320 MHz. Jeho zesílení je fixně nastaveno na hodnotu 2, pomocí rezistorů  $R_{33}$  až  $R_{36}$ . Obvodové zapojení rovněž vychází ze schéma doporučeného výrobcem pro neinvertující zesilovač, napájení 9V je vytvářeno integrovaným stabilizátorem  $U_2$ . Výstup operačního zesilovače je přímo propojen se vstupem A/D převodníku signálového procesoru. Kompletní schéma přijímací části detektoru je uvedeno na obr. č. 8.



Obr. 8: Návrh zapojení přijímací části hledače

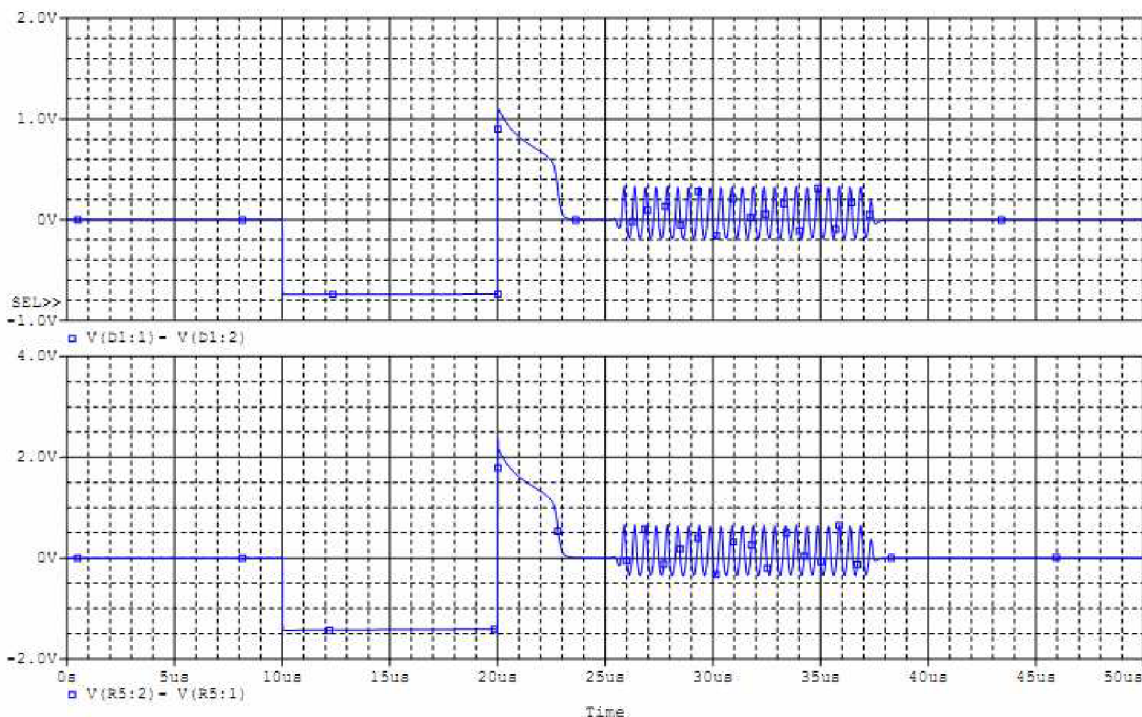
### 2.2.3 Simulace navrženého zapojení

Pomocí programu PSpice je možné ověřit funkci navrženého zapojení s operačním zesilovačem AD8138. Parametry pro vytvoření modelu součástky jsou výrobcem zveřejněny a proto lze pomocí editoru v programu vytvořit parametrický model, použitelný pro analýzu libovolného zapojení s daným zesilovačem.



Obr. 9: Schéma zapojení zesilovače pro simulaci

Po vytvoření modelu součástky, zakreslení schématu a vytvoření simulačního profilu je možné simulací ověřit funkci zapojení. Je však důležité nejprve vytvořit zdroj správného testovacího signálu, pro získání ucelené představy o činnosti obvodu. Při buzení jednoduchým harmonickým signálem by bylo problematické ověřit dosažitelnou rychlost přeběhu, zkusení signálu nebo možný vznik zákmitů. Testovací signál by měl být zároveň obdobou skutečného signálu, který má být obvodem zpracován. Zapojením více zdrojů různého signálu a časovým spínačem do obvodu je možné dosáhnout potřebných vlastností zkušebního signálu.



Obr. 10: Vstupní signál, signál po zesílení

Dle katalogu výrobce [6] je hodnota přenosu zesilovače pro zvolené zapojení dána vztahem:

$$A_U = \frac{R_{ZV}}{R_{IN}} \approx \frac{R_{35}}{R_{33}} \quad ( - ; \Omega , \Omega ) \quad (2)$$

Z výsledků počítačové simulace zmiňovaného zapojení vyplývá, že obvod nejeví známky zakmitávání, limitace signálu, ani jiné příznaky zkreslení signálu. Hodnota zesílení odpovídá teoretickému výpočtu a i šířka přenášeného pásma plně vyhovuje. Porovnání průběhů vstupního signálu s výstupním, při zesílení  $A_U=2$  je znázorněno v grafech na obrázku č. 10. V sortimentu výrobce je ve stejné typové řadě diferenčních zesilovačů uveden zesilovač AD8131, který má již pevně definovanou hodnotu zesílení  $A_U=2$ , danou součástkami uvnitř pouzdra. Při jeho použití by nebylo zapotřebí dalších periferních rezistorů. Kvůli variabilitě zapojení a možným úpravám během ožívování je však právě vhodnější nastavovat zesílení volbou hodnot diskretních součástek.

## 3 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ DÍLČÍCH ČÁSTÍ DETEKTORU

### 3.1 Hledací cívka

Pro oživení analogového subsystému detektoru bylo nezbytné nejprve navinout hledací cívku. Jelikož je hledací cívka při vysílacím cyklu namáhána velkým impulsním proudem, dochází i k jejímu mechanickému namáhání což má za následek chvění závitů. Chvěním vodiče v magnetickém poli země vzniká šumové napětí, které se nepříznivě projeví na citlivosti celého hledače. Bylo nezbytné uzpůsobit konstrukci cívky tak, aby bylo chvění co nejvíce omezeno. Navíjení Lorenzovy cívky na kostru bylo problematické, stejně tak je nutno brát v úvahu hmotnost celé konstrukce cívky při jejím zalití např. do epoxidové pryskyřice. Jako zalévací hmotu je možné použít polyuretanovou pěnu, která je oproti pryskyřicím mnohonásobně lehčí, přičemž vykazují dostatečnou pevnost i jako nosná konstrukce celé cívky.

Před navinutím meandrovitých závitů bylo nutno vytvořit šablonu a rozmístit po obvodě vnějšího i vnitřního kruhu 21 kolíků. Toto rozložení zaručuje minimální parazitní kapacitu mezi jednotlivými závity, neboť úhel, který vodiče sousedních závitů svírají, je přibližně 60°. Styčná plocha vodičů je tak tvořena pouze osamocenými body. Navíjením jednotlivých závitů pak dochází k „vyplétání“ mezikružím. Po navinutí 4 závitů vychází konec vodiče opět na první (výchozí) kolík a je výhodné na předchozí závity navinout jeden kruhový závit, přes vnější kruh z kolíků. Dojde tak k proložení vrstev, vždy po pěti závitech. Navinutím celkového počtu 30 závitů se vytvořily mezi křížícími se závity jakési buňky, které PUR pěna před zatuhnutím spolehlivě vyplní. Pro názornost je v příloze A.1 fotografie z průběhu navíjení, před zalitím cívky pěnou.

Významnou vlastností PUR pěny je také její rozpínavost před vytvrzením, díky čemuž je dokonale vyplněn prostor mezi vodiči. Po zatvrdnutí pěny a odřezání přebytečných částí je možné odstranit nosné kolíky. Aby hřebíky bylo možné odstranit bez poškození cívky, bylo nutno je navléknout do plastových trubiček, které následně v cívce zůstanou a ničemu nevadí. Před vlastním využitím v terénu je nutné cívku umístit do vhodného (plastového) krytu, eventuálně ji omotat izolací, či zalakovat, aby nedošlo k jejímu mechanickému poškození, ani poškození vlivem UV záření, vůči němuž není pěna odolná.

Konečné rozměry zhotovené cívky jsou shrnuty ve společné tabulce č. 2. Pro její výrobu bylo potřeba přibližně 25 m vodiče a jedno balení PUR montážní pěny. Měřicím přístrojem Tesla BM559, což je přesný RLCG metr, byly naměřeny následující parametry hledací cívky.

Tabulka 2: Parametry hledací cívky

vnitřní průměr	[mm]	220
vnější průměr	[mm]	300
výška vinutí	[mm]	25
hmotnost	[g]	250
odpor vodiče	[mΩ]	945
indukčnost	[μH]	328

## 3.2 Výkonový stupeň

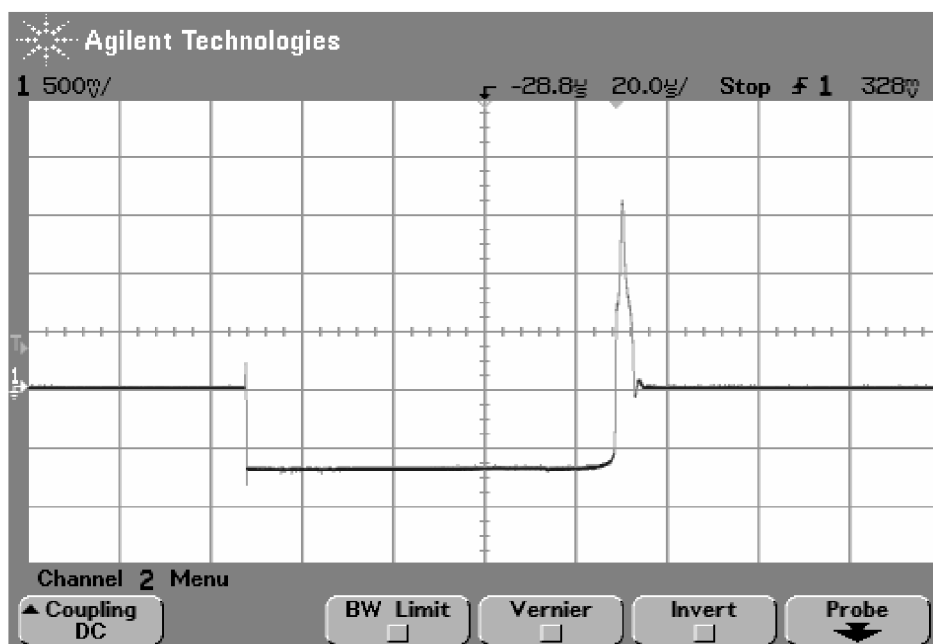
Pro předběžné testování parametrů vysílací části hledače bylo nutno vyřešit jeho řízení. Časování pomocí pulzního generátoru není možné, neboť při opakovací frekvenci vysílacího cyklu 250 Hz a délce budícího pulzu 200 μs je výsledný činitel plnění obdélníkového signálu DC = 5%. Uvedená hodnota klade příliš velké nároky na přesnost nastavení střídavý výstupního signálu generátoru, při jejím překročení je výkonový stupeň vystaven přetížení a hrozí následně nevratné poškození spínacích tranzistorů.

Z uvedených důvodů je časování, pro účely měření parametrů vysílacího stupně, ošetřeno zapojením generátoru s využitím 8bitového mikrokontroléru AT89C2051. Jednoduchým programem, napsaným v jazyce symbolických adres pro mikrokontrolér, lze při taktovací frekvenci 12 MHz vytvořit požadovaný signál s časovým rozlišením v krocích o délce 1 μs. Logickými úrovněmi výstupního portu je pak řízen budící stupeň vysílací části hledače. Program umožňuje měnit, pomocí tlačítek, délku budícího pulzu v rozmezí 50 až 100 μs, čímž lze za chodu regulovat výkon vyzářený cívkou do okolí, respektive příkon odebíraný ze zdroje. Zmiňovaný generátor řídicího signálu byl zapojen na nepájivém poli. Zapojení je poměrně jednoduché, kromě mikrokontroléru je tvořeno několika málo pasivními součástkami, a není důležité se jím dále zabývat.

Pro ověření funkce navrženého zapojení vysílací části detektoru, viz. schéma na obr. č 4, byl zhotoven přípravek. Vzhledem k povaze zapojení (výskyt značných proudů a vysokého napětí) nebylo možné realizovat pokusný obvod jinak než formou desky plošných spojů, dále jen DPS. Schéma a následně i DPS bylo zpracováno pomocí návrhového software Eagle, verze 5.1.0, návrh DPS o rozměrech 68 x 58 mm je v příloze A.2. Přípravek je ve formě modulu, DPS je osazena všemi součástkami a svorkami pro připojení napájecího zdroje, hledací cívky a zdroje řídicího signálu. Detektor kovů bude napájen olověným akumulátorem o napětí 12 V, všechny části jsou tedy navrženy pro stejné napájecí napětí.

Oživení proběhlo po krocích, hledací cívka byla zapojena do obvodu až jako poslední, po oživení generátoru pulzů, budícího stupně a výkonového stupně. Pomocí digitálního osciloskopu na pracovišti, byl zaznamenán časový průběh napětí na hledací cívce, přesněji na výstupním diodovém omezovači, který tvoří se srážecími rezistory dělič napětí, aby nedošlo k poškození osciloskopu vysokým napětím na hledací cívce. Zaznamenaný úsek časového průběhu napětí je na obr. č. 11.





Obr. 11: Časový průběh napětí na hledací cívice

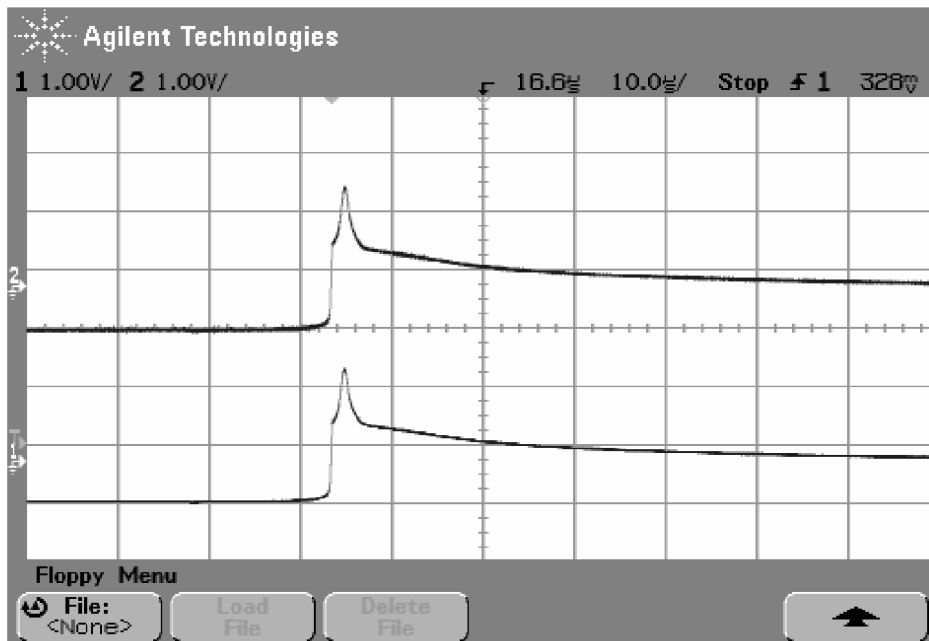
Průběh napětí je invertován, vzhledem k tomu, že užitečný signál je superponován na hodnotu napájecího napětí, tj. 12 V, která je v oscilogramu reprezentována jako nulová úroveň. Obdélníková část průběhu pod nulovou úrovní, je diodou omezená hodnota napětí na cívice, během jejího nabíjení. Průběh je zachycen bez přítomnosti kovu v poli cívky. Po odeznění strmého impulsu samoindukovaného napětí je pozorovatelný mírný zákmit, který by bylo možné odstranit přesnější úpravou hodnot tlumících rezistorů. Po přiblížení kovového předmětu k hledací cívice, byla už v této fázi pozorovatelná změna časového průběhu, vlivem signálu odezvy vířivých proudů v kovu. Pro porovnání jsou v příloze A.3 zachyceny oscilogramy pro různé případy časového průběhu napětí na cívice.

### 3.3 Signálová část

Stejně jako v případě výkonového stupně, byla rovněž přijímací část detektoru vytvořena jako přípravek na DPS. Přípravek je tvořen dvěma obvody, které jsou pro přehlednost na společné desce, avšak jsou odděleny a pracují nezávisle na sobě. Návrh DPS, s rozměry 75 x 45 mm, je rovněž vytvořen v programu Eagle a je uveden jako příloha A.4. Schéma zapojení přípravku je shodné se schématem na obrázku č. 8, oba stupně jsou provedeny samostatně a odděleně včetně svorek napájení. Jedinou změnou je napájení diferenčního zesilovače AD8138, které je zabezpečeno stabilizátory se stejnou hodnotou napětí, avšak s opačnou polaritou. Zpracovávaný signál tak může být vztažen k libovolné napěťové úrovni z rozsahu napájecího napětí. Jelikož integrované obvody jsou v pouzdrech pro povrchovou montáž, jsou umístěny na spodní straně jednostranné desky plošných spojů.

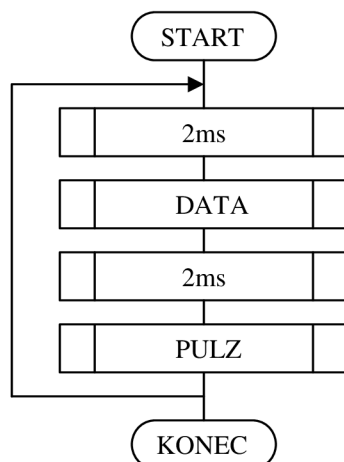
Oživování signálové části hledače probíhalo postupně. Nejdříve byly osazeny napájecí obvody se stabilizátory napětí, teprve po ověření jejich správné funkce byly osazeny i integrované obvody AD8138 a AD8321. K ověření funkce druhého stupně zesilovače, s pevnou hodnotou zesílení, byl využit harmonický a obdélníkový signál z generátoru. Porovnáním vstupního a výstupního signálu, pomocí dvoukanálového osciloskopu, byla ověřena teoretická hodnota zesílení dle (2),  $A_U=2$ .

Zkreslení signálu nebylo pozorovatelné u sinusového, ani obdélníkového průběhu napětí. Na obrázku č. 12 je zachycen průběh vstupního a výstupního napětí při volbě rezistorů v poměru 1:1, tedy bez zesílení. Vstupní signál byl odebrán na výstupním diodovém omezovači, výstupní signál (průběh 2) vykazuje malou změnu, která však mohla být způsobena pouze rušivým polem přístrojů v laboratoři.



Obr. 12: Vstupní a výstupní signál zesilovače s AD8138

Komplikovanější situace nastala při oživení stupně s VGA, neboť hodnota přenosu je volena sériovým řídicím 8bitovým slovem. Zesilovač vyžaduje nejprve zadat hodnotu zesílení, respektive útlumu, pokud hodnota není definována, je výstup zesilovače odstaven a není přenášen žádný signál. Vyžadované parametry sériové komunikace jsou uvedeny v katalogovém listě výrobce. Pro jejich splnění a korektní zadání hodnoty přenosu VGA, bylo nevyhnutelné opět použít mikrokontrolér. Zapojení mikrokontroléru AT89C2051, využitě při oživení výkonové části hledače, bylo rozšířeno o 4 výstupy – hodinový signál, sériová data, potvrzovací datový výstup a výstup pro řízení režimu spotřeby (PD).



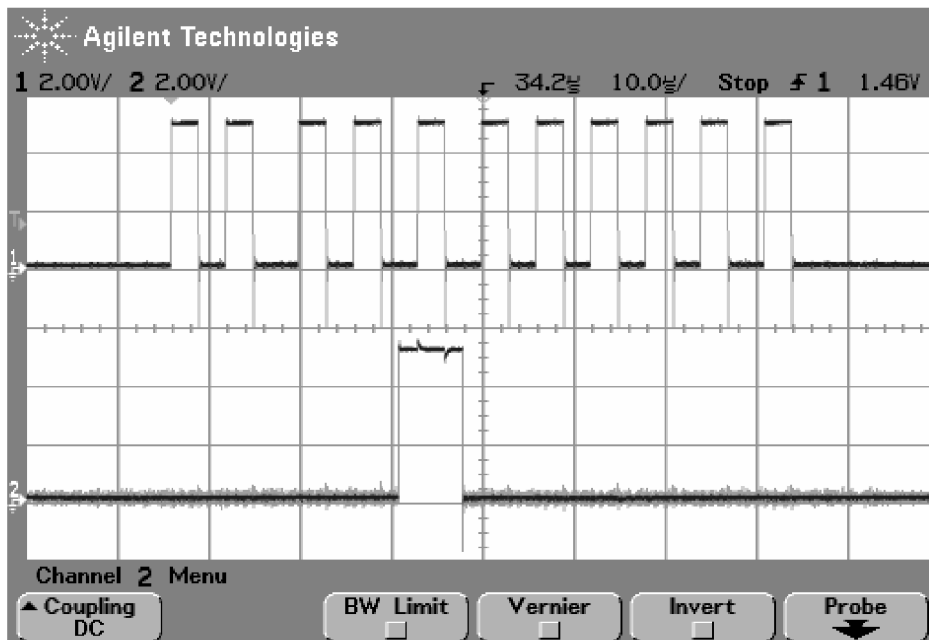
Obr. 13: Vývojový diagram hlavního programu pro řízení hledače

Program pro mikrokontrolér byl upraven a jeho činnost je znázorněna vývojovým diagramem na obr. č 13. Původní část programu, řízení vysílací části, zůstala zachována, pro následné kompletní oživení analogového subsystému detektoru. Program je sestaven pro kmitočet krystalu 12 MHz. Je nezbytně nutné taktovací frekvenci dodržet, při nižší hodnotě krystalu by došlo k prodloužení všech časových relací, a tak k přetížení nebo i zničení výkonového stupně vysílací části hledače.

Hlavní program mikrokontroléru neustále volá podprogramy, které vykonávají zvolené operace. Podprogram časové prodlevy 2ms má pevnou strukturu, nelze ji během programu změnit. Pomocí časových prodlev je tvořena perioda opakovaného hledacího cyklu (opakovací frekvence 250Hz), tak aby byl zajištěn dostatečný časový odstup mezi ostatními volanými podprogramy a došlo k ustálení obvodů po vysílacím pulzu.

Podprogram DATA obsluhuje VGA, pomocí 4 pinů výstupního portu. Sériové 8bitové slovo, k nastavení hodnoty přenosu, lze pomocí tlačítek zvolit, k ověření funkce zesilovače jsou přednastaveny k výběru tři hodnoty, odpovídající maximálnímu útlumu (-27,4dB), přenosu 0dB a maximálnímu zesílení (25dB). Podprogram PULZ obsahuje původní část programu a slouží k řízení vysílací části hledače. Možnost změny délky budícího pulzu pomocí tlačítek zůstala zachována.

Časové průběhy napětí, zachycené osciloskopem na výstupech pro data a hodinový signál, jsou v oscilogramu na obrázku č. 14. Horní průběh zachycuje periody hodinového signálu (clock). Po nastavení logické úrovně potvrzující zápis dat (data enable), během třetí periody, s nástupnou hranou signálu clock nastává zápis řídicího slova. Decimální vyjádření hodnoty přenášeného binárního čísla je 32, což odpovídá přenosu zesilovače -3,3dB.



Obr. 14: Časový průběh řídicích signálů pro volbu přenosu VGA

Zapojení řídicího mikrokontroléru bylo provedeno na nepájivém poli. Jako vstupní signál pro ověření funkce VGA byl opět použit harmonický a obdélníkový signál z generátoru. Během měření se nevyskytly žádné komplikace. Jako poslední bylo na vstup přivedeno napětí z hledací cívky, přesněji z diodového omezovače. V příloze A.5 je, pro srovnání, časový průběh stejného signálu na výstupu VGA pro dvě výše uvedené hodnoty přenosu. V případě maximálního zesílení je zjevná degradace signálu. V zapojení je však počítáno s druhým stupněm zesilovače (obvod AD8138), čímž je vliv vysoké hodnoty zesílení na zkreslení signálu potlačen.

## 4 VÝROBA A OŽIVENÍ DETEKTORU

### 4.1 Návrh DPS

Měřením skutečných parametrů zrealizovaných vzorků jednotlivých částí hledače, byla ověřena jejich použitelnost a mohly být využity ve finálním návrhu detektoru. Mimo výše zmiňované části hledače je schéma doplněno o tlačítka, konektory pro připojení LCD displeje, reproduktor a rozhraní JTAG. Tlačítka, připojená ke vstupně/výstupním pinům DSP, spolu s displejem 4 x 20 znaků a reproduktorem, tvoří uživatelské rozhraní. Připojení detektoru k PC prostřednictvím JTAG je výhodné zejména pro emulaci a ladění programu na čipu. Je umožněno bezprostřední čtení obsahu pamětí a odečítání hodnot proměnných, výsledků výpočetních operací atd. Společné schéma všech částí hledače je uvedeno v příloze B.1.

Návrh desky plošných spojů, dle uvedeného schématu, je v příloze B.2 a B.3. Návrh DPS, stejně jako schéma, byl vytvořen v programu Eagle. DPS je pojata jako oboustranná. Na spodní straně desky (BOTTOM) je umístěn signálový procesor, diferenční zesilovač i řízený zesilovač, neboť jsou v provedení pro povrchovou montáž. Mimoto jsou zde umístěny ještě další pasivní součástky v provedení SMD. Horní strana desky (TOP) je osazena pouze klasickými diskretními součástkami a konektory pro připojení periferních částí detektoru. Propojení vrstev spojů je řešeno využitím vývodů diskretních součástek, pájených v obou vrstvách. Odpadá tak nutnost náročné výroby prokovek. Pro zlepšení odolnosti vůči okolnímu rušení je v návrhu využito „vylití“ volných ploch a mezer mezi spoji, spojené s nulovým potenciálem zdroje. S ohledem na výskyt impulzů o vysokém napětí je toto opatření použito jen mimo úsek výkonové části hledače. Rozmístění výkonových součástek je voleno tak, aby bylo umožněno jejich případné uchycení na chladič, zejména pro stabilizátory napětí  $U_3$  a  $U_4$ , na kterých je při napájecím napětí 12 V vzniklý úbytek napětí přes 8 V. Výsledná deska má rozměry 166 x 80 mm, v rozích je opatřena otvory 2mm pro uchycení.

Výroba byla provedena fotocestou. Šířka některých spojů, především v okolí DSP, musela být volena jen 0,3 mm. Aby při výrobě v amatérských podmínkách byl správně vyleptán i takto jemný reliéf, byla pozitivní matrice tištěna na čirou fólii laserovou tiskárnou s vysokým rozlišením tisku. Každá vrstva byla vyvolána i leptána samostatně, pro přesné sesazení posloužily vrtané kontrolní body. Po odleptání desky byla provedena kontrola vodivých spojů, při které byly zjištěny a odstraněny drobné nedostatky. Při porovnání se složitostí návrhu jejich rozsah nebyl nikterak závažný, šlo především o zkratky v důsledku nedokonalého odleptání některých detailů.

## 4.2 Oživení kompletního zapojení

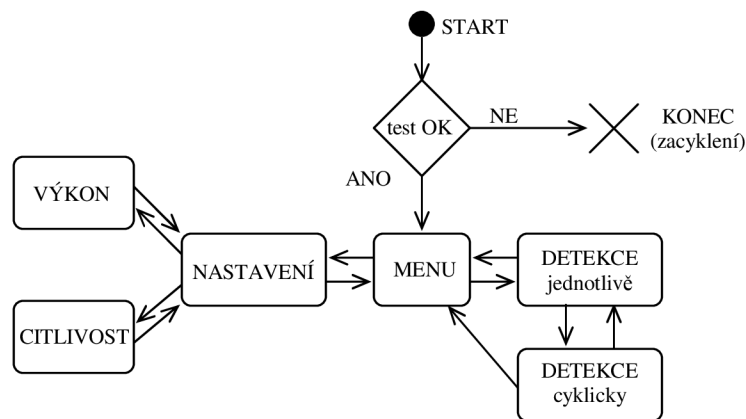
Oživení detektoru probíhalo postupně, nejprve byl osazen mikroprocesor a náležitě periferní součástky. Kovové pouzdro piezo krystalu bylo vodivě spojeno se zemnicí plochou. Osazen byl i konektor a součástky potřebné pro spuštění JTAG. Velmi důležité bylo osazení i zdánlivě nesouvisejících součástek, které však svými vývody spojují obě vrstvy desky. Následovalo osazení součástek tvořících zdroje napětí 1,8 V a 3,3 V pro napájení DSP. Po ověření jejich správné funkce byly jako poslední osazeny i feritové filtry, čímž bylo přivedeno napájení k DSP. Sestavením jednoduchého zkušebního programu, a jeho emulací prostřednictvím JTAG v prostředí Code Composer Studio, byla ověřena správná činnost osazené části zapojení. Následně byly osazeny napájecí obvody zesilovačů a pomocí osciloskopu ověřen přenos a zesílení signálu v přijímací části hledače. Dále byly zprovozněny a odladěny prvky uživatelského rozhraní.

Jako poslední byla osazena výkonová část detektoru. Během ožívování vyvstaly komplikace způsobené procesem emulace, kdy při ukládání dat z PC do paměti DSP jsou všechny I/O piny uvedeny do stavu vysoké úrovně. To způsobí sepnutí výkonového stupně po celou dobu ukládání programu. V případě, že by byla ke svorkám připojena hledací cívka, došlo by patrně k destrukci spínacích prvků, případně i samotné cívky, následkem protékajícího proudu. Jeho velikost by byla v tomto případě dána pouze vnitřním odporem zdroje. Před emulací je tedy nezbytně nutné vždy nejprve odpojit hledací cívku a až po spuštění programu je možné ji opět připojit.

## 4.3 Sestavení řídicího firmware

Všechny obvody detektoru byly samostatně oživeny a ověřena jejich činnost. Oživení detektoru jako celku však vyžadovalo složitější řízení všech částí současně. Proto bylo nezbytné přejít k vytvoření kompletního programu pro řízení chodu detektoru. Jelikož je zapotřebí operativně nastavovat některé parametry detekce, je nevhodnějším řešením sestavení firmware formou stavového automatu.

Využití stavového automatu v programu není nejjednodušším řešením, ale nese s sebou značné výhody. Jedná se především o modulárnost programu, kdy zahrnutí nových částí do původního programu nepředstavuje problém a není nutné rozsáhle upravovat program stávající. Stavový automat ve velké míře napomáhá zabezpečení proti zacyklení programu. Je také umožněno sestavení „kontextového menu“, což je dnes obvyklý způsob obsluhy a usnadňuje ovládání detektoru. V neposlední řadě je i samotný zdrojový kód programu přehlednější. Činnost firmware je popsána stavovým diagramem na obrázku č. 15.



Obr. 15: Stavový diagram řídicího programu

V programu lze přecházet mezi stavy jen podle předem definovaných pravidel. Po spuštění detektoru je nejprve provedena inicializace hledače. Je ověřeno stanovené napětí zdroje a po inicializaci displeje je proveden automatický test detektoru. Automatický test má za cíl ověřit stav výkonové části, cívky a přijímací části hledače. Proudovým impulzem o předem definované šířce je vybudena cívka a poté je se stanoveným zesílením VGA signál z cívky přiveden na vstup převodníku signálového procesoru. V paměti je předem uložen referenční průběh, získaný stejným testem za normálních podmínek, bez přítomnosti kovu. Kvůli okolním vlivům (teplotě okolí, přítomnosti elektromagnetického pole, rušení atd.) je vymezeno toleranční pole, do kterého musí spadat všechny vzorky zachyceného časového průběhu. V případě, že některý vzorek přesáhne vymezené rozhraní, je do pomocné proměnné přičtena tato položka jako chyba. Dojde-li během testu k rozporu s uloženou referenční hodnotou a počet chyb přesáhne tolerovanou hodnotu, pak je test vyhodnocen jako neúspěšný a není umožněno přepnout detektor do žádného následujícího stavu (režimu). V případě že test je úspěšný, je zaveden stavový automat a detektor se nachází v počátečním stavu „MENU“.

Ze stavu „MENU“ je možné přepnout detektor buď přímo do stavu „DETEKCE“ a budou použity předem definované hodnoty volitelných parametrů, nebo do „NASTAVENÍ“ a dále pak ručně nastavit požadovaný parametr. Volitelné parametry představují proměnné, které jsou předány jako parametry příslušným funkcím. Při nastavení výkonu je změněna přednastavená doba nabíjení cívky, čímž je regulován výkon hledače. Nastavením citlivosti je do VGA přenesena volená hodnota přenosu. Aktuální stav, ve kterém se detektor nachází, je zobrazen v prvním řádku displeje. Poslední řádek zobrazuje znaky vysvětlující funkce tlačítek, umístěných pod displejem. Stisknutím patřičného tlačítka detektor přejde do požadovaného stavu, případně je vykonána jiná požadovaná operace. Ve stavu „DETEKCE“ je možné volit mezi dvěma módy. Mezi cyklickým režimem detekce, kdy se programová sekvence neustále opakuje s frekvencí cca 300 Hz, nebo režimem jednotlivého spuštění programové sekvence, kdy uživatel tlačítkem spustí jeden detekční cyklus.

Stavový automat je v jazyce C proveden pomocí funkcí. V těle hlavního programu jsou tedy pouze operace spojené s inicializací detektoru a po automatickém testu je volána funkce stavového automatu (menu). Ostatní stavy jsou rovněž zapsány jako funkce, přičemž jsou respektovány dovolené přechody mezi dvěma stavy. Po zavedení stavového automatu se již běžící program nemůže nikdy vrátit do hlavního programu.

Pro opakující se části programu jsou rovněž vytvořeny funkce, čímž je zdrojový kód značně redukován a i využití paměťového prostoru na čipu je efektivnější. Signálový procesor TMS320F28044 disponuje 20 kB paměti typu SARAM, 8 kB typu ROM a 128 kB paměti typu flash [7]. Paměťový prostor je rozdělen primárně na programovou a datovou paměť. Obě části jsou pak dále děleny do bloků, které jsou alokovány odděleně. Díky tomuto mapování paměti je zabezpečeno, aby při běhu programu nedošlo ke kolizi. V paměti RAM je alokován zásobník návratových adres (stack) a proměnné. Paměť ROM, kvůli omezené velikosti, obsahuje pouze nezbytné instrukce pro zavedení programu z flash (tzv. bootloader). Struktura použitého DSP totiž neumožňuje přímé zavedení programu z paměti typu flash.



## 5 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

### 5.1 Záznam užitečného signálu

Každý detekční cyklus je tvořen proudovým impulzem v hledací cívce, časovou prodlevou (po dobu odeznění přechodových dějů na cívce), následně je spuštěn výstup řízeného zesilovače a tím umožněn záznam užitečného signálu z hledací cívky. Poté je opět výstup VGA deaktivován a další časovou prodlevou je dotvořena požadovaná perioda detekčního cyklu.

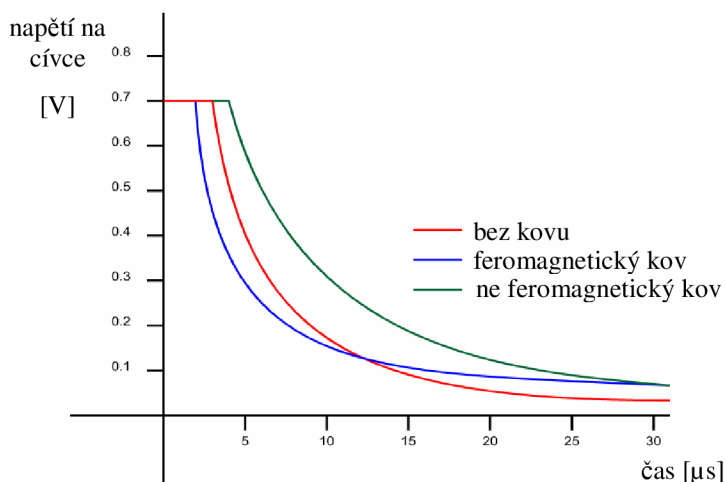
### 5.2 Zpracování v časové oblasti

Použitý signálový procesor disponuje dvěma 8 kanálovými A/D převodníky, přičemž doba převodu jednoho vzorku je podle katalogového listu výrobce [7] 80 ns. Tento údaj je však značně zavádějící, neboť je uveden pro maximální taktovací frekvenci jádra DSP,  $f_{Tmax} = 100$  MHz, kdy převodník je taktován frekvencí  $f_{ADC} = 25$  Mhz. Skutečná taktovací frekvence je volena 60 MHz s ohledem na možné hazardy během komunikace s PC rozhraním JTAG při emulaci. Pro použitou frekvenci (taktovací frekvence AD převodníku  $f_{ADC} = 12,5$  MHz) vychází teoretická doba převodu dvojnásobná, tj. 160 ns. Uvedená doba je však patrně míněna pouze pro jeden osamocený převod (jedna instrukce v JSA) a nezahrnuje další nutné operace, například uložení hodnoty, opakování cyklu s inkrementací pomocné proměnné, nastavení příznakových bitů apod..

Při sestavení jednoduchého programu v jazyce C pro záznam 1000 vzorků digitalizovaného signálu, přivedeného ke vstupu jednoho kanálu převodníku, byla změřena skutečná doba převodu 80  $\mu$ s, což se řádově rozchází s udávanou hodnotou. Pro řešení tohoto problému byl využit doplněk, jímž disponuje použitý DSP. Jedná se o sekvenční převod všech kanálů daného převodníku v jediném cyklu. Vnitřní struktura A/D převodníku je totiž fyzicky tvořena multiplexorem a jediným A/D převodníkem. Dalšího urychlení doby převodu bylo dosaženo zkrácením periody vzorkovacího obvodu na polovinu. Toto opatření nemá dopad na výsledný digitalizovaný signál, což bylo ověřeno i pokusným měřením. Výsledný program pak byl upraven tak, že záznam požadovaného počtu vzorků (násobky 8) je realizován jako opakování sekvenčního převodu všech kanálů převodníku. Vstupní signál je tedy přiveden ke všem osmi vstupním kanálům zároveň. Vzniká tak sice periodická chyba v zaznamenaném časovém průběhu, ta se však při následné frekvenční analýze projeví jako rušení v oblasti vyšších frekvencí a neměla by ovlivnit důležitou část spektra. Výsledná doba převodu jednoho vzorku je přibližně 250 ns. Vzhledem k povaze zpracovávaného signálu je tato hodnota již plně dostačující.

Pro samotnou detekci přítomnosti kovu v poli cívky by bylo možné aplikovat princip užitý při automatickém testu hledače - jednoduché porovnání zaznamenaného časového průběhu s průběhem referenčním. Ten je získán bez přítomnosti kovu v elektromagnetickém poli cívky a tedy bez jakékoliv odezvy vířivých proudů.

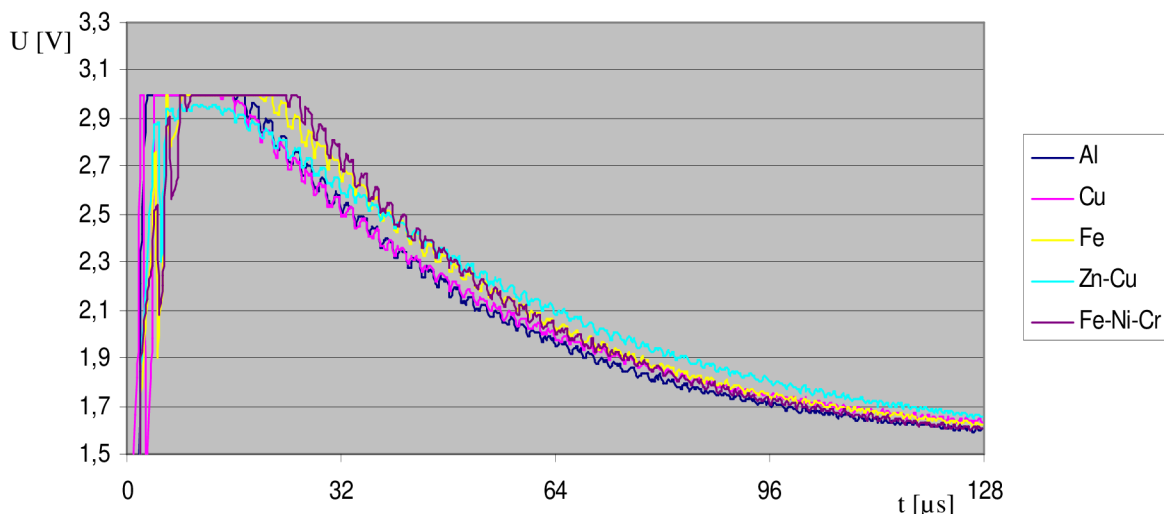
Časový průběh užitečného signálu je značně závislý jednak na vzdálenosti předmětu od hledací cívky (viz. příloha A.3), ale také na mnoha dalších faktorech, které spolu částečně souvisí. Na obrázku č. 16 je znázorněn vliv magnetických vlastností kovu na časový průběh zachyceného signálu. Další faktory ovlivňující užitečný signál jsou především hmotnost, tvar a další fyzikální vlastnosti daného kovu. Pro rozbor vlivu těchto faktorů je nutné předkládat vždy pouze vzorky se srovnatelnými parametry a za stejných okolních podmínek.



Obr. 16 Vliv magnetické vodivosti na signál odezvy

Jako referenční vzorky byly proto použity plechy o rozměrech 80 x 120 mm, tloušťky 0,5 mm. Vzorky kovů jsou z hliníku, nemagnetické nerezové oceli, pozinkované oceli, mědi a mosazi. Optimální vzdálenost vzorku od hledací cívky byla pokusně stanovena na 10 cm. Zachycené časové průběhy, získané reálným pokusným měřením, jsou pro srovnání uvedeny na obrázku č. 17. Změny takřka nejsou pozorovatelné pro vzorky z hliníku a mědi, rozdíl mezi ocelovým vzorkem a vzorkem z nerezové oceli (Fe-Ni-Cr) je také minimální. Naproti tomu je značný rozdíl mezi průběhy získanými při předložení vzorků z oceli a hliníku nebo mědi a velmi výrazné jsou odlišnosti v časovém průběhu pro vzorek z mosazi (slitina Zn-Cu).

Jelikož mechanické rozměry všech vzorků jsou totožné a také jejich vzdálenost je konstantní, lze se domnívat, že na změně časového průběhu se uplatňuje elektrická či magnetická vodivost a hmotnost, která je v daném případě charakteristická pro předložený vzorek z daného kovu. Porovnáváním časových průběhů by za dodržení výše uvedených podmínek již bylo možné rozlišit dva podobné předměty z rozdílného materiálu. Tato metoda by však byla použitelná spíše pro identifikaci konkrétního předmětu, než pro rozlišení kovu. Její použití je navíc podmíněno přísným dodržením stanovených podmínek.



Obr. 17 Zaznamenané časové průběhy signálu odezvy

## 5.3 Zpracování ve frekvenční oblasti

Na základě analýzy signálu v časové oblasti je možné určit, zda je v dosahu hledače kovový předmět, případně lze při známé vzdálenosti orientačně určit jeho velikost. Pro získání informací o materiálu je tato metoda nedostatečná. V literatuře [4] je popisován rozdíl užitečného signálu v závislosti na elektrických a magnetických vlastnostech kovů. Základním znakem je rozdílná strmost a tvar přibližně exponenciální křivky zániku vířivých proudů, viz obr.16. Při obecné detekci je zpracování v časové oblasti neúčinné, rozdíly se vlivem velikosti, tvaru případně vzdálenosti mohou stírat. Možným řešením se nabízí převedení signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční.

### 5.3.1 Fourierova transformace

Pro výpočet spektrální funkce je zpravidla použit matematický aparát Fourierovy transformace, díky kterému je časově závislý signál možné interpretovat jako soubor harmonických signálů. Pro zpracování signálu v diskrétním čase je použit algoritmus diskrétní Fourierovy transformace [8]. Matematicky je tento vztah je vyjádřen

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-ink 2\pi / N} ; \quad n=0, \dots, N-1$$

kde:  $\{D(n)\}_{n=0}^{N-1}$  je posloupnost n frekvenčních koeficientů

$\{d(k)\}_{k=0}^{N-1}$  je posloupnost k vzorků diskrétního signálu v čase

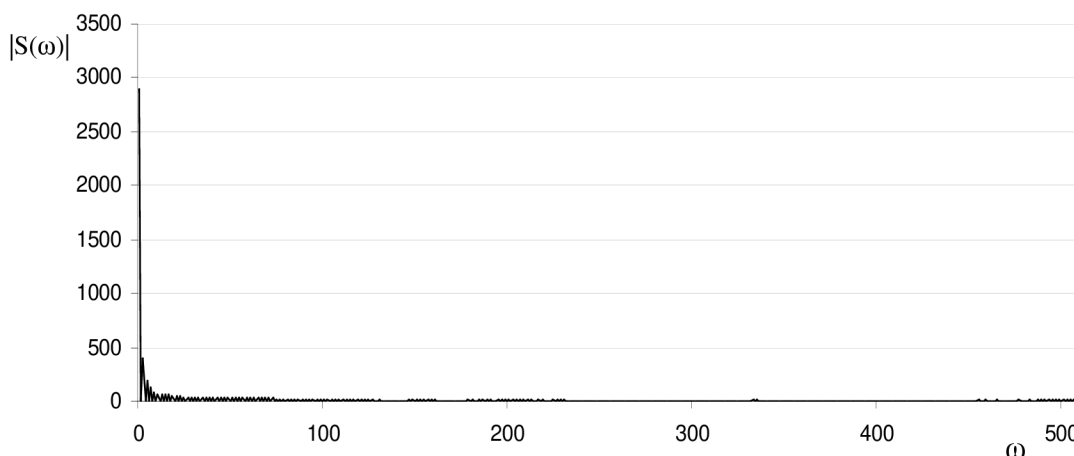
Přímý výpočet DFT podle uvedeného vztahu by vyžadoval  $N^2$  komplexních součinů a stejný počet komplexních součtů. Proto je na čipu využít algoritmus rychlé Fourierovy transformace (FFT), který klade mnohem menší nároky při výpočtu. Počet komplexních součinů při výpočtu FFT je  $\frac{N}{2 \log_2(N)}$ , počet komplexních součtů jen  $N \cdot \log_2(N)$ .

Frekvenční analýza užitečného signálu je v DSP realizována výpočtem 512 prvkové FFT. Algoritmus výpočtu je sestaven přímo v JSA a je určen pro jádra DSP

C2000. Použitý signálový procesor spadá do této kategorie, má 32 bitové výpočetní jádro s pevnou řádovou čárkou. Metoda výpočtu je založena na obvyklém principu se strukturou „butterfly“. Před výpočtem FFT je nejprve vypočítáno  $N/2$  koeficientů, tzv. „twiddle“ konstanty, které jsou uloženy do paměti. Dále je do části paměti alokované pro vstupní data uloženo 512 vzorků signálu, a to v bitově reverzním pořadí. Jelikož je výpočet realizován stejným algoritmem, jaký je využit pro komplexní signál, je proveden výpočet pro  $N/2$  sudých a lichých vzorků zvlášť. Výsledky pro liché a sudé vzorky jsou následně přepočítány do  $N$  výsledných koeficientů. Po vykonání všech instrukcí výpočtu FFT je ve stejné části paměti uložen výsledek, již ve správném pořadí.

### 5.3.2 Vyhodnocení výsledků spektrální analýzy

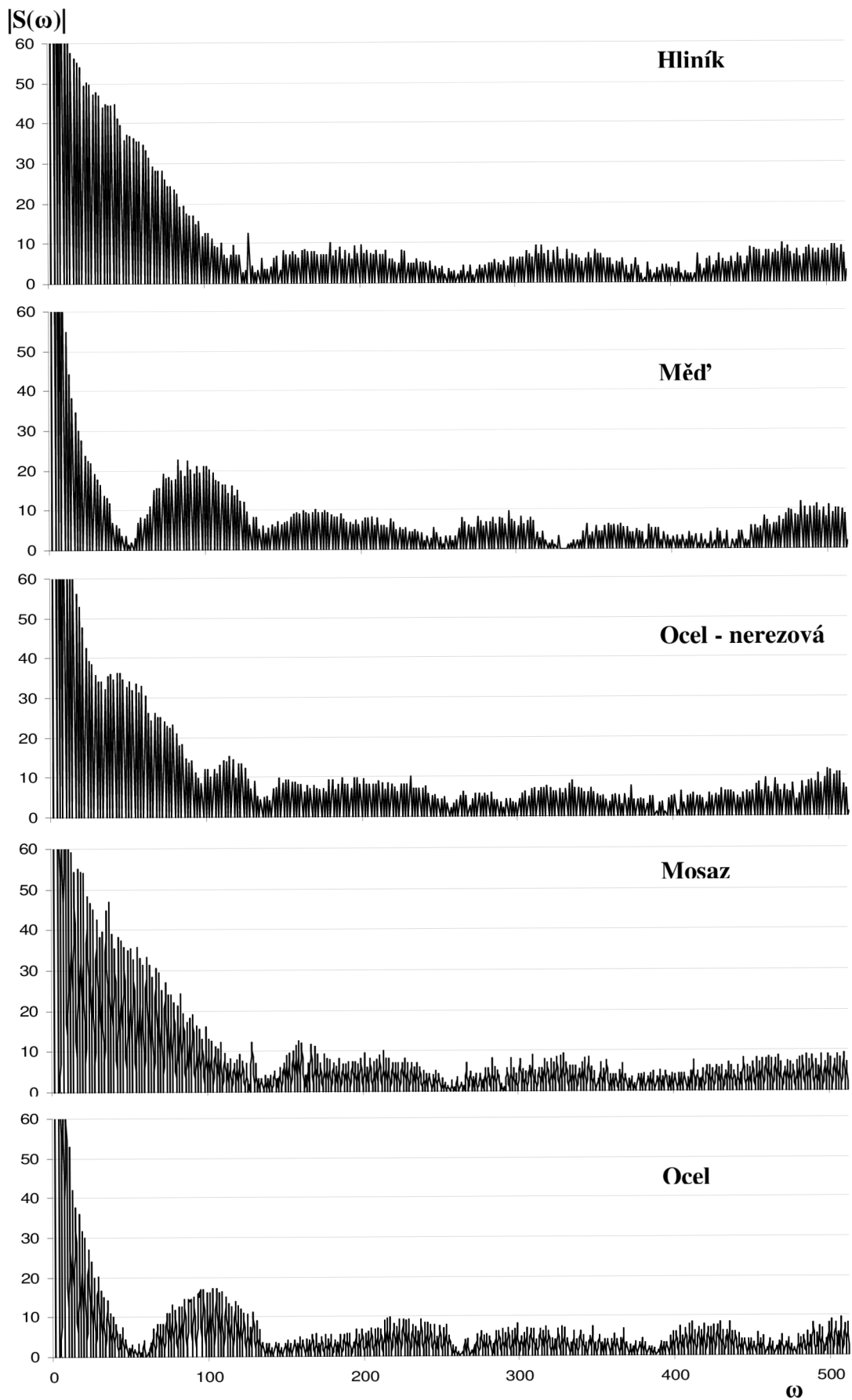
Po ověření správnosti výpočtu harmonickým signálem (pouze jediná výrazná složka ve spektru) byla provedena spektrální analýza časových průběhů (viz z obr. č 17), získaných předložením kovových vzorků. Výsledek výpočtu FFT, provedeného na čipu, je na obrázku č. 18. Je patrné, že se ve spektru nevyskytuje žádná výrazná harmonická složka, znatelný je pouze nultý koeficient – stejnosměrná složka.



Obr. 18 Spektrum signálu získané výpočtem FFT

Detailním porovnáním složek o malém výkonu, především v oblasti nízkých kmitočtů, je však možné vyzorovat určité změny mezi složením spektra pro jednotlivé vzorky kovu. Spektrální funkce časových průběhů pro všechny předložené vzorky jsou na obrázku č. 19. Výraznější rozdíl je patrný například mezi ocelovým a mosazným vzorkem, pro porovnání jsou obě spektra vyneseny ve společném grafu na obrázku č. 20. Měřením bylo zjištěno, že odlišné proporce některých oblastí spektra zůstávají zachovány i při opakovaných testech daného kovu. Nejedná se tedy o náhodnou změnu.

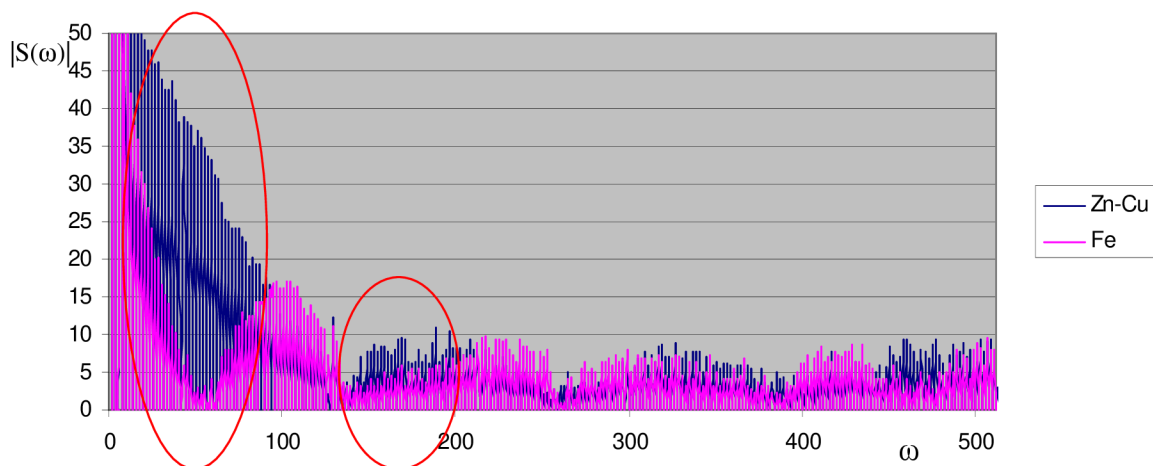
Dalším měřením byl prošetřen vliv změny polohy vzorku v poli hledací cívky. Změnou polohy vzorku, vůči stanovené referenční poloze, dochází ke změnám celého spektra, včetně zmiňovaných oblastí, a klasifikace parametrů předloženého vzorku je znemožněna. Jako možné východisko se nabízí využití řízený zesilovač a změnou zesílení kompenzovat úroveň signálu, která s oddalováním předmětu klesá. Ve skutečnosti však nedochází pouze k poklesu úrovně, ale také k degradaci celého průběhu, který se tak stává pro analýzu nepoužitelným.



Obr. 19 Spektrální funkce pro předložené vzorky

Pro vzorky z mědi a oceli, stejně tak hliníku a mosazi, není změna bezpečně rozpoznatelná. Při opakovaném měření se nevyskytly žádné prvky, jednoznačně poukazující na předložený kov. Měď, stejně jako chrom obsažený v nerezové oceli, patří do skupiny diamagnetických kovů, ocel je ferromagnetická. Hliník, jako jediný z uvedených vzorků, patří do skupiny paramagnetických kovů. Magnetická vodivost se tedy zřejmě výrazněji neuplatňuje, neboť dochází k záměnám kovů s rozdílnými magnetickými vlastnostmi.

Pro pokusné rozlišení kovu, které je zahrnuto do programu, byly zvoleny vzorky z mosazného a ocelového plechu. Spektrální funkce obou vzorků jsou ve společném grafu na obrázku č. 20. Pro rozlišení kovu byly stanoveny 3 parametry, které musí být s určitou tolerancí shodné se stanovenou referenční hodnotou. Jako dva parametry jsou vybrány vzorky z vyznačených oblastí spektra. Třetím parametrem je stejnosměrná složka, která se v malém rozmezí také liší. Při použití jednoho či dvou referenčních vzorků byly výsledky rozlišení neprůkazné. Přidáním třetího parametru došlo sice při opakovaných pokusech ke snížení počtu rozpoznání, avšak počet nesprávných určení výrazně poklesnul.



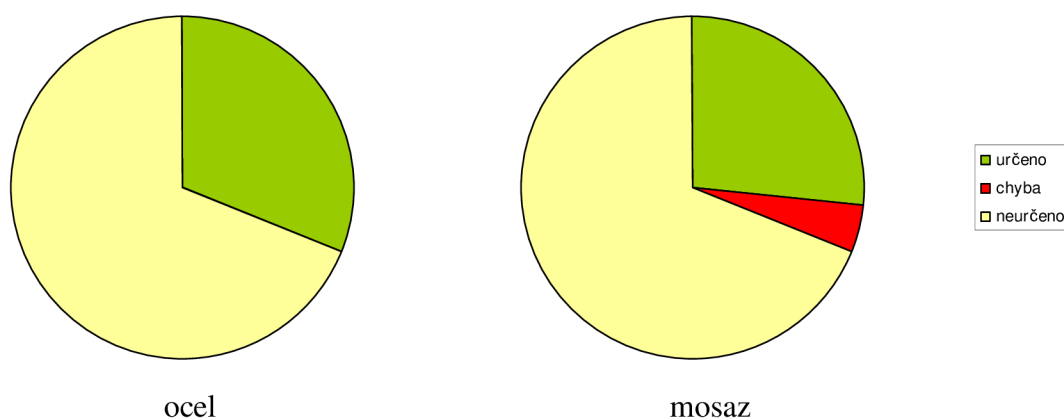
Obr. 20 Porovnání odlišností spektrálních funkcí

## 6 CELKOVÉ SHRnutí

### 6.1 Dosažené parametry

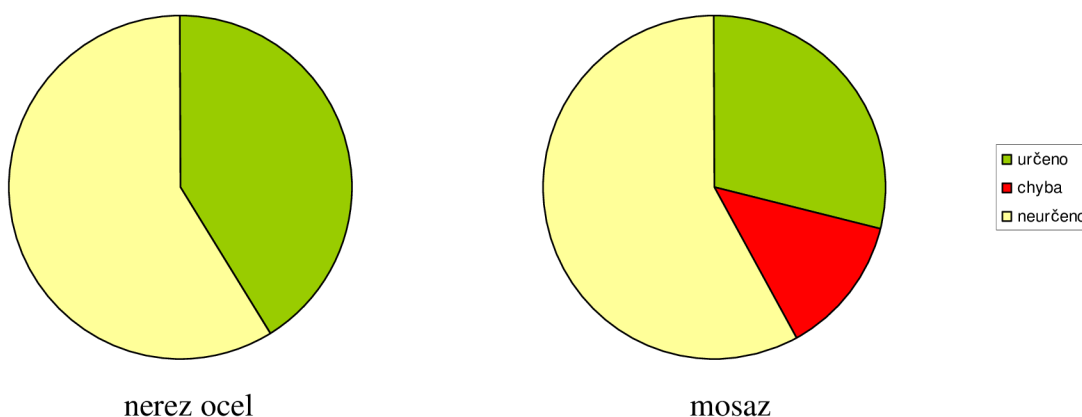
Mezi nejdůležitější parametry hledače obvykle patří dosah. U profesionálních detektorů, pracujících na pulzně indukčním principu, bývá obvykle maximální dosah přibližně 1 m i více. Dosah detekce je rozhodující při využití hledače v terénu, pokud je tedy k tomuto účelu stavěn. Dosah navrženého a vyrobeného detektoru je pro předkládané vzorky (plechy 80x120x0,5 mm o hmotnosti přibližně 35 g) pouze cca 15 – 20 cm, pro masivní předměty až 30 cm. Prvořadým cílem práce však nebylo vytvoření hledače s extrémním dosahem, proto nebyl při návrhu ani následném oživování brán zřetel na optimalizaci výkonu a dosahu.

Pokusným měřením byl řídicí program odladěn a doplněn částí pro zpracování signálu k rozlišení kovu. Pro ukázkou byly vybrány vzorky, jejichž rozlišení se jeví jako nejlépe proveditelné. Zvolen byl ocelový a mosazný vzorek, jejich spektrální funkce se vzájemně liší nejvíce. Detekce kovu je řešena vyhodnocením časového průběhu signálu odezvy. V případě, že je kovový předmět detekován, proběhne frekvenční analýza zaznamenaného signálu. Na základě výše zmiňovaných rozdílů spektrálních funkcí jednotlivých vzorků je podle vhodně zvolených kritérií rozhodnuto, zda jde rozlišit předložený vzorek. Pokud ano, je vybrán pravděpodobný typ kovu. V opačném případě je nález pouze indikován a kov zůstane nerozlišen. Parametry, podle kterých je rozlišení prováděno, byly mnohokrát pozměněny, aby bylo dosaženo co nejnižší chybovosti. Po odladění programu byl proveden test k ověření rozlišovací schopnosti pro mosaz a železo. Pro každý vzorek byl proveden samostatný test v režimu ručního spouštění a byl 100x opakován. Výsledky pokusů o rozpoznání kovu jsou znázorněny v grafu na obrázku č. 21.



Obr. 21 Výsledky rozpoznání kovu

Z grafu je patrné, že při rozlišení ocelového vzorku nedošlo k žádné chybě. Při rozlišení mosazi došlo k několika selháním, nicméně i přes to je v souhrnu průkazně rozlišen správný kov. Aby byl potvrzen vliv materiálu na rozlišení a byly vyloučeny případné cizí vlivy, byl proveden stejný test pro jiné dva vzorky. Namísto pozinkovaného ocelového plechu byl předkládán plech z nerezové oceli o stejné tloušťce a místo původního pravidelného obdélníkového plechu z mosazi o tloušťce 0,5 mm byl předkládán mosazný plech o tloušťce 0,4 mm s nepravidelným tvarem. Výsledky opakovaného testu jsou znázorněny v grafech na obrázku č. 22.



Obr. 22 Výsledky opakovaných testů

U ocelového plechu je opět nulová chybovost určení kovu. Jiná situace je u mosazi, kde míra chybovosti vzrostla o 9 %. Větší počet chyb patrně souvisí se zmenšením síly plechu o 0,1 mm, s čímž došlo úměrně i ke snížení hmotnosti vzorku o cca 20 %. Souhrn výsledků všech zaznamenaných pokusů je uveden v tabulce č. 3.

Tabulka 3: Výsledky všech pokusů o rozlišení kovu

Vzorek	určeno	neurčeno	chyba
	[%]		
Mosaz 0,5 mm	27	69	4
Mosaz 0,4 mm	29	58	13
Ocel 0,5 mm	31	69	0
Nerez ocel 0,5 mm	41	59	0

Proudový odběr detektoru, při napájení z olověného akumulátoru 12 V, je v režimu ručního spouštění 210 mA. Přepnutím do režimu cyklické detekce odběr vzroste na 500 mA. Při změně nastavení výkonu z předdefinovaných 90 % na 50 % odběr při cyklickém režimu klesne na 300 mA.



## 6.2 Náměty pro vylepšení a rozšíření

Během ladění programu a pokusných měření vyvstaly některé komplikace. Například zvolené řešení A/D převodu není ideální. Časový průběh je zvlněný vlivem přepínání kanálů převodníku. Analogové multiplexory na čipu DSP vykazují nesymetrii při přenosu signálu z jednotlivých vstupů. Dodatečná korekce hodnot není možná, neboť se změnou vstupního napětí se mění i velikost nesymetrie vstupů. Nejjednodušším řešením tohoto problému by bylo využití plnohodnotného DSP, například řady TMS320C. Využitý čip TMS320F28044 bývá neoficiálně označován jako DSC (Digital Signal Controller). Rozdíl mezi řadami je jednak ve výpočetní kapacitě procesoru, ale také v rychlosti převodu signálu. Pokud by bylo vzorkování a následný A/D převod dostatečně rychlé, nebylo by nutné využívat toto náhradní řešení a vliv asymetrie vstupů by se neuplatnil. Jiným řešením by bylo využití externího převodníku. Při využití rychlého převodníku s větším vstupním rozsahem by také bylo možné užitečný signál nejprve výrazně zesílit. Stávající rozsah je 0 až 3 V s rozlišením 0,7 mV. Zatímco zaměnění DSP za jiný je díky stejným pouzdrům a totožnému rozložení vývodů jednoduché, použití externího převodníku by znamenalo zásah do celého zapojení. To je spojeno s novým návrhem DPS, v obou případech pak se změnou části programu.

Dlouhodobými zkouškami bylo zjištěno, že použitý řízený zesilovač vykazuje teplotní drift hodnoty přenosu. Pokud vlivem driftu dojde k překročení stanovených parametrů signálu, je změněna hodnota přenosu. Toto řešení by ale ke správné funkci vyžadovalo propracovanější odladění programu. Volbou vhodnějšího zesilovače s menším teplotním driftem by však celý tento problém odpadl. Využitý VGA je primárně určen k použití v kabelové televizní technice.

Odstraněním uvedených nedostatků by bylo možné získat kvalitnější signál odezvy vířivých proudů, a tím zvýšit dosah detekce. To by se mohlo projevit i ve snížení náchylnosti ke změně spektra oddálením kovu od cívky, rozlišení kovů by tak bylo snazší. Výhodné by bylo i jiné provedení některých podružných detailů. Například stabilizátory napětí by bylo výhodnější použít typu low-drop, např. typ LM1117. Byl by tak značně snížen ztrátový výkon, nehledě k tomu že jsou v provedení SMD a zcela odpadá nutnost montáže na chladič.

Stávající firmware pro DSP je koncipován tak, aby jej bylo možné snadno rozšiřovat a pozměňovat. Například část programu pro zpracování signálu, při režimu cyklické detekce, by bylo výhodné doplnit algoritmem kumulace. Princip kumulace spočívá v zaznamenávání signálu několika opakovaných měření, tzv. repetice. Vhodnou matematickou operací je vytvořen průměrovaný výsledný signál, který je následně zpracován. Výhodou této metody je eliminace nežádoucích vlivů na zpracovávaný signál, jako jsou například zdroje impulsního rušení. Při využití váhování repetice je další výhodou omezení vlivu pohybu předmětu v poli cívky. Na výsledném signálu se totiž nepodílí všechny repetice stejnou měrou, nedochází tak ke skokovým změnám zpracovávaného signálu, jeho změny jsou plynulé. Využitím metod kumulace by tak bylo možné řešit i vliv samotného pohybu hledací cívky v magnetickém poli Země. Tyto úpravy by jistě našly své uplatnění při využití detektoru v terénu.

## 7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo shrnout problematiku detekce kovů pulzně-indukčním principem, navrhnout kompletní detektor se zpracováním signálu pomocí DSP a navržený detektor vyrobit. Dílčí části zapojení byly podrobeny ověření dosažených parametrů a to jak ve fázi návrhu, pomocí výpočtů či parametrické analýzy, tak i měřením skutečných hodnot a časových průběhů na přípravcích zhotovených dle návrhu. Po dokončení návrhu obvodového řešení byl zhotoven návrh desky plošných spojů a následně celý detektor oživen. Byl sestaven program pro řízení jednotlivých částí hledače a také program pro zpracování a analýzu signálu.

Výsledkem je tedy funkční prototyp detektoru kovů, který na základě frekvenční analýzy signálu odezvy vířivých proudů je schopen rozlišit předložené vzorky, tj. mosazný a ocelový plech. Pokusným měřením bylo prokázáno, že zvolená metoda je s určitými omezeními použitelná. Dalším vylepšením hardware a firmware detektoru by bylo možné detektor vybavit nejen funkcí univerzálnějšího rozpoznání kovu, ale například i možností detekovat konkrétní předmět.

Navržený detektor by mohl najít uplatnění například v průmyslu, pro třídění surovin, kontrolu kontaminace potravin, nebo i jako detektor kovů s obecným použitím. Skutečnému použití by však muselo předcházet rozsáhlé testování a také metoda rozpoznání by musela být mnohem detailněji propracována.

# LITERATURA

- [1] HÁJEK, J. JARCHOVSKÝ, Z. *Detektory kovů – návod na stavbu*. BEN – technická literatura, Praha, 2010.
- [2] WILHELM, R. *Hledače kovů*. Nakladatelství HEL, Ostrava, 2003.
- [3] SCHULER, W. *Vyhledávací technika pro profesionály*. BEN – technická literatura, Praha, 2000.
- [4] HÁJEK, J. *Elektronické hledače*. BEN – technická literatura, Praha, 2001.
- [5] MOLTAŠ, Z. *Detektory kovů prakticky aneb zapni a hledej*. BEN – technická literatura, Praha, 2007.
- [6] Analog Devices *AD8321: Gain Programmable CATV Line Driver* [online]. 2005 [cit. 10. 12. 2011]. Dostupné z URL :  
<[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8321.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8321.pdf)>
- [7] Texas Instruments: *TMS320F28044 Digital Signal Processor: Data Manual* [online]. 1.2010 [cit. 5. 5. 2012]. Dostupné z URL :  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28044.pdf>>
- [8] Smith, W. S.: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. [online]. 17.11.2001 [cit. 7.5.2012]. San Diego, California Technical Publishing. Dostupné z URL:  
< <http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

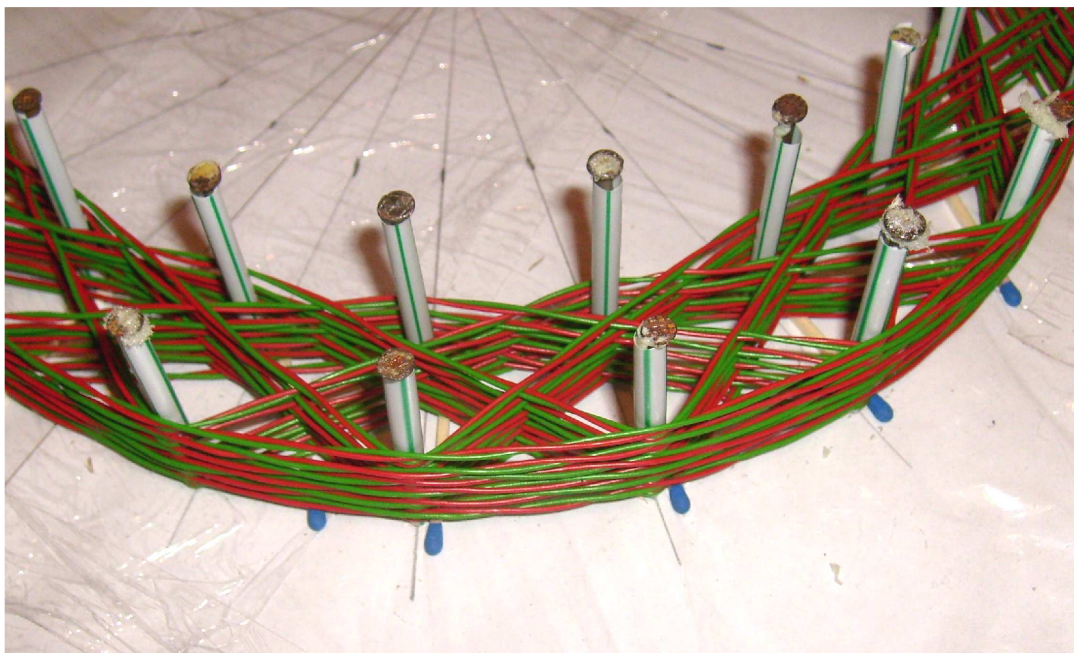
A/D	Analog to Digital, digitální převodník analogového signálu
<i>D</i>	Diskriminant řešené soustavy rovnic
DFT	Discrete Fourier Transform, diskrétní Fourierova transformace
DPS	Deska Plošných Spojů
DSP	Digital Signal Processor, digitální signálový procesor
DC	Duty Cycle, činitel plnění signálu
FFT	Fast Fourier Transform, rychlá Fourierova transformace
JSA	Jazyk Symbolických Adres
LCD	Liquid Crystal Display, displej z kapalných krystalů
OZ	Operační Zesilovač
PVC	Poly-Vinyl-Chlorid (izolační materiál)
<i>Q</i>	Činitel jakosti cívky
SMD	Surface Mounted Device, součástka pro povrchovou montáž
VGA	Variable Gain Amplifier, zesilovač s proměnnou hodnotou přenosu

# SEZNAM PŘÍLOH

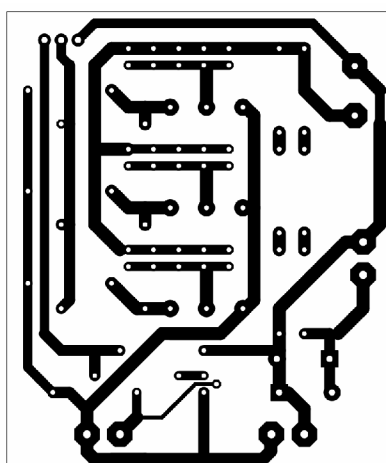
<b>A</b>	<b>KOMPLETNÍ NÁVRH DETEKTORU</b>	<b>37</b>
A.1	Detail hledací cívky před zalitím .....	37
A.2	Návrh DPS modulu pro měření parametrů výkonové části hledače – bottom (strana spojů) .....	37
A.3	Časový průběhu napětí na cívce při přiblížení kovu.....	38
A.4	Návrh DPS modulu pro měření parametrů přijímací části detektoru – bottom (strana spojů) .....	39
A.5	Časové průběhy napětí výstupního signálu VGA při různé hodnotě přenosu.....	39
<b>B</b>	<b>NÁVRH DPS</b>	<b>41</b>
B.1	Obvodové zapojení detektoru kovů .....	41
B.2	Deska plošného spoje detektoru kovů – bottom (strana spojů) .....	42
B.3	Deska plošného spoje detektoru kovů – top (strana součástek).....	42
<b>C</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>43</b>

# A KOMPLETNÍ NÁVRH DETEKTORU

## A.1 Detail hledací cívky před zalitím

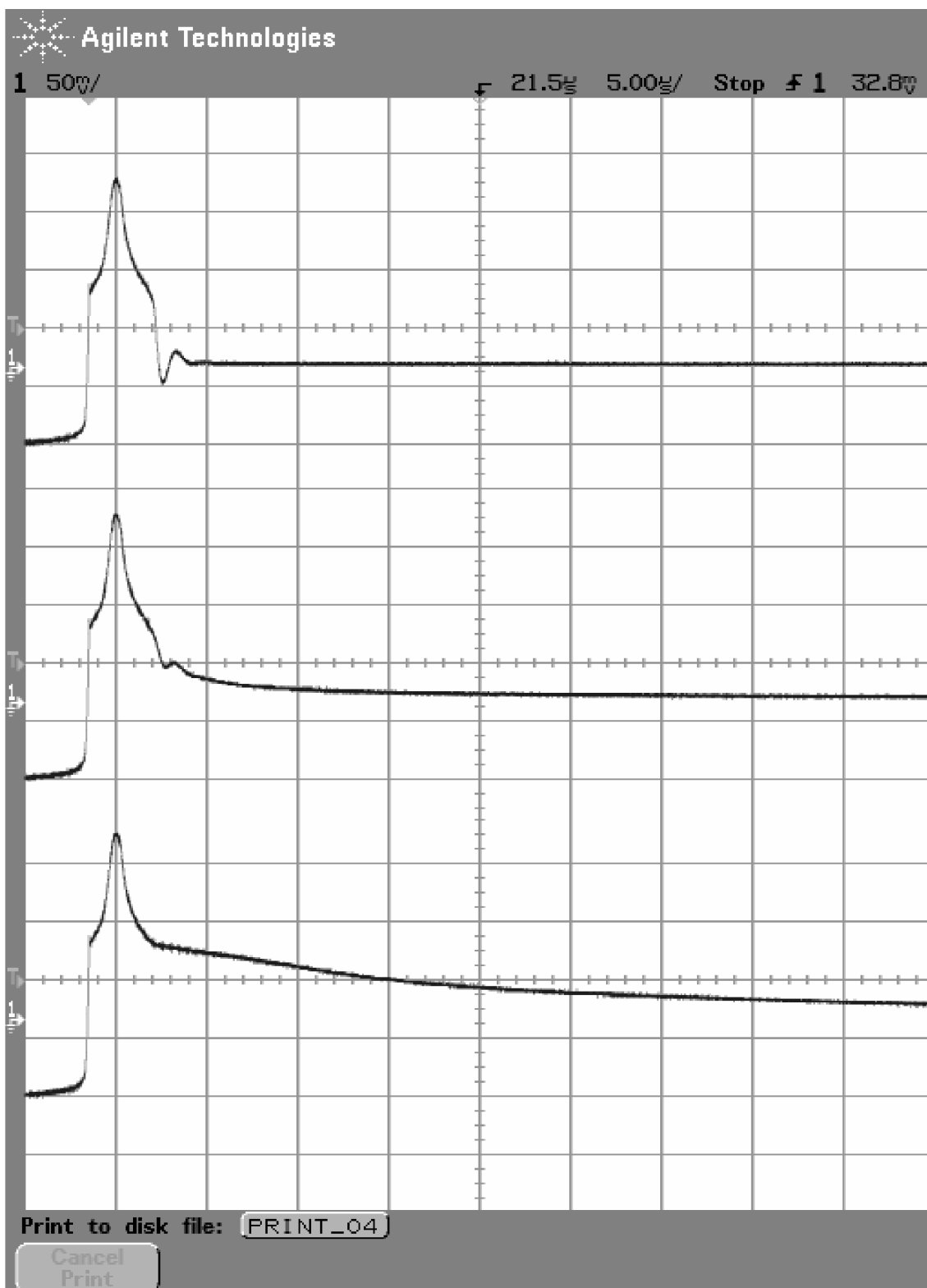


## A.2 Návrh DPS modulu pro měření parametrů výkonové části hledače – bottom (strana spojů)



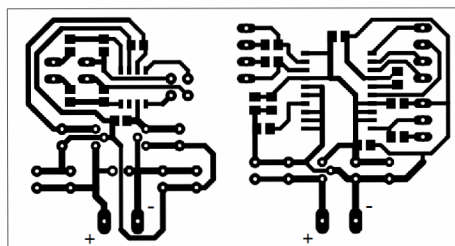
Rozměr desky 68 x 58 [mm], měřítko M1:1

### A.3 Časový průběh napětí na cívce při přiblížení kovu



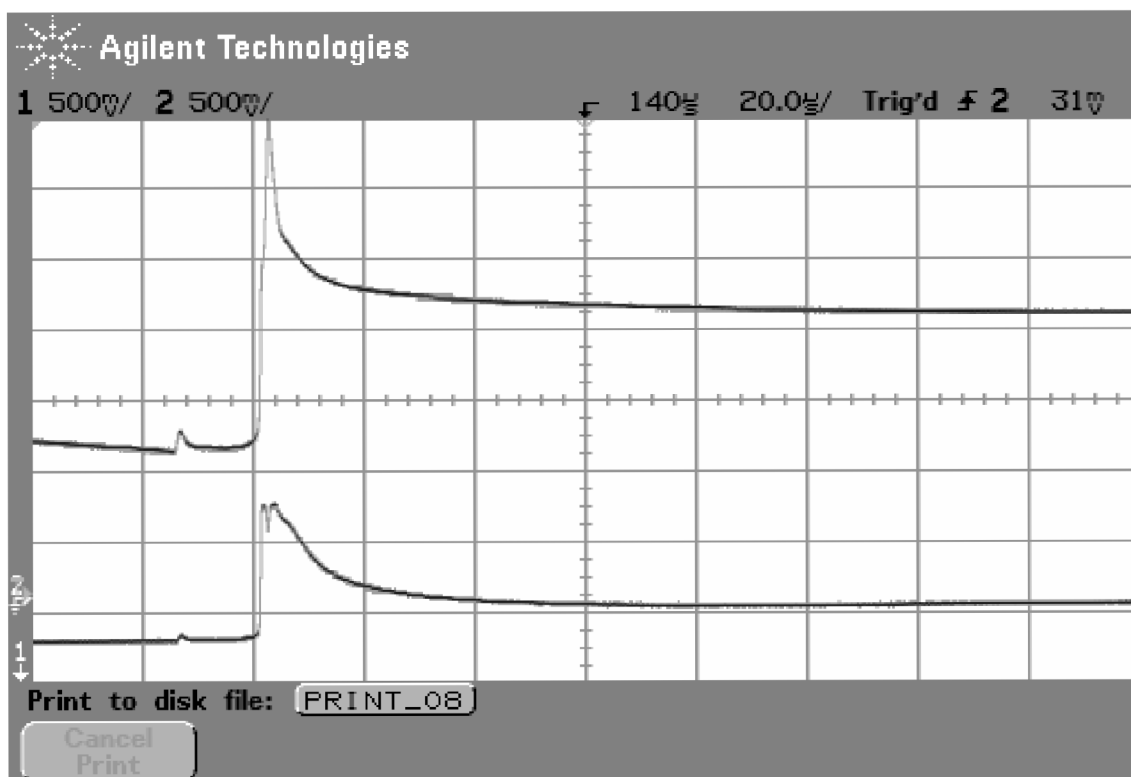
S postupným přibližováním kovu k cívce je pozorovatelná změna časového průběhu, objevuje se signál odezvy vířivých proudů, vybuzených v kovovém předmětu.

#### A.4 Návrh DPS modulu pro měření parametrů přijímací části detektoru – bottom (strana spojů)



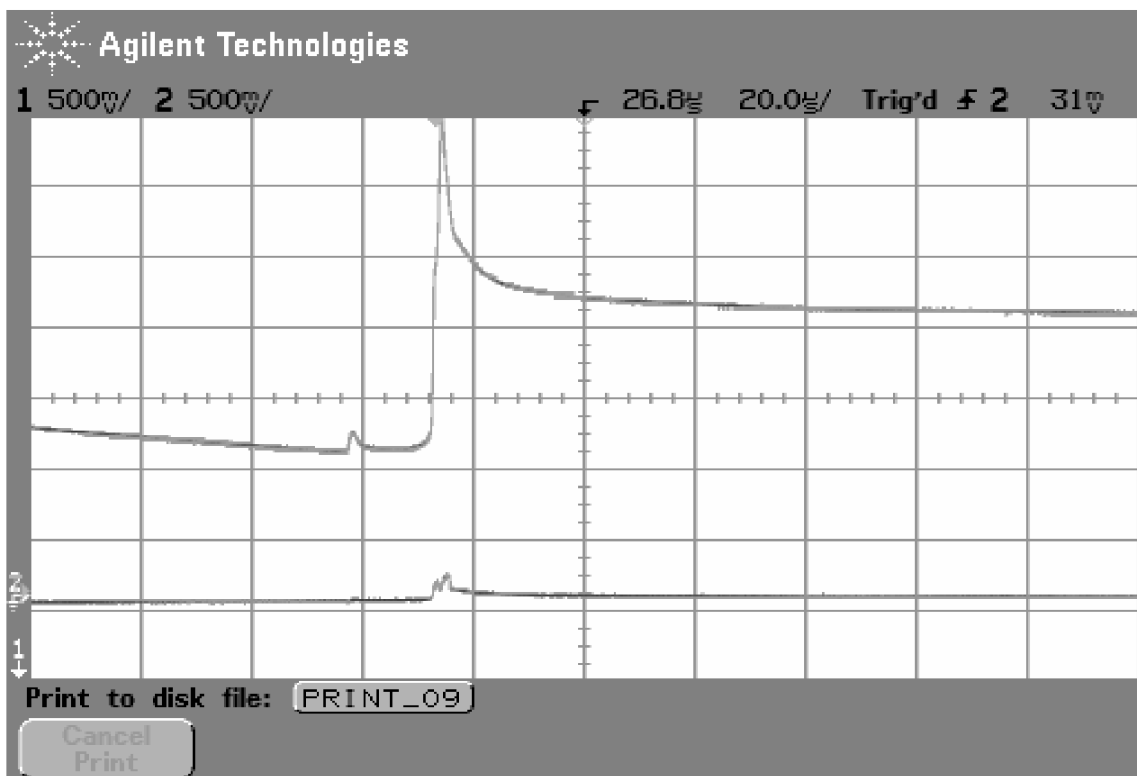
Rozměr desky 75 x 45 [mm], měřítko M1:1

#### A.5 Časové průběhy napětí výstupního signálu VGA při různé hodnotě přenosu

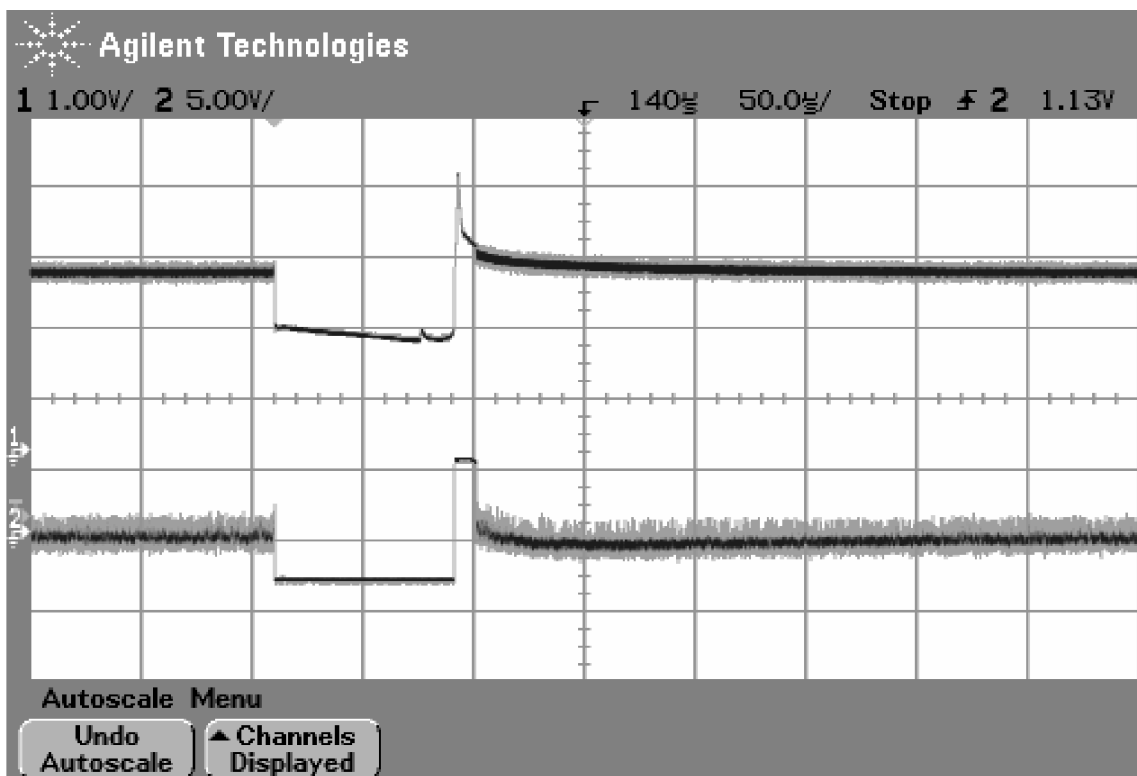


Hodnota přenosu  $A_U = -3$  dB





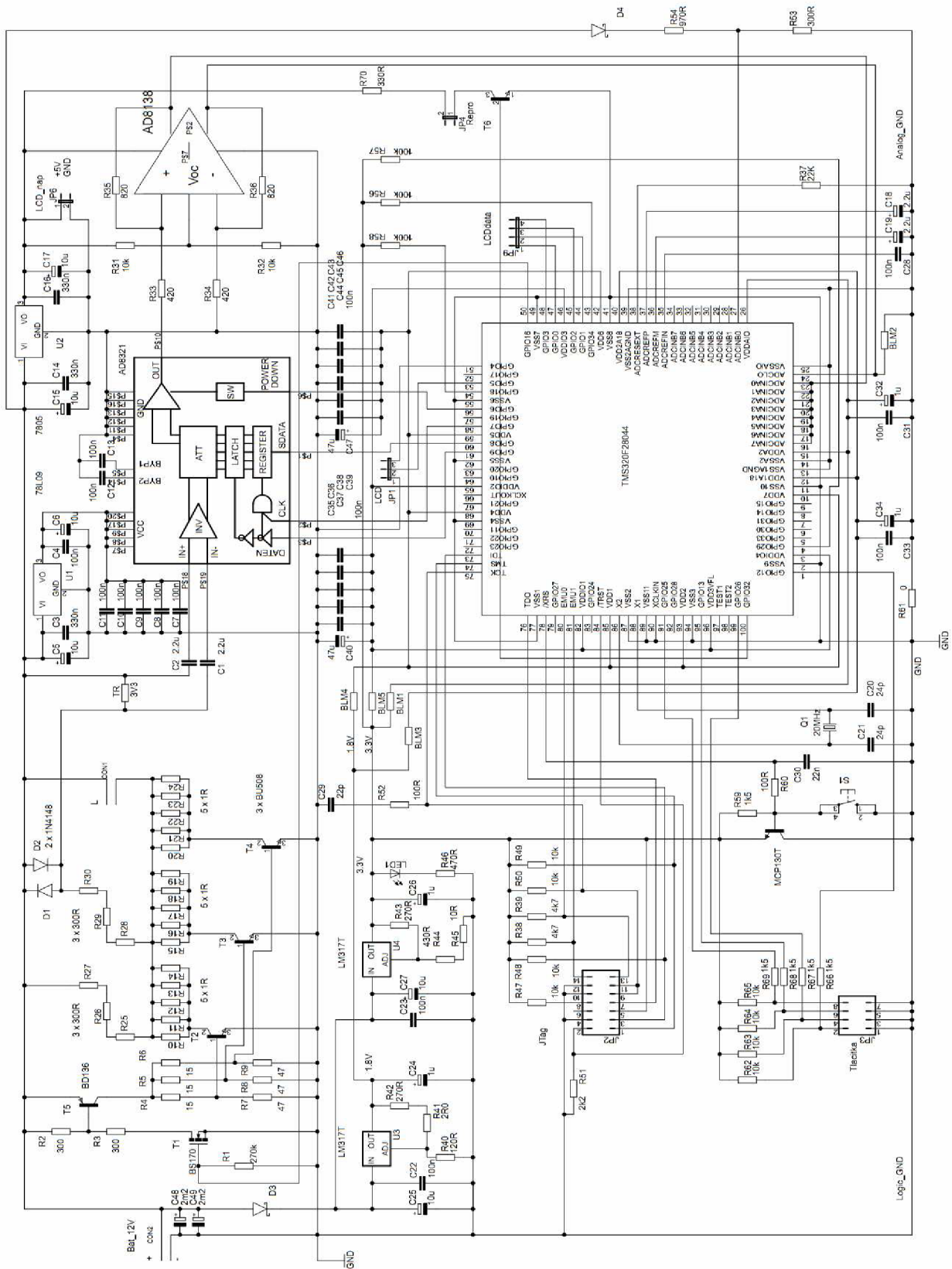
Hodnota přenosu  $A_U = -27,43$  dB



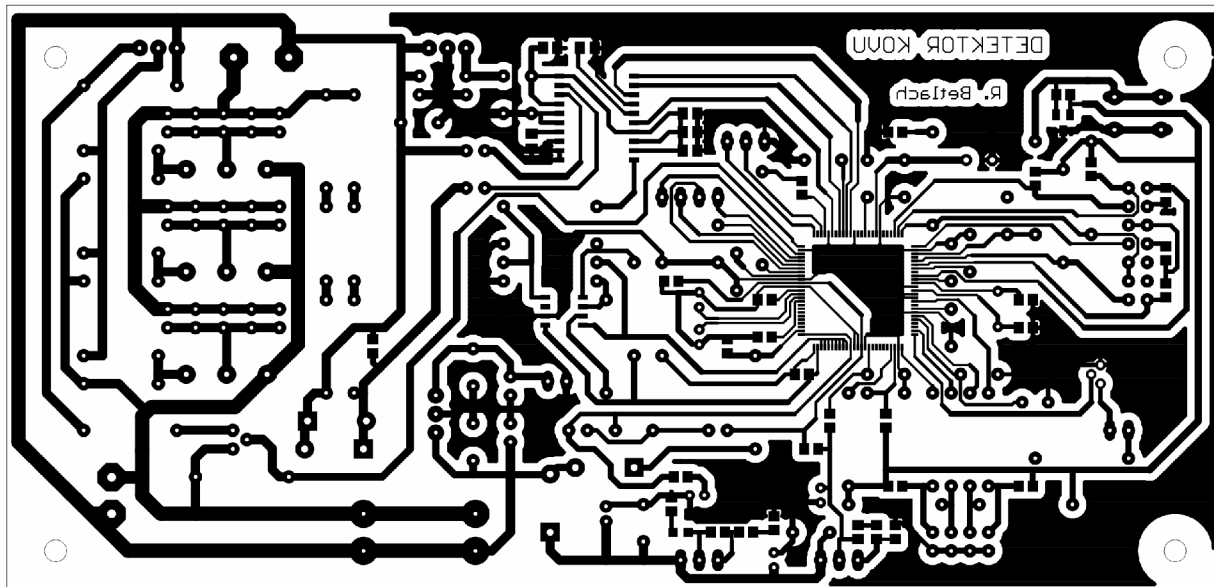
Hodnota přenosu  $A_U = 26$  dB

# B NÁVRH DPS

## B.1 Obvodové zapojení detektoru kovů

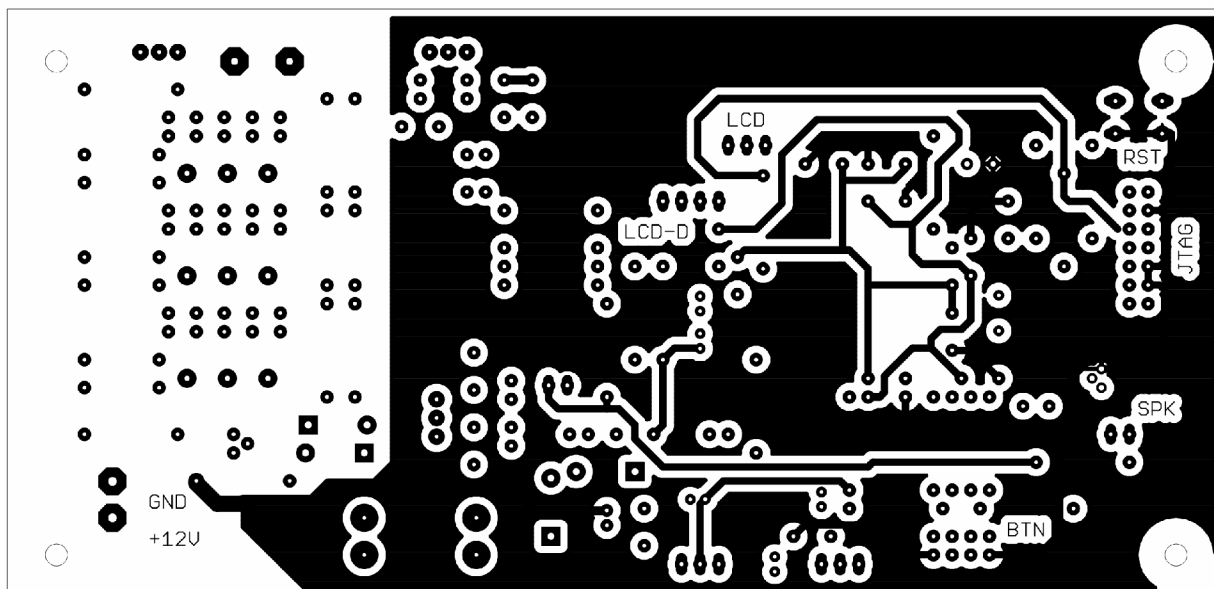


## B.2 Deska plošného spoje detektoru kovů – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 166 x 80 [mm], měřítko M1:1

## B.3 Deska plošného spoje detektoru kovů – top (strana součástek)



Rozměr desky 166 x 80 [mm], měřítko M1:1

## C SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota / typ	Pouzdro	Popis
BLM1 - BLM5	0,2A 120Ω	0805	feritový filtr SMD
C1, C2	10n	C025-050X050	keramický kondenzátor
C3	330n	C025-050X050	keramický kondenzátor
C4	100n	C025-050X050	keramický kondenzátor
C5, C6	10u	C2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C7 - C13	100n	0805	keramický kondenzátor SMD
C14, C16	330n	C050-025X075	keramický kondenzátor
C15, C17	10u	C2,5-6E	elektrolytický kondenzátor
C18, C19	2.2u	C2-5	elektrolytický kondenzátor
C20, C21	24p	0805	Keramický kondenzátor SMD
C22, C23	100n	C050-025X075	keramický kondenzátor
C24, C26	1u	C2-5	elektrolytický kondenzátor
C25, C27	10u	C2-5	elektrolytický kondenzátor
C28, C31	100n	0805	keramický kondenzátor SMD
C29	22p	0805	keramický kondenzátor SMD
C30	22n	C050-025X075	keramický kondenzátor
C32, C34	1u	C2.5-7	elektrolytický kondenzátor
C33	100n	0805	keramický kondenzátor SMD
C35 - C39	100n	C050-025X075	keramický kondenzátor
C40, C47	47u	C3.5-8	elektrolytický kondenzátor
C41 - C46	100n	C050-025X075	keramický kondenzátor
C48, C49	2m2	C5-13	elektrolytický kondenzátor
CON1		ARK710I/2	svorkovnice
CON2		ARK500/2	svorkovnice
D1, D2		1N4007	Schottkyho usměrňovací dioda
D3, D4		1N5819	usměrňovací dioda
IO1		SOIC8	diferenční zesilovač
IO2		SOIC20	řízený zesilovač
JP1		JP2E	konektorové piny
JP2		JP7Q	konektorové piny
JP3		JP4Q	konektorové piny
JP4, JP6		JP1E	konektorové piny
JP9		JP4E	konektorové piny
LED1		0805	LED dioda SMD
MCP130T	3,3V	SOT23	watchdog
Q1	20MHz	HC49U-V	piezo krystal
R1	270k	R0207/12	rezistor
R2, R3	300R	R0207/12	rezistor
R4 - R6	15R	R0207/10	rezistor
R7 - R9	47R	R0207/10	rezistor
R10 - R24	1R	R0207/2V	rezistor
R25 - R30	300R	R0207/12	rezistor
R31, R32	10k	R0207/12	rezistor

R33, R34	420R	R0207/12	rezistor
R35, R36	820R	R0207/12	rezistor
R37	22K	0805	rezistor SMD
R38	4k7	0805	rezistor SMD
R39	4k7	R0207/12	rezistor
R40	120R	0805	rezistor SMD
R41	2R0	0805	rezistor SMD
R42, R43	270R	0805	rezistor SMD
R44	430R	0805	rezistor SMD
R45	10R	0805	rezistor SMD
R46	470R	0805	rezistor SMD
R47 - R49	10k	0805	rezistor SMD
R50	10k	R0207/12	rezistor
R51	2k2	0805	rezistor SMD
R52	100R	R0207/12	rezistor
R53	300R	0805	rezistor SMD
R54	970R	R0207/12	rezistor
R56, R57	100k	R0207/12	rezistor
R58	100k	0805	rezistor SMD
R59	1k5	0805	rezistor SMD
R60	100R	R0207/12	rezistor
R61	0R0	R0207/12	rezistor
R62, R65	10k	0805	rezistor SMD
R63, R64	10k	R0207/12	rezistor
R66 - R69	1k5	R0207/12	rezistor
R70	330R	R0207/12	rezistor
S1		10-XX	tlačítko
T1	BS17	TO-92	unipolární tranzistor
T2 - T4	BU508A	SOT93	spínací tranzistor
T5	BD135	TO-220	bipolární tranzistor PNP
T6	BC337	TO-92	bipolární tranzistor PNP
TR	3V3	0805	transil
U\$1	TMS320	LQFP100	DSP
U1	7809	TO-220	stabilizátor napětí
U2	7805	TO-220	stabilizátor napětí
U3, U4	LM317T	TO-220	stabilizátor napětí