



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## DETEKTOR KOVŮ PRO PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ

METAL DETECTOR FOR INDUSTRIAL USE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Rostislav Stehno**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**  
Ústav radioelektroniky

**Student:** Bc. Rostislav Stehno

**ID:** 146101

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Detektor kovů pro průmyslové využití

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte relevantní literaturu o detektorech kovů a měření síly magnetického pole. Provedte návrh zařízení, které bude zobrazovat hustotu železa pod plochou přístroje v drátkobetónu. Přístroj bude řízen mikrokontrolérem a přes LCD display bude komunikovat s uživatelem. Naměřená data budou ukládána do paměti s možností přenosu do osobního počítače. Navrhněte obvodové řešení systému využívající vhodnou mikroprocesorovou platformu. Zařízení realizujte a jeho správnou činnost ověřte.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 320 s. ISBN 80-7300-174-8.

[2] BURKHAD, M., C pro mikrokontroléry. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 280 s. ISBN 80-7300-077-6

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 19.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

**Konzultant diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady**

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Cílem projektu bylo prozkoumat možnosti detekce kovů a navrhnout detektor kovů pro průmyslové využití. Během návrhu zařízení byly prostudovány různé metody pro detekci kovů a byla zvolena metoda impulsní detekce, která se stává nejvíce perspektivní metodou, díky zlepšování kvalit elektronických součástek. Po zkušenostech s první verzí zařízení bylo nutné celý návrh přepracovat. Hlavním cílem druhé verze zařízení je zvýšení výpočetního výkonu. Za tímto účelem je nutno zařízení vybavit mnohem výkonnějším mikrokontrolérem, což umožní mnohem lepší využití zobrazovacího displeje. Zařízení bude komunikovat s počítačem přes USB port. Vybaveno bude baterií, která umožní provoz po několik hodin. Zpracování naměřených dat bude probíhat také pomocí DFT díky čemu bude možno lépe analyzovat množství a druh kovů pod přístrojem.

## Klíčová slova

Detektor kovů, mikrokontrolér, ARM, Atmel, cívka, magnetická susceptibilita

# Abstract

The goal of this project is explore and study the ways of metal detecting and create a metal detector for industrial use. When the device were inventing, a lot of methods were studied and the impulse detect method were chosen as the most perspective way of metal detecting, thanks to a huge electronics parts possibilities. After experiences with preceding device was necessary to redesign it. Main target of this thesis is to increase the computing power of detector. For this purpose will device need a new microcontroller. Device will communicate with PC trough a USB port. The device will have a battery which allows device to run for a few hours. Processing of measured data will be make even with DFT which will lead to better analyze of mass and type of conductor under device.

# Keywords

metal detector, microcontroller, ARM, Atmel, coil, magnetic susceptibility

# **Bibliografická citace**

Bc. STEHNO, R. Detektor kovů pro průmyslové využití: semestrální práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2016. 54 s., 3 přílohy

# Prohlášení

Prohlašuji, že svoji semestrální práci na téma Detektor kovů pro průmyslové využití jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 13. května 2016

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Zoltánu Szabóvi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne 13. května 2016

.....  
podpis autora

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teoretické poznatky .....	12
2.1	Elektromagnetické pole a materiály .....	12
2.2	Šíření EM vlny .....	12
2.2.1	Rovinná vlna .....	13
2.2.2	Kulová vlna .....	14
2.3	Cívka a magnetické pole.....	15
2.4	Principy detekce kovů .....	16
2.4.1	Záznějová metoda detekce kovů .....	17
2.4.2	Balanční metoda detekce kovů.....	17
2.4.3	Impulsní metoda detekce kovů.....	18
3	Návrh přístroje .....	19
3.1	Blokové schéma.....	19
3.2	Mikrokontrolér .....	19
3.2.1	Požadavky zařízení.....	19
3.2.2	ATSAM4E16E-AU.....	20
3.2.3	Zapojení a funkce portů.....	20
3.2.4	USB port.....	21
3.2.5	Krystal a takt mikrokontroléru .....	21
3.2.6	Napájení mikrokontroléru .....	22
3.2.7	Programování Mikrokontroléru.....	23
3.3	Externí paměť flash .....	23
3.4	LCD display a dotykové ovládání .....	23
3.4.1	Zapojení LCD displeje .....	23
3.4.2	Dotykové ovládání .....	24
3.5	Detekční obvody.....	26
3.5.1	Vysílací obvod .....	26
3.5.2	Vysílací cívka.....	29
3.5.3	Přijímací obvody .....	30
3.5.4	Přijímací cívka .....	31
3.6	Reproduktor .....	32
3.7	Napájení zařízení .....	32
3.7.1	Nabíjecí obvod .....	33
3.7.2	Baterie .....	34
3.7.3	Zdroj +3,3V.....	34
3.7.4	Zdroj +5V.....	34
3.7.5	Zdroj -5V.....	35
3.7.6	Zdroj pro display .....	35
4	Konstrukce .....	36
4.1	Deska plošných spojů .....	36
4.2	Osazovací plán.....	37
4.3	Osazení a oživení desky plošných spojů.....	38
4.3.1	Zdrojová část.....	38
4.3.2	MCU a podpůrné obvody.....	39
4.3.3	Ostatní součástky.....	40
4.4	Měřicí cívka .....	40
4.5	Dotykový displej.....	41
4.6	Kompletace zařízení .....	41
5	Programování zařízení .....	43
5.1	Programovací software a hardware.....	43
5.2	Nastavení výstupů a hodinových signálů.....	43
5.3	Zobrazovací funkce displeje .....	44
5.3.1	Zapojení výstupů.....	44
5.3.2	Princip zobrazování a nastavení čítačů.....	44
5.3.3	Zobrazovací funkce.....	45



5.3.4	Sada znaků, čísel a objektů.....	45
5.4	A/D převodník a jeho nastavení .....	46
5.4.1	Funkce měření napětí baterie .....	46
5.4.2	Funkce měření dotyku displeje.....	46
5.4.3	Funkce vzorkování naměřeného signálu .....	46
5.5	Flash paměť .....	47
5.6	Menu a systém.....	47
5.7	DFT .....	47
6	Návod k obsluze a měření .....	48
6.1	Popis zařízení.....	48
6.2	Konektory a jejich účel.....	48
6.3	Zapnutí a vypnutí přístroje.....	48
6.4	Hlavní menu a uživatelské prostředí.....	49
6.5	MEMORY a USB menu.....	49
6.6	OPTIONS menu .....	50
6.7	MEASURE menu a princip měření .....	50
6.7.1	Ovládací prvky .....	50
6.7.2	Vzorkování detekčního signálu .....	50
6.7.3	Kalibrace .....	50
6.7.4	Zobrazení dat.....	51
7	Závěr .....	52
8	Seznam zkratk, symbolů a příloh .....	54
8.1	Seznam zkratk.....	54
8.2	Seznam symbolů.....	54
8.3	Seznam příloh .....	54

# Seznam obrázků

Obr. 1	Šíření rovinné vlny.....	13
Obr. 2	Šíření EM kulové vlny.....	14
Obr. 3	Cívka a indukované magnetické pole.....	15
Obr. 4	Indukovaný proud v kovovém předmětu.....	16
Obr. 5	Blokové schéma záznejového detektoru kovů. [1].....	17
Obr. 6	Blokové schéma balančního detektoru. [1].....	17
Obr. 7	Blokové schéma impulsního detektoru. [1].....	18
Obr. 8	Blokové schéma impulsního detektoru s jednou cívkou. [1].....	18
Obr. 9	Blokové schéma navrženého detektoru kovu.....	19
Obr. 10	Blokové schéma MCU ATSAM4E16E-AU. [4].....	20
Obr. 11	Zapojení portu USB v režimu zařízení s napájením +3.3V. [4].....	21
Obr. 12	Zapojení krystalu pro ATSAM4E16E-AU. [4].....	21
Obr. 13	Blokové schéma rozvedení a tvorby systémových kmitočtů ATSAM4E16E-AU. [4].....	22
Obr. 14	Zapojení napájení ATSAM4E16E-AU. [4].....	22
Obr. 15	Princip připojení paměti k MCU.....	23
Obr. 16	Zapojení LCD displeje.....	24
Obr. 17	Princip funkce dotykového displeje.....	24
Obr. 18	Schéma dotykových obvodů.....	25
Obr. 19	Příklad stlačení displeje.....	25
Obr. 20	Průběhy dotyku displeje.....	25
Obr. 21	Teoretické spínání cívky.....	26
Obr. 22	Proud cívkou a řídicí napětí.....	27
Obr. 23	Průběhy napětí na cívce a na tranzistoru.....	27
Obr. 24	Ztrátové výkony ve vysílacím obvodu cívky.....	28
Obr. 25	Spínací ztráty tranzistoru a vypínací ztráty diody.....	28
Obr. 26	Vypínací ztráty tranzistoru.....	28
Obr. 27	Průběh výkonu zenerovou diodou.....	29
Obr. 28	Tvar vysílací cívky.....	30
Obr. 29	Blokové schéma přijímacích obvodů.....	30
Obr. 30	Zapojení zesilovače detektoru.....	31
Obr. 31	Přijímací a vysílací cívka.....	31
Obr. 32	Zapojení piezo reproduktoru.....	32
Obr. 33	Blokové schéma napájecí části.....	32
Obr. 34	Schéma nabíjecího obvodu.....	33
Obr. 35	Zapojení zdroje +3,3V.....	34
Obr. 36	Zapojení zdroje +5V.....	34
Obr. 37	Zapojení zdroje -5V.....	35
Obr. 38	Zapojení zdroje pro displej.....	35
Obr. 39	Deska plošných spojů - přední strana.....	36
Obr. 40	Deska plošných spojů - zadní strana.....	37
Obr. 41	Osazovací plán - přední strana.....	37
Obr. 42	Osazovací plán - zadní strana.....	38
Obr. 43	Vyznačení součástek zdrojů - přední strana.....	38
Obr. 44	Vyznačení součástek zdrojů - zadní strana.....	39
Obr. 45	Zvýraznění napájecích cest - přední strana.....	39
Obr. 46	MCU a jeho podpůrné součástky.....	40
Obr. 47	Měřicí cívka před dotvarováním a zafixováním.....	40
Obr. 48	Displej a otvor pro něj.....	41
Obr. 49	Displej pohled zespodu.....	41
Obr. 50	Kompletní zařízení.....	41
Obr. 51	Kompletní zařízení.....	42
Obr. 52	Zapojení cívky a ostatních komponentů.....	42
Obr. 53	Debugger Atmel-ICE.....	43
Obr. 54	Zobrazovací průběhy displeje.....	44
Obr. 55	Úvodní obrazovka.....	48
Obr. 56	Hlavní menu - světlé.....	49
Obr. 57	Hlavní menu - tmavé.....	49

Obr. 58	OPTIONS menu .....	50
Obr. 59	Měření signálu - po zapnutí .....	51
Obr. 60	Měření signálu - po kalibraci .....	51
Obr. 61	Měření signálu - přítomnost oceli .....	51

# 1 Úvod

Cílem této práce je vyvinout druhou, lepší verzi detektoru, která nebude obsahovat nedostatky předchozího provedení. První verze přístroje, která byla navržena a sestrojena jako bakalářská práce, obsahovala několik nedostatků elektronického a topologického charakteru a cílem této práce je tyto nedostatky eliminovat. V návrhu bude použit výkonnější MCU s jádrem Cortex-M4, jehož použití umožní lepší využití displeje i možnosti zpracování naměřených vzorků. Součástí práce též bude popis výroby zařízení a postup tvorby programů pro obsluhu jednotlivých periférií.

## 2 Teoretické poznatky

V této kapitole uvedeny jsou potřebné teoretické poznatky o principech elektromagnetického pole a detekce kovů. Nejsou zde uvedeny teoretické znalosti o elektronice, protože jejich znalost je považována za samozřejmost a nutný předpoklad pro plné pochopení projektu.

### 2.1 Elektromagnetické pole a materiály

Elektromagnetické pole se skládá ze dvou složek a to z elektrického pole a magnetického pole. Toto pole je definováno intenzitou elektrického pole  $E$  [ $Vm^{-1}$ ] a intenzitou magnetického pole  $H$  [ $Am^{-1}$ ]. Poměr těchto veličin je daný vlastnostmi prostředí:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = Z_0; \left[ \frac{Vm^{-1}}{Am^{-1}}; \Omega \right] \quad (1)$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí,  $\varepsilon$  je permitivita prostředí a  $Z_0$  je charakteristická impedance prostředí. Permeabilita a permitivita prostředí je definována:

$$\mu = \mu_r \mu_0; [Hm^{-1}] \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0; [Fm^{-1}] \quad (3)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}$  a  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} Fm^{-1}$ .

$\varepsilon_r$  je relativní permitivita prostředí a  $\mu_r$  je relativní permeabilita prostředí. Ještě se definuje jednotka magnetické susceptibility  $x_m$ :

$$x_m = \mu_r - 1 \quad (4)$$

Z veličin, které pole ovlivňují, vyjmenujme tyto:  $\varepsilon$ ,  $\mu$  a vodivost prostředí  $\gamma$  [ $Sm^{-1}$ ].

### 2.2 Šíření EM vlny

Elektromagnetická vlna se šíří prostředím rychlostí  $v$ :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}; [ms^{-1}] \quad (5)$$

kde  $c$  je rychlost EM vlny ve vakuu,  $\mu_r$  je relativní permeabilita a  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita. Například pro vzduch je rychlost EM vlny podobná rychlosti ve vakuu.

Je-li prostředí vodivé, nabývá  $\varepsilon$  komplexních hodnot a je definováno vztahem:

$$\varepsilon' = \varepsilon - j \frac{\gamma}{\omega} \quad (6)$$

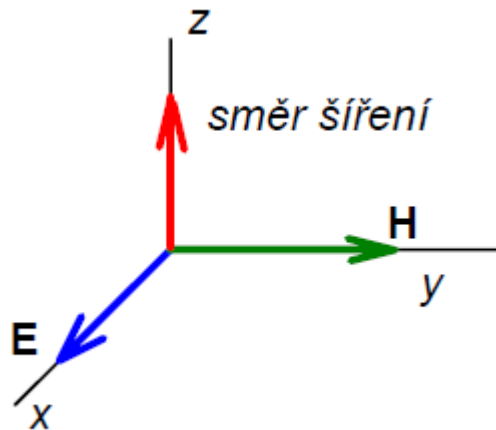
kde  $\varepsilon'$  je komplexní permitivita,  $\gamma$  je vodivost prostředí a  $\omega$  je úhlová frekvence EM vlny.

Vhodné je použití tzv. vlnového čísla  $k$ :

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon' \mu}; [\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (7)$$

### 2.2.1 Rovinná vlna

Uvažujeme-li rovinnou vlnu o elektrické intenzitě  $E$  a intenzitě magnetického pole  $H$  pohybující se ve směru osy  $Z$  v prostředí o nenulové vodivosti  $\gamma$ , permitivitě  $\varepsilon$  a permeabilitě  $\mu$ .



Obr. 1 Šíření rovinné vlny.

Pro elektrickou intenzitu lze vyjádřit fázor  $E$  rovnicí:

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-jkz} \quad (8)$$

kde  $k$  je vlnové číslo, které je komplexní a lze ho rozdělit na:

$$k = k' - jk'' \quad (9)$$

kde  $k'$  je měrná fáze [ $\text{rad}/\text{m}$ ] a  $k''$  je měrný útlum [ $\text{m}^{-1}$ ]. Měrná fáze udává o kolik radiánů se změní fáze elektrické intenzity na vzdálenost 1 metr ve směru osy  $z$  a měrný útlum způsobuje zmenšování amplitudy. Jeli prostředí nevodivé a tedy  $\gamma = 0$ , je velikost elektrické intenzity rovinné vlny neměnná. Dosazením rovnice 9 do rovnice 8 dostaneme výraz:

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-k''z} \cdot e^{-jk'z} \quad (10)$$

Ekvivalentní rovnice pro  $H(z)$  můžeme získat např. z rovnice 8 takto:

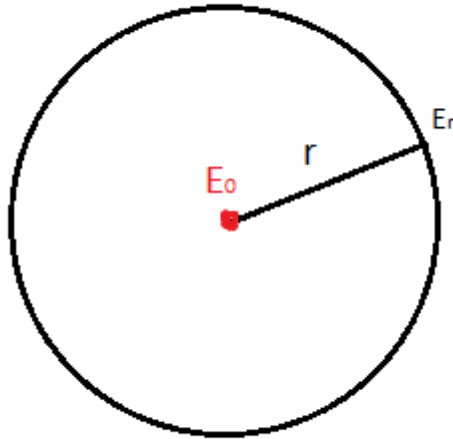
$$H(z) = \frac{E_0}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}} \cdot e^{-jkz} \quad (11)$$

kde  $\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}$  je komplexní vlnová impedance prostředí.

Bude-li prostředí nevodivé, bude vlnové číslo čistě reálné, k útlumu nedochází a vlnová impedance prostředí je reálné číslo.

## 2.2.2 Kulová vlna

V praxi se nejčastěji setkáváme s kulovou EM vlnou, tedy s bodovým zdrojem  $E_0$ . Uvažujme kulovou EM vlnu pohybující se od zdroje rovnoměrně všemi směry v reálném prostředí s nenulovou vodivostí  $\gamma$ .



Obr. 2 Šíření EM kulové vlny.

Pro výpočet zavedeme výkon signálu  $P$ :

$$P = E \cdot H = \frac{E^2}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}} \quad (12)$$

Tento výkon  $P$  [W] je celkový výkon vyzářený vysílačem a vzdalujeme-li se od kulového zdroje EM vlny, dochází k ředění výkonu, protože se tento celkový výkon rozkládá na celou plochu pomyslné koule s poloměrem  $r$ , kde  $r$  je vzdálenost od zdroje EM vlny. Výkon na ploše  $1 \text{ m}^2$  na kuloploše o velikosti  $r$  lze vyjádřit takto:

$$P(r) = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}; [W \cdot m^{-2}] \quad (13)$$

kde  $r$  je vzdálenost plochy o velikosti  $1 \text{ m}^2$  od bodového zdroje EM vlny. Upravením rovnice 12 si vytkneme vektor  $E$  a dosadíme jej do rovnice 13:

$$E(r) = \sqrt{P(r) \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}} \cdot e^{-jkr} = \sqrt{\frac{P}{4\pi \cdot r^2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}} \cdot e^{-jkr} = \frac{\sqrt{\frac{P}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}}}{r} \cdot e^{-jkr} \quad (14)$$

Je vidět že čítecitel ve zlomku rovnice 14 je konstanta a tudíž velikost elektrické intenzity  $E$  klesá se zvětšující se vzdáleností přibližně lineárně v nevodivém prostředí. Ve vodivém prostředí klesá ještě více s rostoucí vzdáleností.

## 2.3 Cívka a magnetické pole

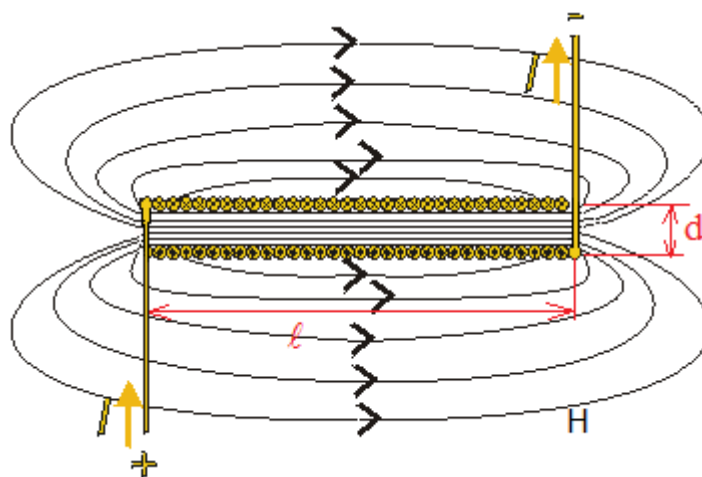
Uvažujme ideální cívku reálných rozměrů o počtu závitů  $N$  o délce  $\ell$  a průměru  $d$  protékanou proudem  $I$ . Prochází-li cívkou proud indukuje cívka ve svém okolí magnetické pole, které má uvnitř solenoidu intenzitu  $H$ . Pokud by byla cívka nekonečně dlouhá bylo by pole pouze uvnitř cívky, ale jelikož má cívka reálnou délku a podle maxwellovy rovnice:

$$\int_s B dS = 0 \quad (15)$$

kde  $B$  je:

$$B = \mu \cdot H \quad (16)$$

vyplývá, že magnetické siločáry musejí být uzavřené a tudíž se vně cívky s opačnou intenzitou než-li uvnitř uzavírají tak jak je znázorněno na obrázku 3.



Obr. 3 Cívka a indukované magnetické pole.

Velikost magnetické intenzity  $H$  uvnitř cívky lze vypočíst ze vztahu 17.

$$H = \frac{NI}{\ell}; \left[ Am^{-1}; \frac{A}{m} \right] \quad (17)$$

Velikost magnetické intenzity je tedy přímo úměrná velikosti proudu  $I$ . Indukčnost jednoho závitu cívky  $L_1$  lze vyjádřit vzorcem:

$$L_1 = \frac{\phi}{I}; \left[ H; \frac{Wb}{A} \right] \quad (18)$$

kde  $\phi$  je magnetický tok jedním závitem cívky:

$$\phi = B \cdot S = B \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (19)$$

kde  $S$  je plocha cívky a  $d$  je průměr.



Uvažujeme-li cívku o  $N$  závitů, lze indukčnost vyjádřit dosazením 19. do 18. vzorce:

$$L = N \cdot L_1 = \frac{N \cdot B \cdot \pi \cdot d^2}{4I} \quad (20)$$

dosadíme-li do vzorce 16 vzorec 17 a následně vzorec 16 do vzorce 20:

$$L = \frac{N \cdot \mu \cdot H \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot I} = \frac{N \cdot \mu \cdot N \cdot I \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot I \cdot \ell} = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \ell} \quad (21)$$

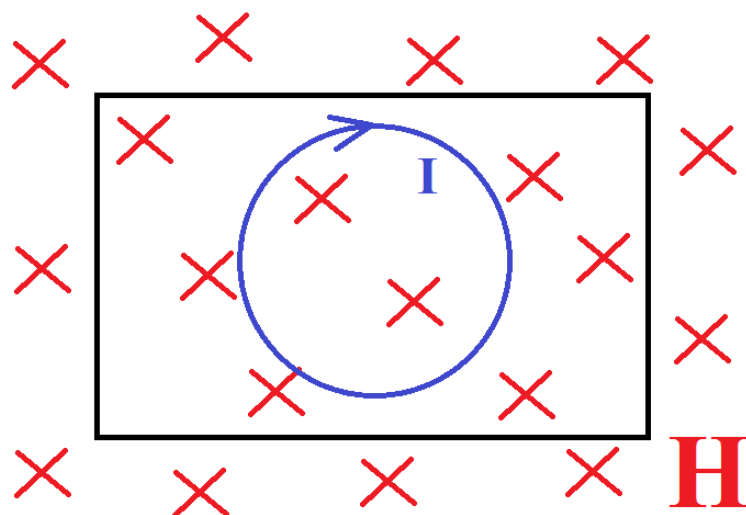
Totéž platí i obráceně. Bude-li plochou cívky  $S$  protékat proměnný indukční tok  $\phi$ , bude se na svorkách cívky indukovat napětí.

$$u_i = -N \frac{d\phi}{dt}; [V] \quad (22)$$

Vzorec 22 je vyjádření zákona elektromagnetické indukce. Je-li magnetické pole proměnné v čase a protéká-li cívku, indukuje se na svorkách cívky napětí. Je-li pole neměnné, napětí se neindukuje. Tohoto jevu se využívá v mnoha odvětví techniky a vědy.

## 2.4 Principy detekce kovů

Kovy a jiné materiály, které mají vysokou hodnotu  $\mu$  nebo  $\gamma$  ovlivňují vnější magnetické pole a tudíž lze jejich přítomnost detekovat i změnou parametrů zdroje. Je-li takový předmět umístěn do měnícího se magnetického pole o intenzitě  $H$  (znázorněno červeně) a má-li plochu  $S$  bude se v něm indukovat proud  $I$  viz obr. 4.



Obr. 4 Indukovaný proud v kovovém předmětu.

Velikost napětí lze vyjádřit ze vzorce 22:

$$u_i = -N \frac{\mu \cdot dH \cdot S}{dt} \quad (23)$$

kde  $S$  je plocha materiálu a  $\mu$  je permeabilita materiálu.

Velikost indukovaného proudu lze vyjádřit pomocí vodivosti  $\gamma$ .

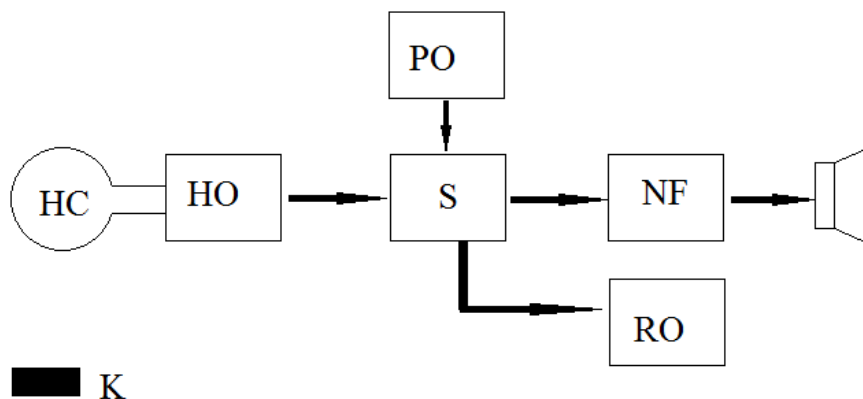
$$I = u_i \cdot \gamma = -N \frac{\mu \cdot \gamma \cdot dH \cdot S}{dt}; [A] \quad (24)$$

Tento naindukovaný proud jehož velikost je úměrná  $\mu$  a  $\gamma$  způsobí vznik magnetického pole s opačnou orientací, nežli pole které tento proud vytvořilo.

Metody detektorů kovu byli nastudovány a převzaty z knih Elektronické hledače[1] a Detektory kovu[2].

#### 2.4.1 Záznějová metoda detekce kovů

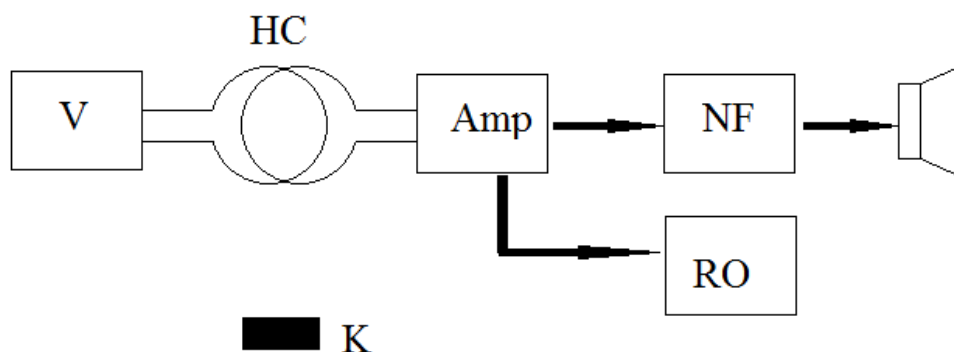
Hledače na principu zázněje pracují na principu změny vlastností cívky po vložení kovového předmětu do jejího magnetického pole. Princip je znázorněn na obr. 5. Hledací cívka HC tvoří oscilátor, který generuje různé kmitočty v závislosti na přítomných kovových předmětech K. Tento signál je přiveden do směšovače S, na jehož druhý vstup je přiveden referenční signál z oscilátoru PO, který je shodný se signálem oscilátoru HO, pokud není přítomen žádný kovový předmět v magnetickém poli cívky HC. Rozdíl těchto kmitočtů (zázněj) je přiveden do obvodů pro zpracování RO nebo zesílen NF na reproduktor jako zvuková indikace.



Obr. 5 Blokové schéma záznějového detektoru kovů. [1]

#### 2.4.2 Balanční metoda detekce kovů

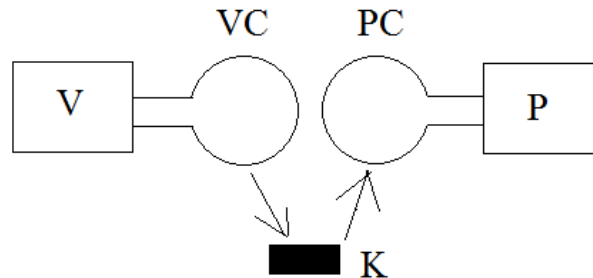
Tyto detektory pracují na principu dvou cívek, vysílací a přijímací. Princip detektoru je znázorněn na obrázku 6. Vzájemná vazba mezi cívkami je nulová pokud není v jejich poli umístěn kovový předmět. Z vysílacího generátoru V budíme vysílací cívku, jejíž pole, je-li v něm přítomný kovový předmět, způsobí naindukování napětí v přijímací cívce. To je dále zesíleno a zpracováno obvodem RO nebo zvukově signalizováno.



Obr. 6 Blokové schéma balančního detektoru. [1]

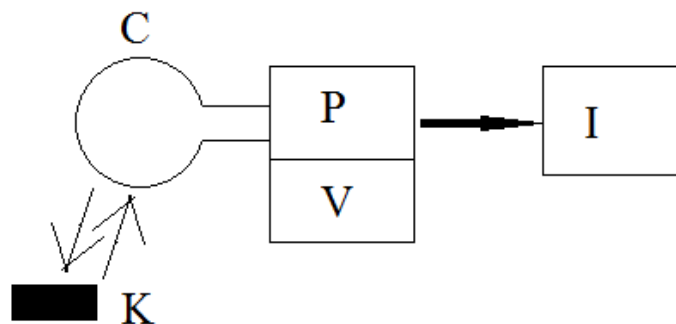
### 2.4.3 Impulsní metoda detekce kovů

Předchozí dva způsoby pracují se spojitými signály ve frekvenční oblasti. Impulsní způsob detekce pracuje v oblasti časové. Princip je zobrazen na obrázku 7. Hledací cívka VC vyše impuls magnetického pole, který způsobí v předmětu K naindukování vířivých proudů. Tyto proudy vytvoří vlastní magnetický impuls, který na přijímací cívce PC naindukuje napětí. Toto napětí se dále zpracovává obvodem P.



Obr. 7 Blokové schéma impulsního detektoru. [1]

Výhodou tohoto detektoru je, že pracuje pouze s jednou cívkou. Nejprve vyše obvod V impuls cívkou C a poté je cívka přepnuta do přijímacího režimu a dochází k vyhodnocení odezvy obvodem P a indikací I. Toto provedení přináší značnou obvodovou složitost zato konstrukční jednoduchost. Blokové schéma detektoru tohoto typu je zobrazeno na obrázku 8.



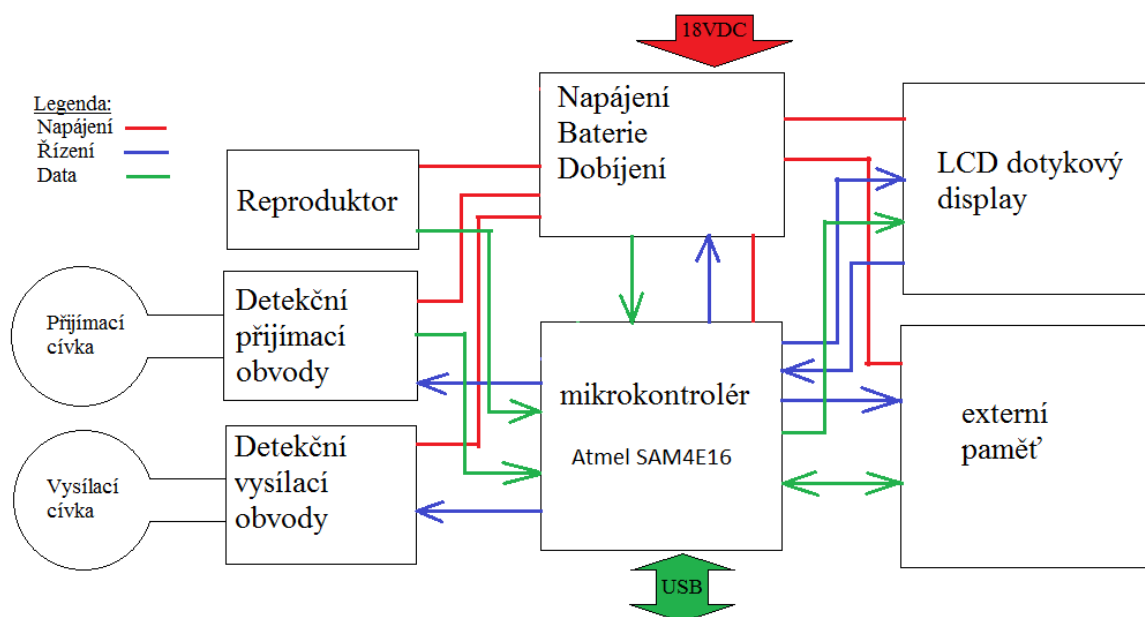
Obr. 8 Blokové schéma impulsního detektoru s jednou cívkou. [1]

# 3 Návrh přístroje

Tato kapitola obsahuje podrobný popis navrženého zařízení. Jsou zde také uvedeny důvody pro volbu konkrétních součástí a jejich hodnot.

## 3.1 Blokové schéma

Pro dosažení potřebných vlastností a funkcí bylo navrženo blokové schéma.



Obr. 9 Blokové schéma navrženého detektoru kovu.

V dalších odstavcích si popíšeme jednotlivé bloky tohoto návrhu.

## 3.2 Mikrokontrolér

Volba MCU je ovlivněna téměř všemi částmi zařízení. V následujících pododstavcích bude popsána volba MCU a zapojení jeho podpůrných obvodů.

### 3.2.1 Požadavky zařízení

K zařízení je připojena flash paměť o velikosti 16MB. Pro správnou funkci paměti je zapotřebí 34 pinů, detailnější popis zapojení paměti je uveden v kapitole 3.3.

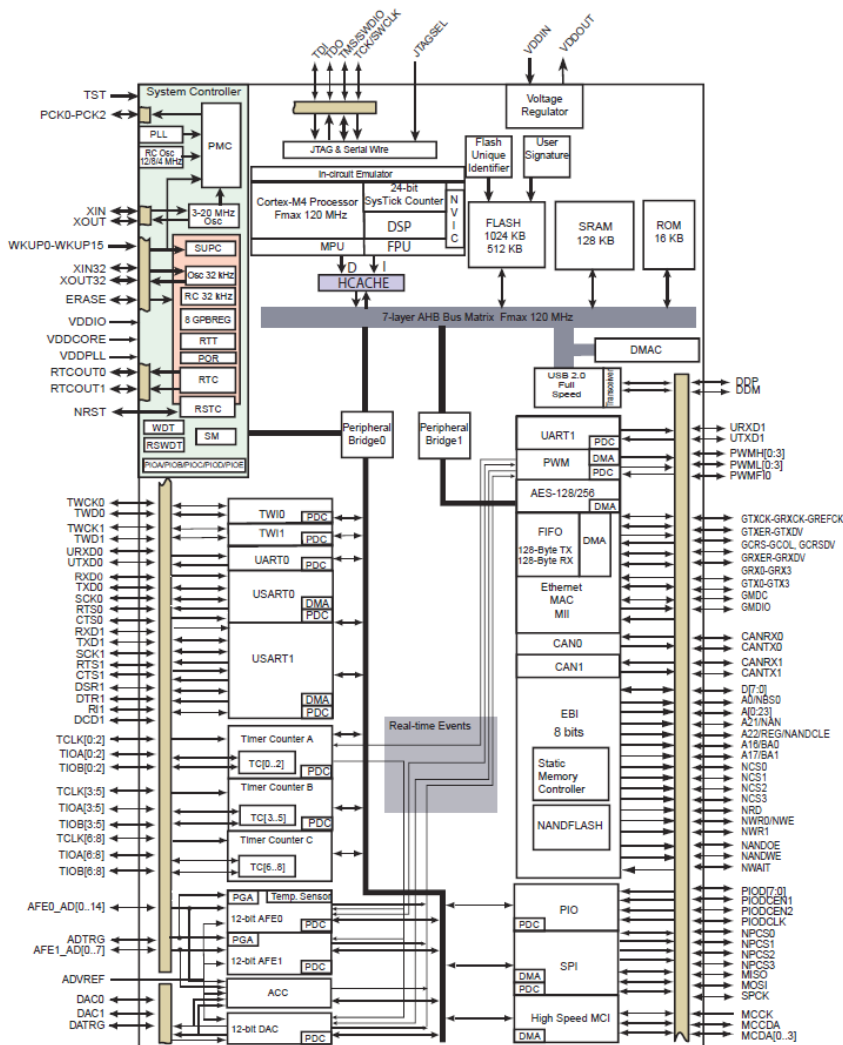
Pro zobrazování dat na display je zapotřebí 28 pinů a pro ovládání dotykové plochy 3 piny a z toho 2 piny musí být A/D převodník. Více informací o způsobu ovládání displeje a dotykového ovládání je popsána v kapitole 3.4.

Detekční obvody potřebují ke svojí funkci 8 pinů. 1 pin musí být ADC převodník, který slouží ke zpracování dat. Detailnější popis těchto obvodů nalezneme v kapitole 3.5.

MCU musí obsahovat USB port.

### 3.2.2 ATSAM4E16E-AU

S ohledem na tyto požadavky a potřeby velkého množství pinů byl vybrán jako vhodný mikrokontrolér obvod Atmel ATSAM4E16AU. Jedná se o 32 bitový ARM mikrokontrolér s jádrem Cortex-M4. Tento MCU má 144 pinů. Jeho blokové schéma je znázorněno na obrázku 10.



Obr. 10 Blokové schéma MCU ATSAM4E16E-AU. [4]

MCU má 5 32-bitových portů. Zapojení portů je popsáno v kapitole 3.2.3. Mikrokontrolér je vyráběn v pouzdře LQFP144.

#### 3.2.3 Zapojení a funkce portů

Část portu A je použita v klasické I/O funkci sloužící jako řídicí piny zesílení zesilovače v detekčních obvodech. Zbytek portu je nevyužit

Port B bude použit pro připojení externího krystalu, portu JTAG a USB konektoru. Dva piny z portu B jsou také využity jako vstup A/D převodníků pro vzorkování dat z detekčních obvodů a pro snímání napětí baterie.

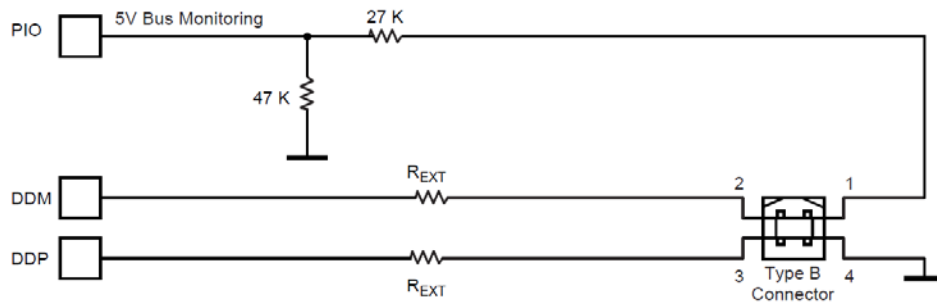
Spodních 24 pinů portu C je použita jako datový výstup pro displej. 26 a 27 pin portu C pracuje v alternativní funkci jako A/D převodník pro snímání dotykové plochy displeje. Zbytek portu je použit pro řídicí signály pro zobrazování LCD displeje.

Port D je použit pro adresování a přenos dat do a z flash paměti.

Port E je použit pro řízení flash paměti.

### 3.2.4 USB port

Potřebné nastavení a zapojení USB portu lze vyčíst z datasheetu mikrokontroléru. Zařízení pracuje v režimu device neboli slave zařízení. Jelikož je napájecí napětí mikrokontroléru +3,3V a napětí USB v PC je +5V není zařízení dobíjeno z USB. Kompatibility různých napětí dosáhneme zapojením podle obrázku 11. Vhodným naprogramováním lze zvolit mezi režimem USB 1.1 nebo USB 2.0. USB bude sloužit k přenosu dat do PC, kde budou vhodným softwarem dále zpracována.

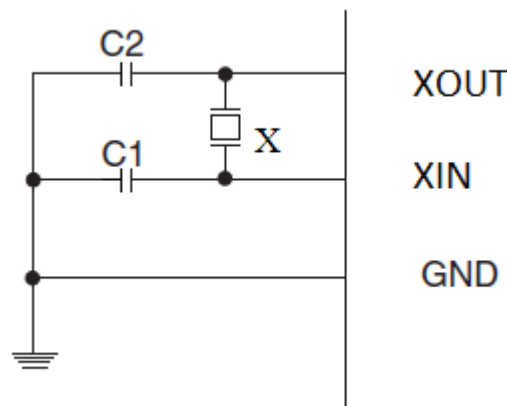


Obr. 11 Zapojení portu USB v režimu zařízení s napájením +3.3V. [4]

Odpory R<sub>EXT</sub> mají hodnotu 22Ω. Další detailní nastavení se provádějí softwarově. Mikrokontrolér obsahuje PLL( Fázový závěs) násobící zvolený vstupní kmitočet pro dosažení 48MHz a kompatibilitu s USB 2.0. Vstupní kmitočet bude odvozen od kmitočtu krystalu.

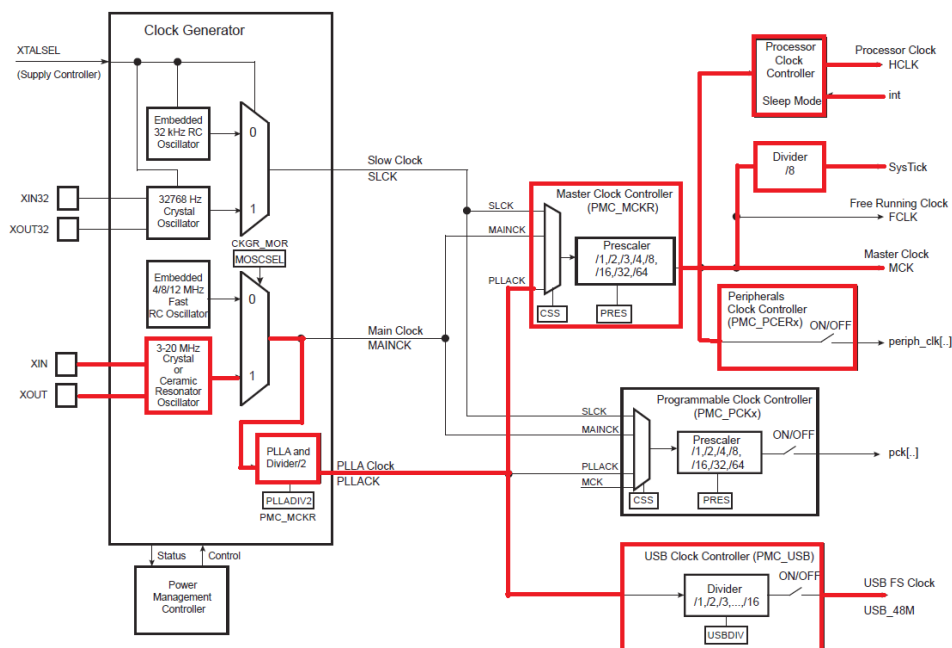
### 3.2.5 Krystal a takt mikrokontroléru

Jako zdroj systémových kmitočtů a kmitočtů mikrokontroléru lze využít interní RC oscilátor ale chceme-li využívat USB je zapotřebí přesného zdrojového kmitočtu. Toho dosáhneme použitím externího krystalu 8 MHz. Zapojení krystalu (X) je zobrazeno na obrázku 12.



Obr. 12 Zapojení krystalu pro ATSAM4E16E-AU. [4]

Z kmitočtu krystalu bude pomocí PLL vytvořen kmitočet 240MHz ze kterého budou odvozeny kmitočty pro jádro Cortex-M4 a taktéž pro USB. Blokové schéma distribuce hodinových signálů je zobrazeno na obrázku 13.

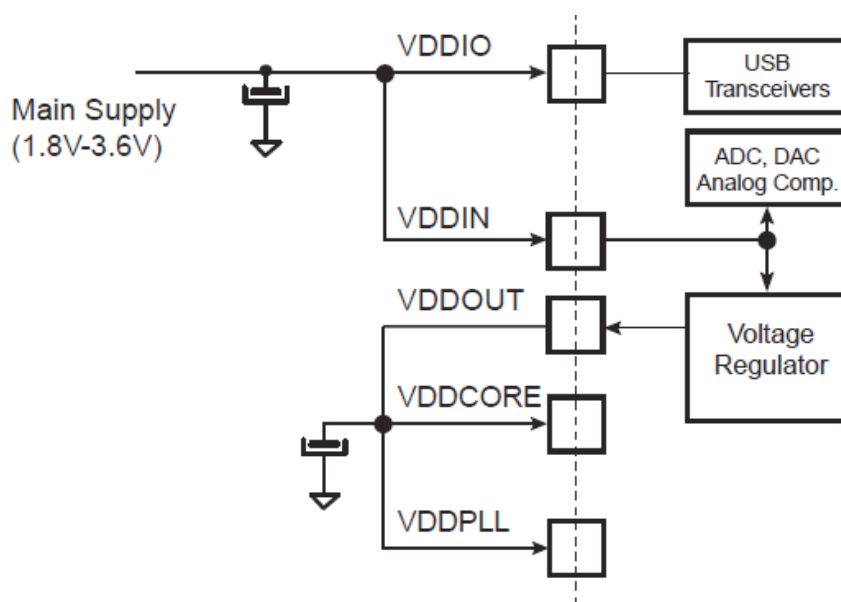


Obr. 13 Blokové schéma rozvedení a tvorby systémových kmitočtů ATSAM4E16E-AU. [4]

Hodinové vstupy většiny periférií jsou opatřeny frekvenčními děliči, které vytvoří potřebné hodinové signály. Pro jádro to je 120 MHz a pro USB je to 48 MHz.

### 3.2.6 Napájení mikrokontroléru

Napájení MCU je znázorněno na obrázku 14.



Obr. 14 Zapojení napájení ATSAM4E16E-AU. [4]

Mikrokontrolér je napájen +3,3V. Napájení VDDIO je používáno pro napájení vstupních a výstupních periférií a také USB modulu. Napětí VDDIN slouží jako napěťová reference pro A/D převodník. Pro samotné jádro Cortex-M4 a PLL modul je zapotřebí napětí 1,2V. V pouzdře MCU je pro tyto účely integrován napěťový regulátor, který potřebné napětí vytvoří z napětí VDDIN. Obě napětí jsou filtrovány kondenzátory o velikosti 1uF.

### 3.2.7 Programování Mikrokontroléru

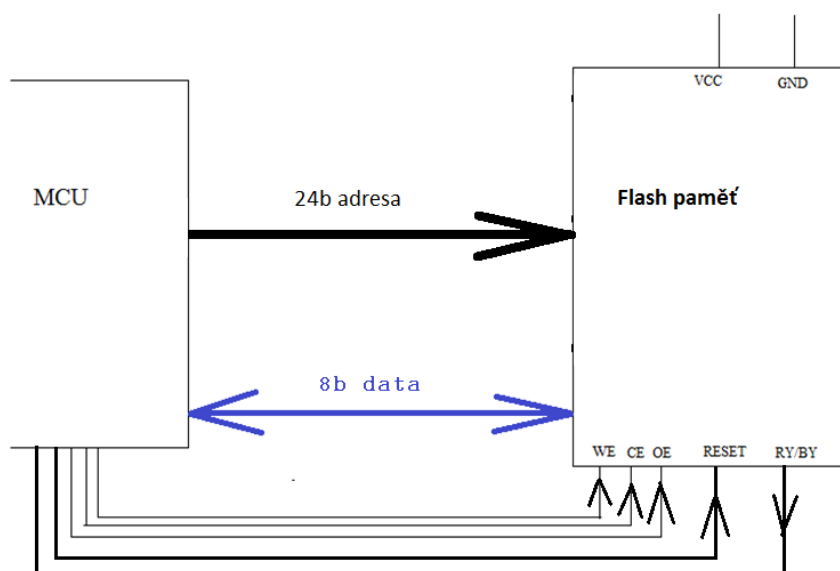
K programování mikrokontroléru je použito Atmel-ICE. Pro tyto účely byla sběrnice JTAG vyvedena na konektor. Návod na zapojení JTAG je uveden v datasheetu mikrokontroléru[4].

### 3.3 Externí paměť flash

Pro potřebu záznamu dat byla zvolena 8-bitová paměť. Pro přenos dat slouží 8-bitů. Jelikož vybraný MCU má dostatek pinů, je použita paralelní paměť. Pro adresaci slouží 24 bitů a také určují velikost paměti:

$$\text{Velikost} = 2^{24} B = 16777216B = 16MB \quad (25)$$

Podle těchto požadavků byla vybrána paměť od firmy Spansion S29GL128P. Tato paměť umí pracovat buď v 16 nebo v 8 bitovém režimu. Jelikož používáme 32 bitový mikrokontrolér a adresování se provádí 24 bity, využíváme paměť pouze v 8 bitovém režimu. Zapojení paměti je znázorněno na obrázku 15.



Obr. 15 Princip připojení paměti k MCU.

Piny WE a OE jsou přivedeny na port E a slouží k řízení čtení a zápisu. Paměť je adresována portem D, konkrétně piny 0 - 23. Datové piny jsou na zbývajících pinech portu D, 24 - 31. Paměť je asynchronní a její rychlost reakce se pohybuje v řádech desítek nS. Pin CE slouží k uvedení paměti do režimu Stand-by. Reset paměti je možno provést pomocí software. Pin RY/BY je výstup otevřeného kolektoru, který slouží k indikaci činnosti paměti. Paměť je napájena ze zdroje +3.3V.

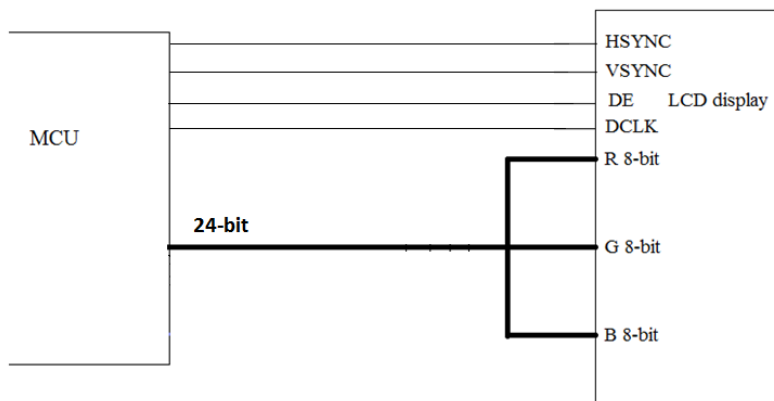
### 3.4 LCD display a dotykové ovládání

Jako zobrazovací jednotka byl zvolen grafický dotykový display od firmy Kentec Electronics K430WQA-V4-F. Display má rozlišení 480x272 pixelů. Úhlopříčka displeje je 4,3 palce. Display je RGB a má 16,7 milionů barev.

#### 3.4.1 Zapojení LCD displeje

Princip zapojení je znázorněn na obrázku 16.



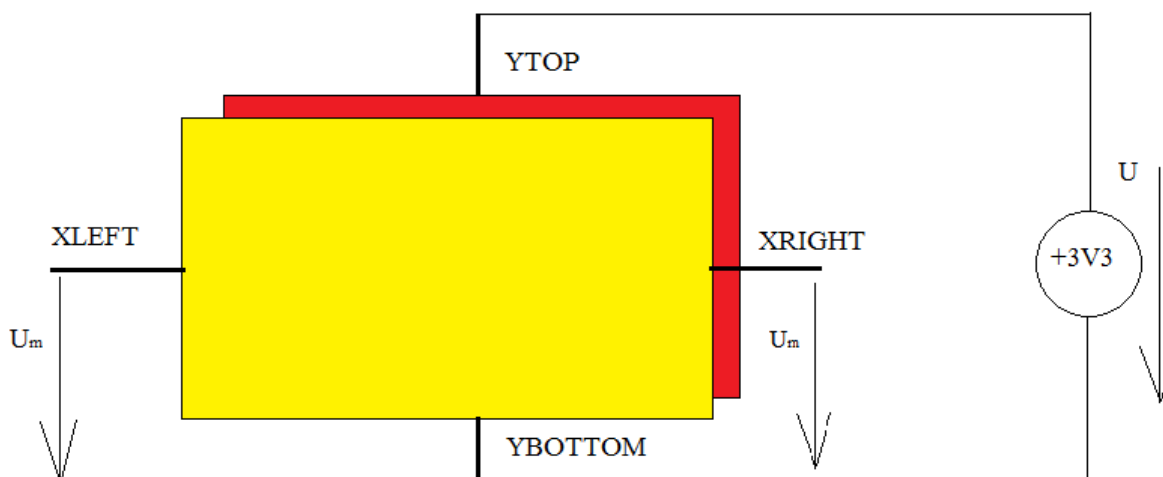


Obr. 16 Zapojení LCD displeje.

Display pracuje na principu průběžného zobrazování. To znamená že data jsou zobrazována přímo ze vstupu na patřičný pixel. Displej pracuje na podobném principu jako analogová televize. Jas pixelu je prezentován za každou barvu jedním bajtem. Jednotlivé pixely se zobrazují postupně po řádcích, rychlost obnovy pixelů je dána kmitočtem DCLK. Pin DE umožní zobrazování dat ze vstupu RGB. Po zapsání posledního pixelu řádku vypneme DE a přejdeme na další řádek. Přejedem na další řádek se provádí impulsem HSYNC. Po zobrazení posledního řádku přejdeme na zobrazování nové obrazovky impulsem VSYNC.

### 3.4.2 Dotykové ovládání

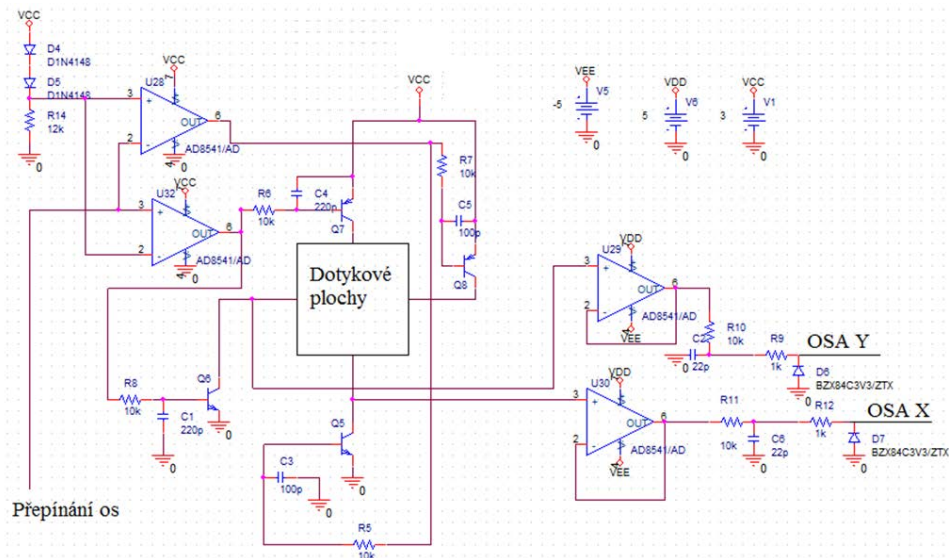
Princip dotykového ovládání je zobrazen na obrázku 17. Pracuje na principu 2 odporových ploch, které jsou od sebe vzdáleny řádově několik mikrometrů. Stlačením ploch dojde k vodivému spojení a pokud jednu plochu napájíme napětím  $U$ , můžeme na svorkách druhé plochy naměřit napětí  $U_m$ , které je úměrné vzdálenosti dotyku od kraje displeje. Poměr mezi tímto napětím a  $+3,3V$  udává poměr vzdáleností od jedné strany k celkové velikosti strany displeje. Tuto závislost vyjadřuje vzorec 26.



Obr. 17 Princip funkce dotykového displeje.

$$\frac{U_m}{U} = \frac{x_m}{x} \quad (26)$$

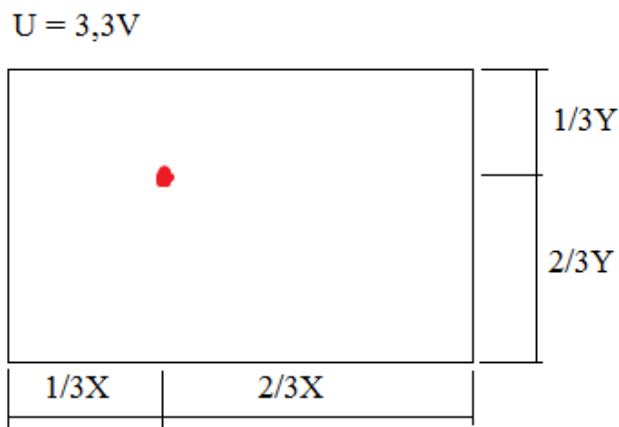
Pro zpracování dat byl navržen a odsimulován obvod na obrázku 18.



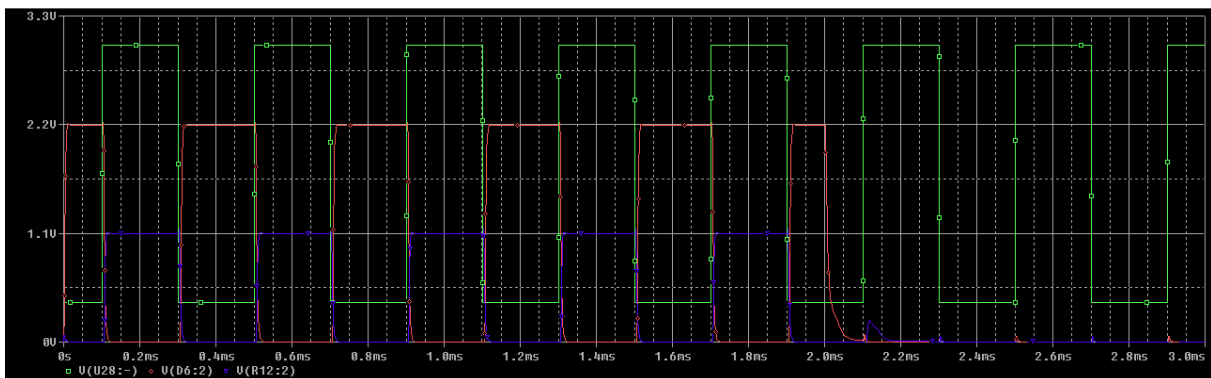
Obr. 18 Schéma dotykových obvodů.

Princip obvodu spočívá v tom, že vždy jedna osa je připojena na napájecí napětí  $U$  a na druhé ose je měřeno  $U_m$ . Přepínání os se provádí pinem Přepínání os. Aby A/D převodníky MCU nezatěžovaly dotykové plochy, je napětí na nich snímáno napěťovým sledovačem. Výsledné hodnoty jsou zpracovány mikrokontrolérem. Správná funkce obvodu byla ověřena simulací v programu PSPice.

Průběhy pro situaci, kdy je display stlačen v oblasti viz. obrázek 19, jsou zobrazeny na obrázku 20.



Obr. 19 Příklad stlačení displeje.



Obr. 20 Průběhy dotyku displeje.

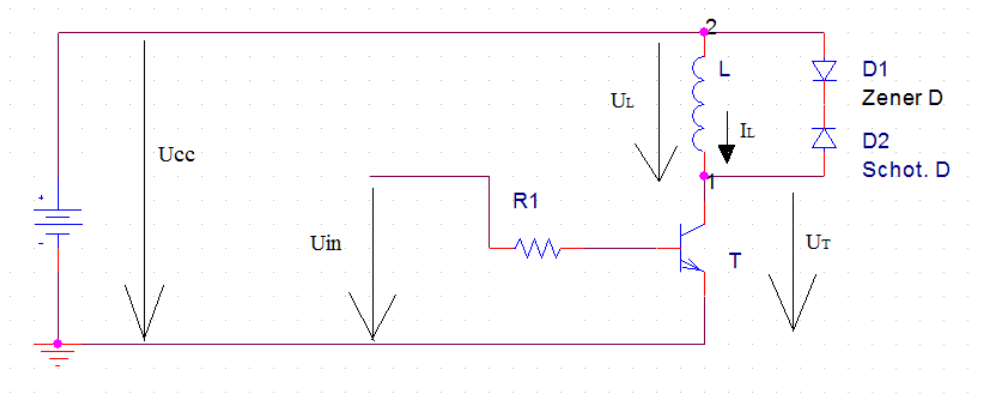
Zelený průběh představuje řídicí napětí přepínání vstupů, Modrý průběh je pro osu X a žlutý průběh v logické 1 je snímána osa X. Hodnoty odpovídají zakreslené pozici (Obr. 19 a rovnice 26). Přepnutím zeleného signálu do logické 0, dojde k prohození os a červený průběh indikuje pozici v ose Y. Modrý průběh je mezitím stažen k zemi. Doba ustálení po přepnutí os je  $20\mu\text{s}$ .

### 3.5 Detekční obvody

Tato část je věnována částem zařízení, které slouží pro detekci kovů. Tato kategorie vyžaduje pokročilé znalosti analogové elektroniky.

#### 3.5.1 Vysílací obvod

Vysílací obvod musí být schopný budit ve vysílací cívce proudové impulsy. Princip funkce si vysvětlíme na obrázku 21.



Obr. 21 Teoretické spínání cívky.

Napětí na cívce můžeme vyjádřit vztahem:

$$U_L = -L \frac{dI_L}{dt} \quad (27)$$

V našem případě, sepneme tranzistor  $T$  a tím se napětí na cívce  $U_L$  bude rovnat  $U_{CC}$  a bude konstantní. Úpravou rovnice a zanedbáním směru proudu pro zjednodušení výpočtu, získáme rovnici, kterou integrujeme podle  $t$ :

$$\int \frac{U_L}{L} dt = \int \frac{dI_L}{dt} dt \quad (28)$$

Obsah integrálu na levé straně rovnice je konstanta, která určuje rychlost růstu proudu cívkou v čase, pravá strana se po integrování vyruší s diferencí a zůstane proud cívkou. Dostáváme tedy rovnici:

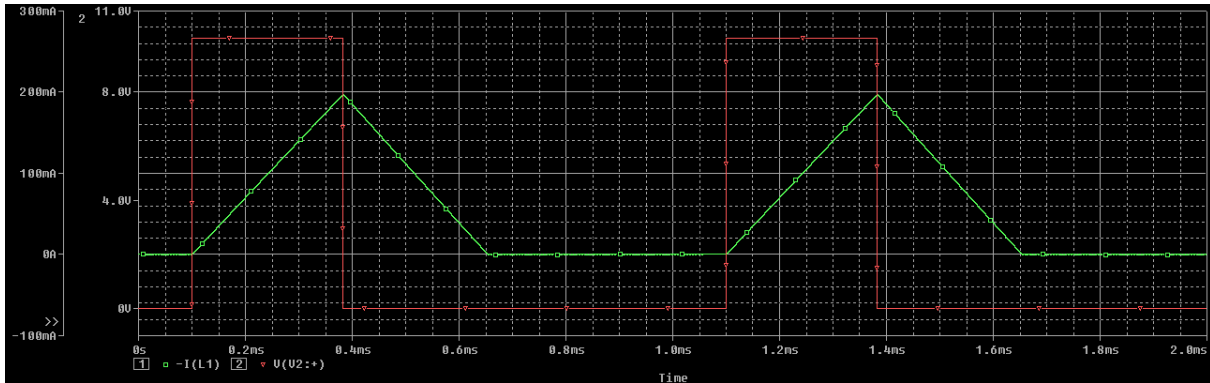
$$I_L(t) = \frac{U_L}{L} \cdot t \quad (29)$$

Z rovnice 29 je zjevné že velikost proudu roste lineárně a lze tedy velikost proudového impulsu regulovat časem sepnutí  $T$ . Z návrhu cívky (3.5.2) vyplývá že cívka bude mít indukčnost cca 17mH. Napájecí napětí  $U_{CC}$  je 12V a jeho přesná hodnota bude sledována

mikrokontrolérem. Pokusný obvod byl spínán na hodnotu 200mA. Čas sepnutí  $t_{on}$  vypočteme z rovnice 29.

$$t = \frac{I_L \cdot L}{U_L} = \frac{0,2 \cdot 17 \cdot 10^{-3}}{12} = 283 \mu S \quad (30)$$

průběh nastavený podle výše napsaných parametrů zobrazuje obrázek 22.

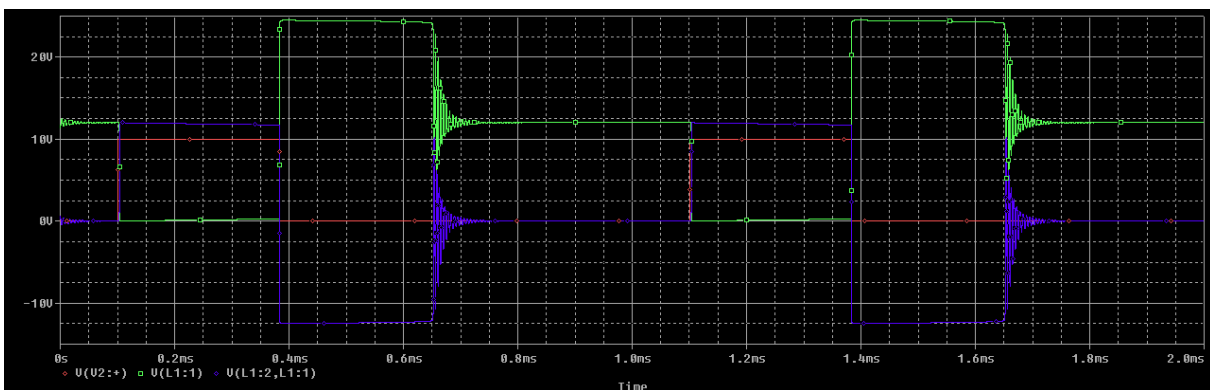


Obr. 22 Proud cívkou a řídicí napětí.

Po vypnutí tranzistoru dochází k otočení polarity na cívce (obrázek 23) a vybíjení proudu přes diody D1 a D2. Dioda D1 je zenerova dioda o závěrném napětí 12V. Dioda D2 brání proudu ze zdroje procházet diodou D1. Proud je vybíjen podle vzorce 29. Použitím D1 o tomto napětí, které je podobné  $U_{CC}$  má za následek skoro stejně rychlý pokles proudu cívkou jako jeho růst při sepnutí. Po dobu vybíjení je napětí na tranzistoru  $U_T$  rovno součtu napětí zdroje a napětí na cívce, které je shodné jako součet úbytků D1 a D2.

$$U_T = U_{CC} + U_{D1} + U_{D2} = 12 + 12 + 0,6 = 24,6V \quad (31)$$

Průběhy těchto napětí vidíme na obrázku 23.



Obr. 23 Průběhy napětí na cívce a na tranzistoru.

Červený průběh znázorňuje spínací signál ovládající obvod. Zelený průběh je napětí na tranzistoru  $U_T$  a modrý průběh je napětí na cívce.

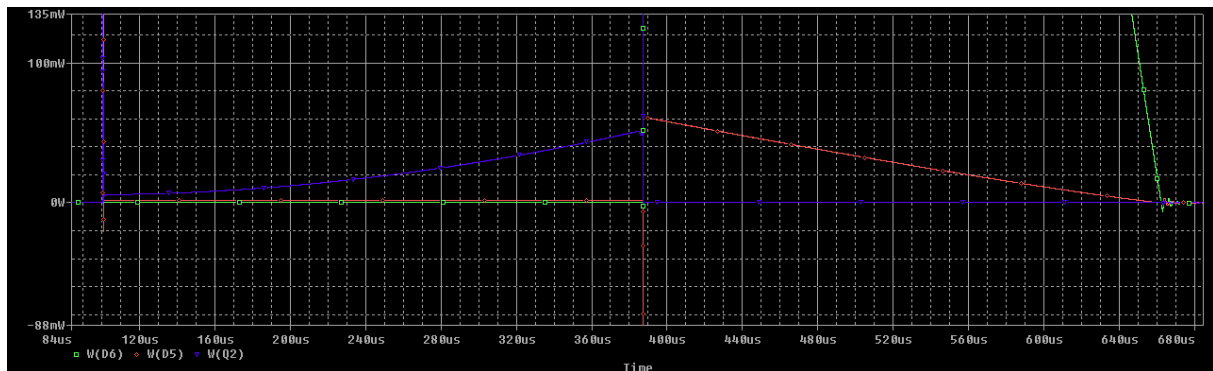
S využitím těchto poznatků byl navržen jednoduchý spínací obvod, který je téměř shodný s tím teoretickým a je pro naši impulsní funkci plně dostačující. Schéma tohoto spínacího obvodu je znázorněno na obrázku 21.

Při volbě součástek musíme zohlednit ztrátové výkony na jednotlivých součástkách. Zobraze si výkony na nejvytíženějších součástkách (obrázek 24).

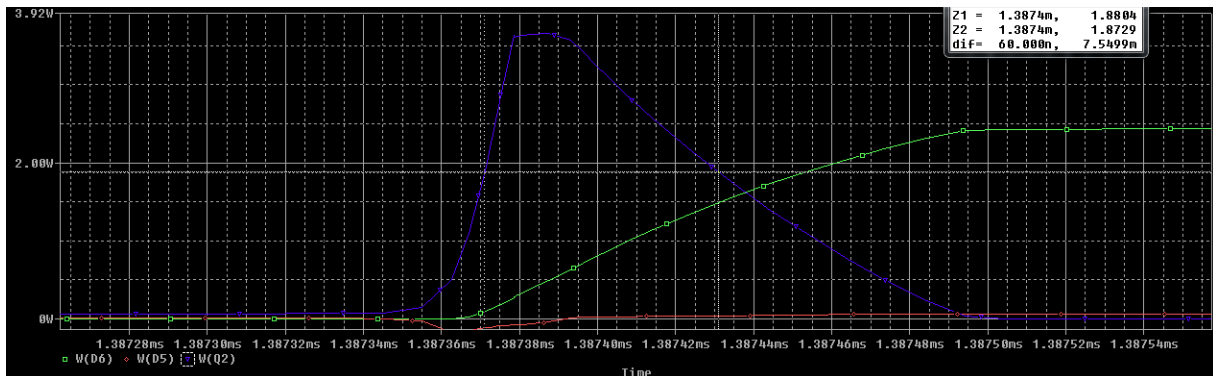


Obr. 24 Ztrátové výkony ve vysílacím obvodu cívky.

Modrý průběh odpovídá ztrátám tranzistoru T. Impuls při vypnutí dosahuje 3,66W a šířku 70nS. Tento čas odpovídá času otevření D1, D2 je schottkyho dioda a její čas sepnutí je zanedbatelný. V nejhorším případě, budou-li se proudové impulsy cívkou opakovat s periodou cca 700μS, lze trvalé ztráty tranzistoru vyjádřit integrací průběhu výkonu. Tyto ztráty se dělí na spínací ztráty  $P_{ON}$  a ztráty vypínací (impuls)  $P_{OFF}$ . Detaily těchto ztrát jsou zobrazeny na obrázku 25 a 26.



Obr. 25 Spínací ztráty tranzistoru a vypínací ztráty diody.



Obr. 26 Vypínací ztráty tranzistoru.

Průběhy těchto výkonů tranzistoru můžeme s malou chybou aproximovat trojúhelníkem v případě spínacích ztrát a obdélníkem pro vypínací ztráty. Výpočet stejnosměrného výkonu tranzistoru  $P_T$  vyjadřuje rovnice 32.

$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T P_{ON} + P_{OFF} dt ; [W] \quad (32)$$

Sepnutí tranzistoru trvá dobu  $t_{ON} = 283\mu\text{s}$  a výkon naroste na  $50\text{mW}$ . Aproximovaný vypínací impuls  $t_{OFF}$  trvá  $60\text{nS}$  a výkon dosáhne hodnoty  $3,6\text{W}$ . dosazením do rovnice 32 vypočteme výkon  $P_T$ .

$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^{t_{ON}} \frac{P_{ON}}{t_{ON}} t dt + \frac{1}{T} \int_0^{t_{OFF}} P_{OFF} dt =$$

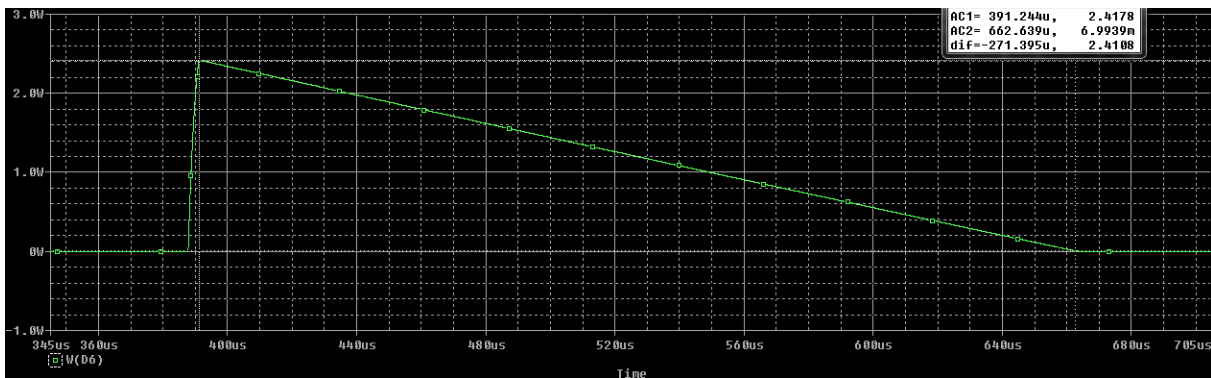
$$\frac{1}{700 \cdot 10^{-6}} \int_0^{283 \cdot 10^{-6}} \frac{0,05}{283 \cdot 10^{-6}} t dt + \frac{1}{700 \cdot 10^{-6}} \int_0^{60 \cdot 10^{-9}} 3,6 dt = \quad (33)$$

$$0,010107 + 0,00030857 = 10,107\text{mW} + 0,3086\text{mW} = \underline{\underline{10,416\text{mW}}}$$

Ztráty v tranzistoru jsou zanedbatelné i při největším zatížení. Bipolární tranzistor tedy musí snést proud kolektorem  $I_C = 0,2\text{A}$  a napětí  $U_{CE} = 30\text{V}$ . Jako vhodný tranzistor s dostatečně přesahujícími parametry byl vybrán BD239 v pouzdru TO220. Tento tranzistor má napětí  $U_{CE} = 100\text{V}$ , proud kolektorem  $I_C = 2\text{A}$ , ztrátový výkon je  $30\text{W}$ . K jeho chlazení postačí malý pasivní chladič. Jako schottkyho dioda  $D_2$  byla zvolena B340LB, která má v propustném směru úbytek napětí  $U_{D2} = 0,5\text{V}$ . Ztráty v této diodě jsou stejné jako  $P_{ON}$  tranzistoru, protože jejich průběhy jsou podobné. Ztráty v zenerově diodě  $D_1$  vypočteme ze vztahu 34.

$$P_{D1} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{vyb}} \frac{P_{D1max}}{t_{vyb}} (t_{vyb} - t) dt \quad (34)$$

kde  $t_{vyb}$  je doba zániku proudu v cívce.  $P_{D1max}$  je maximální hodnoty výkonu. Perioda  $T$  je uvažována jako nejhorší možný případ, jako u tranzistoru,  $700\mu\text{s}$ . Výkon  $D_1$  je zobrazen na obrázku 27.



Obr. 27 Průběh výkonu zenerovou diodou.

z grafu vyčteme  $t_{vyb} = 272\mu\text{s}$  a  $P_{D1max} = 2,42\text{W}$ . S pomocí rovnice 34 vypočteme ztráty  $P_{D1}$ :

$$P_{D1} = \frac{1}{700 \cdot 10^{-6}} \int_0^{272 \cdot 10^{-6}} \frac{2,42}{272 \cdot 10^{-6}} (272 \cdot 10^{-6} - t) dt = 0,47017 = \underline{\underline{470,17\text{mW}}} \quad (35)$$

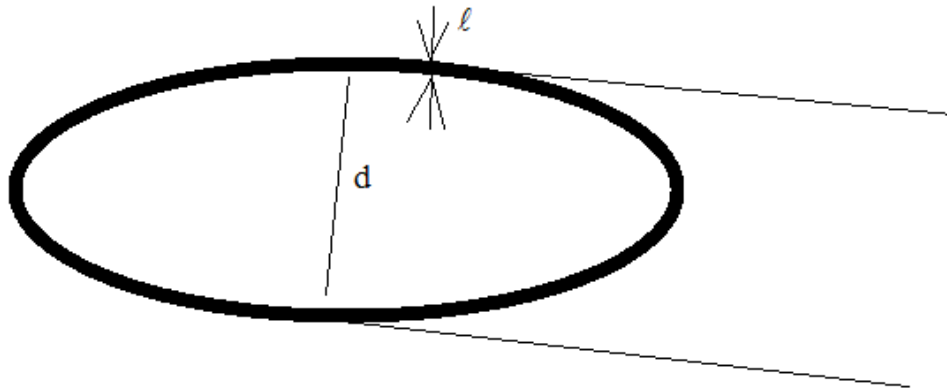
Vhodná zenerova dioda je 1N4742, která má trvalý ztrátový výkon  $1,3\text{W}$ . Maximální impulsní proud  $380\text{mA}$ . Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 23.

### 3.5.2 Vysílací cívka

Vhodná vysílací cívka má tvar solenoidu, jejíž velikost byla zvolena podle předpokládané velikosti zařízení. Průměr cívky je  $15\text{cm}$ , výška cívky cca  $5\text{cm}$  počet závitů

200. Tvar cívky je zobrazen na obrázku 29. Velikost indukčnosti cívky můžeme vypočítat ze vzorce 21. Cívka je vzduchová  $\mu_r=1$ .

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \ell} = \frac{200^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 0,15^2}{4 \cdot 0,05} = 0,0177653 = \underline{\underline{17,76mH}} \quad (36)$$



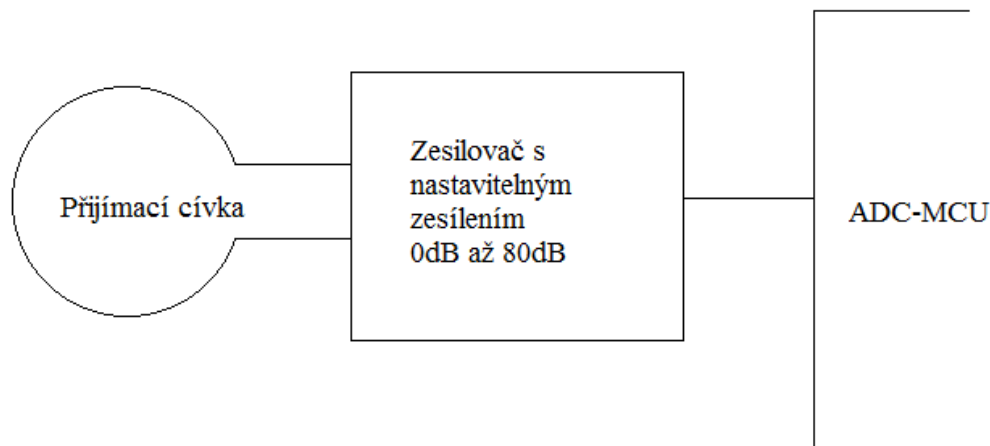
Obr. 28 Tvar vysílací cívky.

Cívka bude navinuta z lakovaného měděného vodiče a průměru 0,5mm. Cívka má kruhový tvar, obrázek 28 je šikmý pohled. Délka jednoho závitu je:

$$\ell = \pi \cdot d = \pi \cdot 0,15 = 0,47m \quad (37)$$

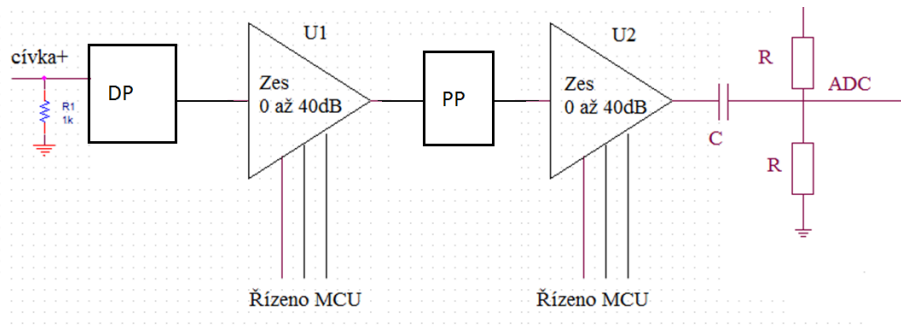
### 3.5.3 Přijímací obvody

Vstupem přijímacích obvodů je přijímací cívka, jejímž návrhem se zabývá kapitola 3.5.4. Signál vstupující do obvodů může mít rozdílnou velikost, podle zachycených kovů, a tudíž musí být zesílení zesilovače vhodně měněno aby signál na vstupu A/D převodníků byl stále dostatečně veliký. Blokové schéma obvodů je znázorněno na obrázku 29.



Obr. 29 Blokové schéma přijímacích obvodů.

Přijímací obvody a napájení A/D převodníků je připojeno k analogové zemi, která je detailněji popsána v kapitole 3.8. Zesilovač je tvořen bloky, které představují jednotlivé integrované obvody nebo filtry a jejich zapojení vychází z jejich datasheetů. Zesilovač je znázorněn na obrázku 30.

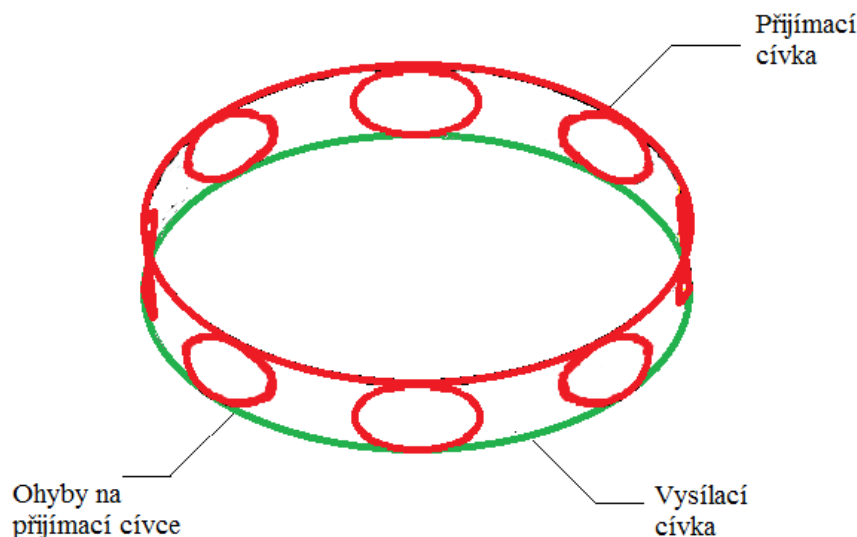


Obr. 30 Zapojení zesilovače detektoru.

Zesílení se nastavuje logickými kombinacemi, které jsou zadávány MCU a přivedeny na piny zesilovačů. Zesilovače  $U1$  a  $U2$  jsou od firmy Linear Technology LT6910-1. Podrobnější popis viz datasheet. Operační zesilovače  $U3$  a  $U4$  slouží k impedančnímu oddělení obvodů a zlepšení parametrů zesilovače. V cestě zesilovačů je zařazena dolní propust a pásmová propust pro omezení kmitočtů pro zabránění aliasingu u A/D převodníku. Jelikož napětí na cívce bude nabývat obou polarit je nutné jej posunout do prostřed rozsahu A/D převodníku MCU. To zajišťují odpory  $R$  a kondenzátor  $C$ . Jejich hodnota je zvolena tak aby nedocházelo ke zkreslení signálu.  $R = 47k\Omega$  a  $C = 220nF$ . Velikost vstupního odporu  $R1$  bude zvolena na základě naměřených hodnot při konstrukci zařízení.

### 3.5.4 Přijímací cívka

Přijímací cívka musí být navržena tak aby přenos z vysílací cívky do přijímací byl nulový, pokud se v jejich poli nenacházejí žádné detekované předměty. Princip a návrh cívky byl převzat z práce Soustava cívek s nulovou vzájemnou indukčností pro detektory kovů [3]. Přijímací cívka bude mít stejný počet závitů jako cívka vysílací. Pro kompenzaci a dosažení nulového přenosu bude vytvořeno 8 ok, které budou přehnuty, jak je znázorněno na obrázku 31.



Obr. 31 Přijímací a vysílací cívka.

Velikost ok byla zvolena 4 cm. výslednou délku cívky lze spočítat jako:

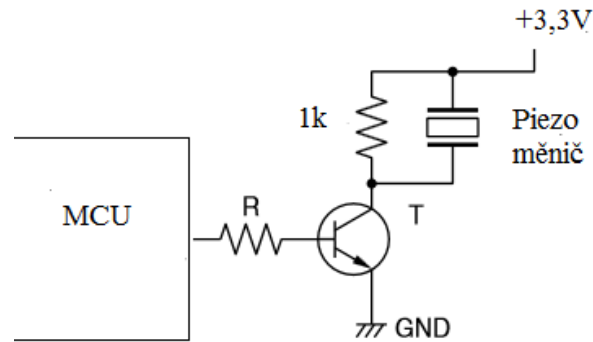
$$\ell_c = \pi(d_c + 8d_o) = \pi(0,15 + 8 \cdot 0,04) = 1,47m \quad (38)$$



Z rovnice 38 a 37 vyplývá že vinutí přijímací cívky bude 3,128x delší nežli vinutí přijímací cívky Přesného doladění se dosáhne mechanickým tvarováním. Cívka bude navinuta ze stejného vodiče jako cívka vysílací.

### 3.6 Reproduktor

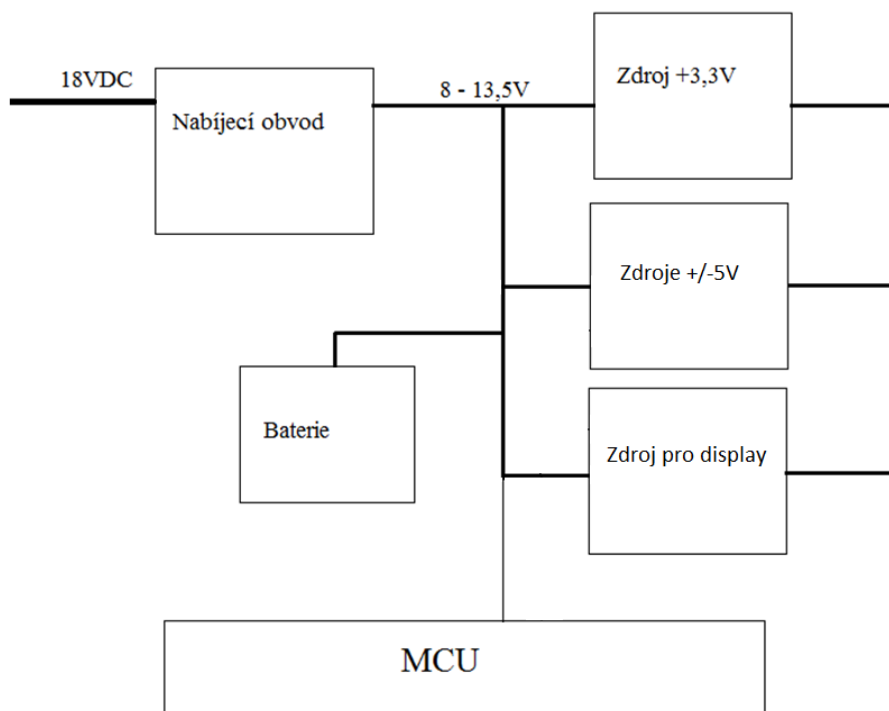
Pro zvukovou indikaci byl zvolen piezo měnič, ovládaný MCU. Schéma zapojení na obrázku 32.



Obr. 32 Zapojení piezo reproduktoru.

### 3.7 Napájení zařízení

Zařízení jako takové potřebuje ke svému provozu elektrickou energii. Pro bezdrátový provoz je zapotřebí baterie, která bude v přístroji zabudována. Blokové schéma napájecích obvodů je na obrázku 33.

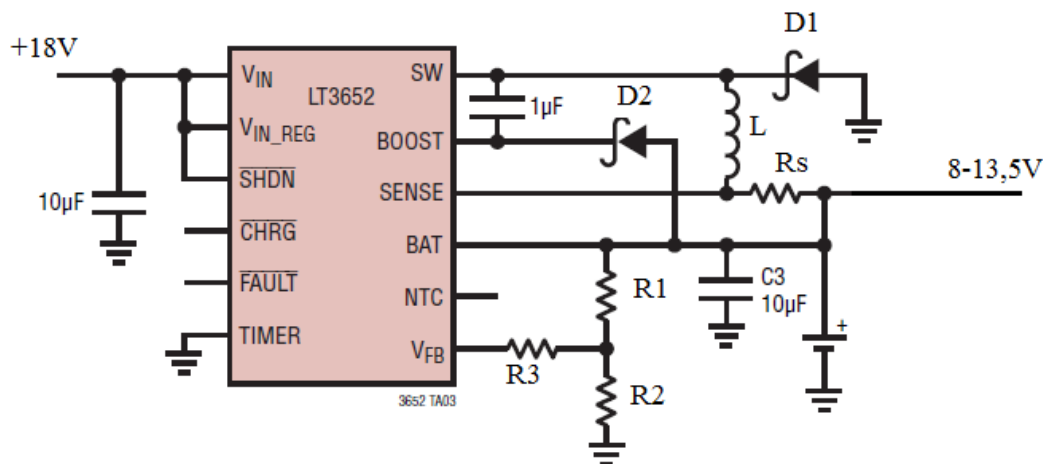


Obr. 33 Blokové schéma napájecí části.

Napájení přístroje je zajišťováno 12V baterií o kapacitě 0,8Ah. Z tohoto napětí jsou napájeny všechny zdroje. Baterie je dobíjena přes nabíjecí obvod který je napájen adaptérem na 18VDC.

### 3.7.1 Nabíjecí obvod

Tento jediný obvod se nenachází na DPS. Je zataven v plastu poblíž baterie. Jako nabíjecí obvod byl vybrán integrovaný obvod LT3652. Obvod byl zapojen podle datasheetu a hodnoty součástek zvoleny tak aby to odpovídalo potřebným parametrům. Schéma zapojení je na obrázku 34.



Obr. 34 Schéma nabíjecího obvodu

Jako diody  $D_1$  a  $D_2$  byly zvoleny B340LB, které svými parametry plně splňují potřeby aplikace ( $I_F = 3A$ ,  $U_R = 40V$ ). Dělič  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  určuje velikost nabíjecího napětí a lze je vypočítat [5] takto: Obvod nabíjí dokud není na pinu  $V_{FB}$  napětí 3,3V.

Nejprve si vypočteme poměr  $R_2$  a  $R_1$ :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{3,3}{V_{NAB} - 3,3} = \frac{3,3}{13,3 - 3,3} = \frac{33}{100} \quad (39)$$

Zvolíme proud zpětnou vazbou  $10\mu A$ . Poté určíme  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{3,3}{10\mu A} = 330k\Omega \quad (40)$$

Poté vypočteme  $R_1$  pomocí rovnice 39:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{R_1}{R_2} = 330 \cdot 10^5 \cdot \frac{100}{33} = 10^6 = 1M\Omega \quad (41)$$

Ekvivalentní odpor děliče je:

$$R_{EQ} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10^6 \cdot 3,3 \cdot 10^5}{10^6 + 3,3 \cdot 10^5} = 248,12k\Omega \quad (42)$$

Odpor  $R_3$  musí vykompenzovat vstupní impedanci pinu  $V_{FB}$   $250k\Omega$ .

$$R_3 = 250k\Omega - R_{EQ} = 250 - 248,12 = 1,88k\Omega \quad (43)$$

Zvolíme-li odpor  $1,8k\Omega$  dopustíme se minimální chyby. Odpor  $R_S$  určuje maximální velikost nabíjecího proudu. Úbytek na odpor  $R_S$  může být maximálně  $0,1V$  pak dojde k limitaci. Nabíjecí proud byl s ohledem na možnosti baterie zvolen  $0,5A$ .

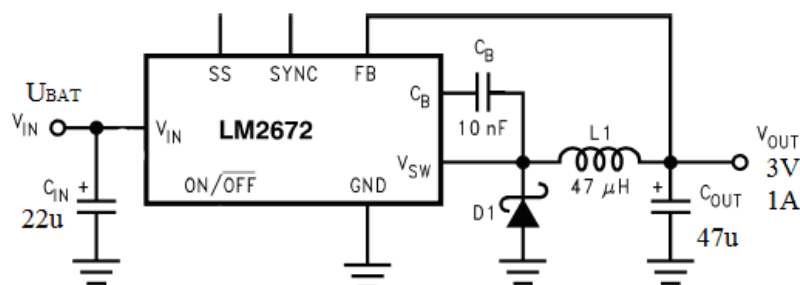
$$R_S = \frac{0,1}{I_{NAB}} = \frac{0,1}{0,5} = 0,2\Omega \quad (44)$$

### 3.7.2 Baterie

Jako baterie byla zvolena malá Lead-Acid baterie o napětí  $12V$  a kapacitě  $0,8Ah$ . Její rozměry jsou  $90 \times 61,5 \times 25mm$ . Baterie obsahuje interní regulátor pro zamezení přebíjení baterie. Maximální nabíjecí napětí je  $14,2V$  a proud  $0,5A$  [10]. Hmotnost baterie je  $0,35kg$ .

### 3.7.3 Zdroj +3,3V

Tento zdroj je hlavní a slouží k napájení externí paměti, displeje a mikrokontroléru. Jedná se o zdroj spínané koncepce, kde je spínací prvek umístěn v pouzdře integrovaného obvodu. Jako IO byl zvolen LM2672-3,3V. Tento obvod má pevné výstupní napětí  $3,3V$  a pracuje na principu step-down měniče. Má vlastní integrovaný oscilátor a obsahuje jen pár externích součástek.

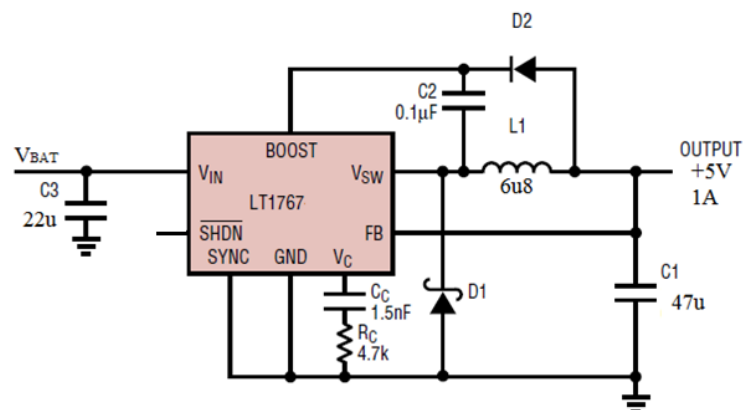


Obr. 35 Zapojení zdroje +3,3V

Zapojení je podle datasheetu [6].  $C_{OUT}$  musí mít malou hodnotu ESR.  $D_1$  byla vybrána B340LB.

### 3.7.4 Zdroj +5V

Tento zdroj, společně se zdrojem  $-5V$ , slouží k napájení operačních zesilovačů, které potřebují pro správnou funkci symetrické napětí a také zesilovačů s nastavitelným zesílením. Jedná se o zdroj spínané koncepce měniče typu step-down. Jako IO byl zvolen LT1767-5.

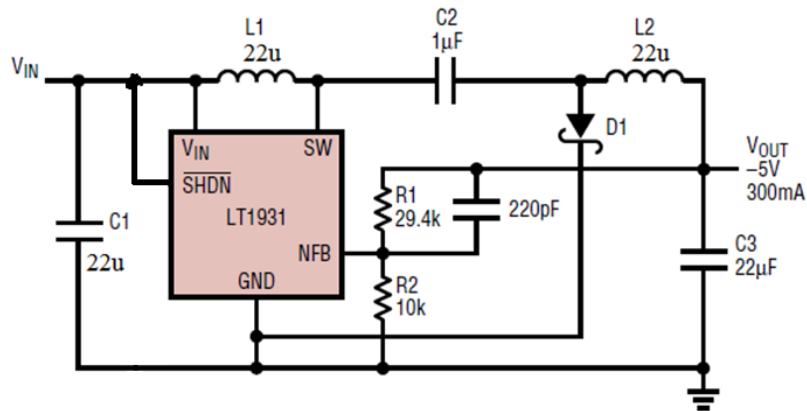


Obr. 36 Zapojení zdroje +5V

Diody  $D_1$  a  $D_2$  byly vybrány B340LB. Zapojení je podle datasheetu [7].

### 3.7.5 Zdroj -5V

Tento zdroj slouží, spolu s 5V zdrojem, k napájení operačních zesilovačů. Je to invertující zdroj pracující s dvěma tlumivkami mezi kterými je kapacitní vazba. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 37.

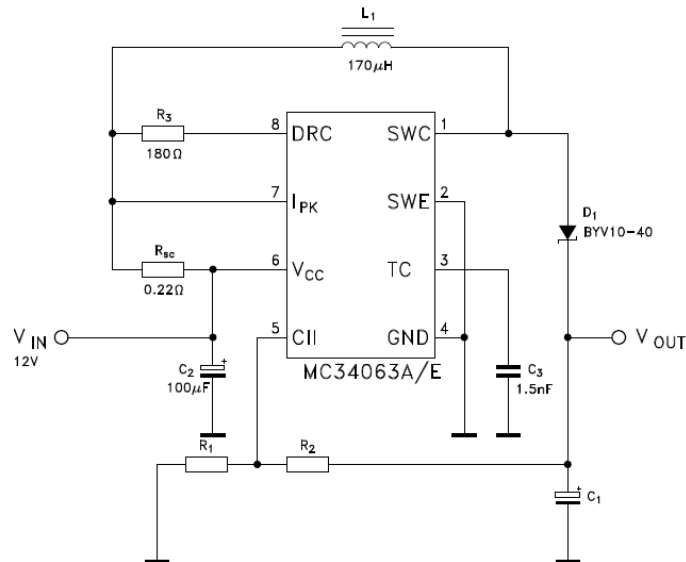


Obr. 37 Zapojení zdroje -5V

Dioda  $D_1$  byla zvolena shodně jako u ostatních zdrojů B340LB. Odpor  $R_1$  bude v nahrazen odporem  $27k\Omega$  v sérii s trimrem o odporu  $5k\Omega$ . Přesná hodnota výstupního napětí bude doladěna při konstrukci. Výstupní kondenzátor  $C_3$  musí mít co nejmenší ESR.

### 3.7.6 Zdroj pro display

Pro napájení podsvícení displeje je zapotřebí napětí cca 14V. K tomuto účelu je z napětí baterie vytvořeno spínaným měničem. V zapojení je využit běžný IO MC34063. Zapojení je odvozeno z datasheetu[9].



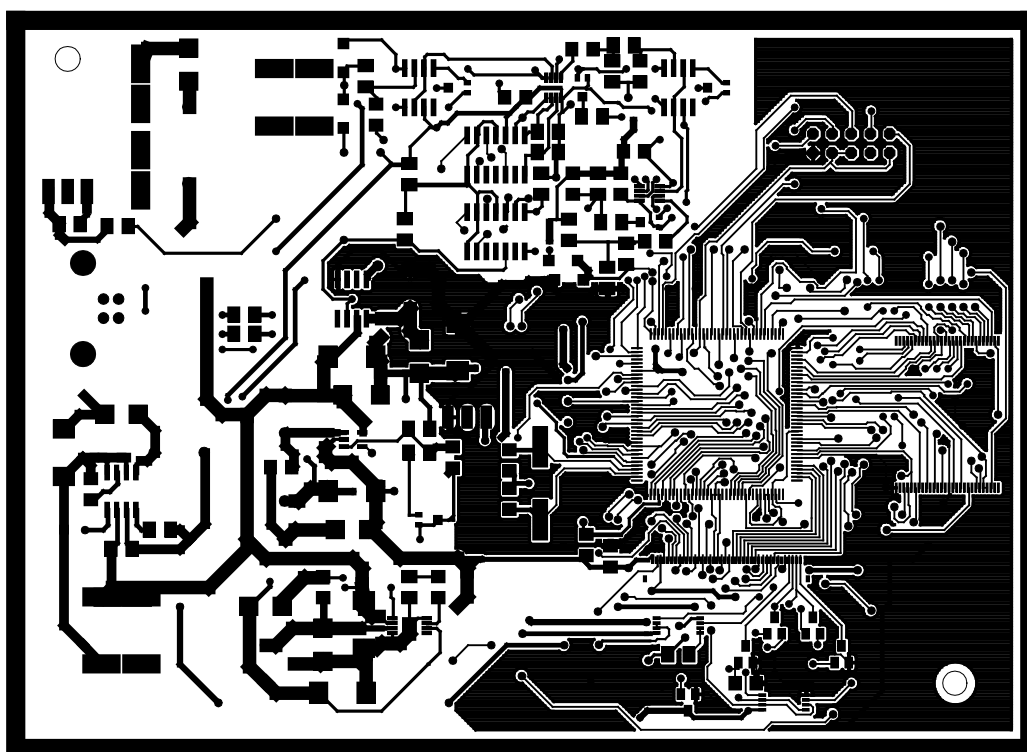
Obr. 38 Zapojení zdroje pro displej

## 4 Konstrukce

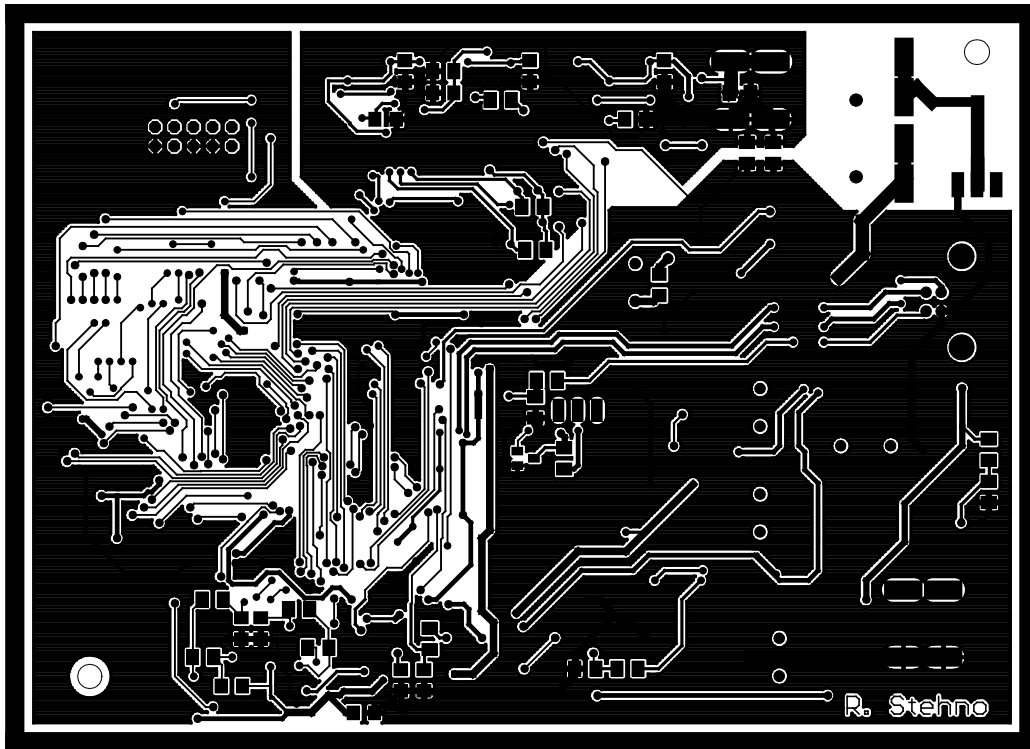
V Předchozí kapitole bylo popsáno zařízení po elektronické stránce jehož celkové schéma nalezneme v příloze 1. Složitost zapojení, zejména digitálních datových vodičů, si vyžaduje použití dvouvrstvé desky plošných spojů. Deska byla navržena v programu Eagle. V této kapitole bude popsána tato deska, její osazení, oživení a také ostatní mechanické konstrukční postupy tak aby tato kapitola mohla být využita i jako návod na výrobu detektoru.

### 4.1 Deska plošných spojů

Při návrhu desky plošného spoje byl kladen důraz na shodné rozměry desky s první verzí detektoru a shodné rozmístění všech konektorů, aby bylo možné první verzi desky nahradit touto verzí druhou. S ohledem na složitost desky je amatérská výroba velice nevhodná. Na obrázku 39 je přední strana navržené desky a na obrázku 40 je zadní strana navržené desky.



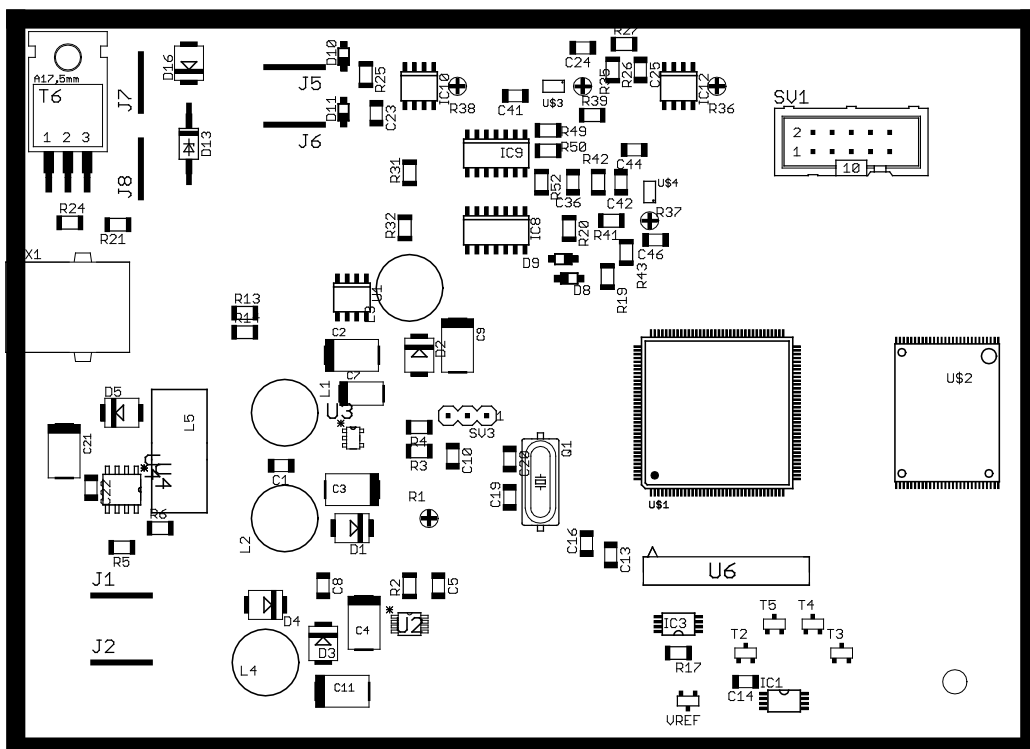
Obr. 39 Deska plošných spojů - přední strana.



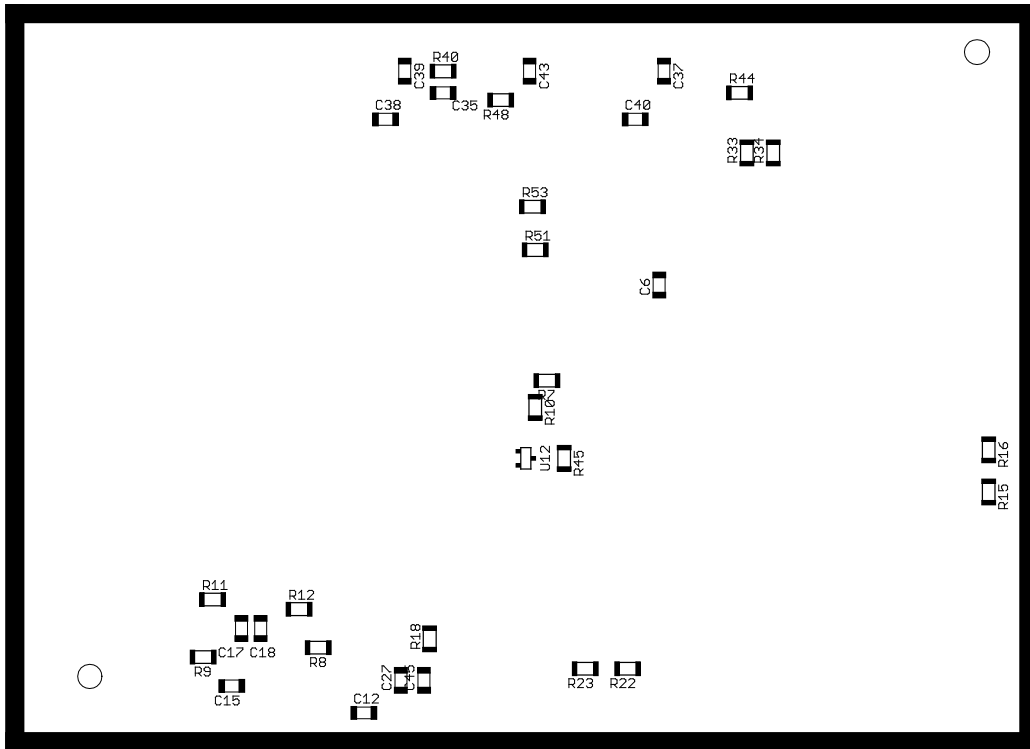
Obr. 40 Deska plošných spojů - zadní strana.

## 4.2 Osazovací plán

Rozmístění součástek je dáno realizací desky plošných spojů. Umístění konektorů a mechanických prvků je zvoleno po okrajích desky. Při návrhu byla snaha umístit všechny součástky na přední stranu ale deska by byla značně složitější.



Obr. 41 Osazovací plán - přední strana.



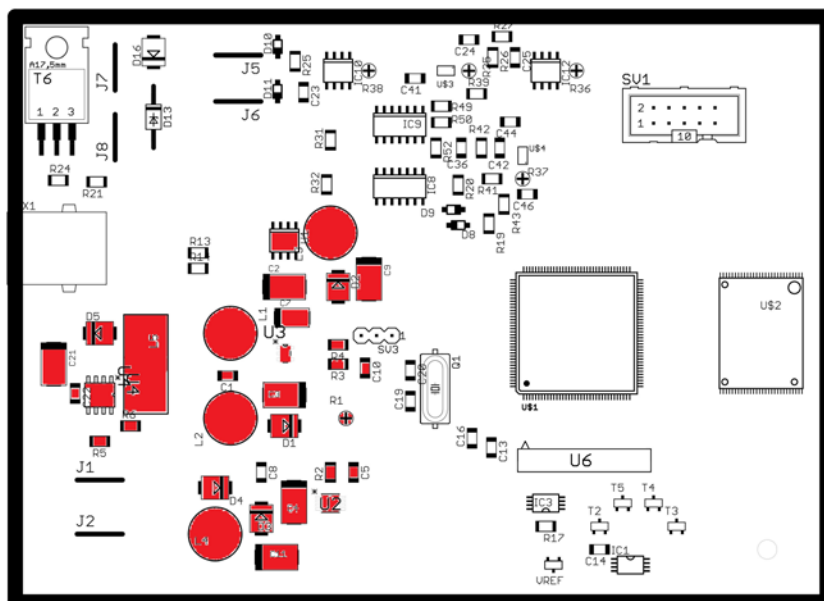
Obr. 42 Osazovací plán - zadní strana.

### 4.3 Osazení a oživení desky plošných spojů

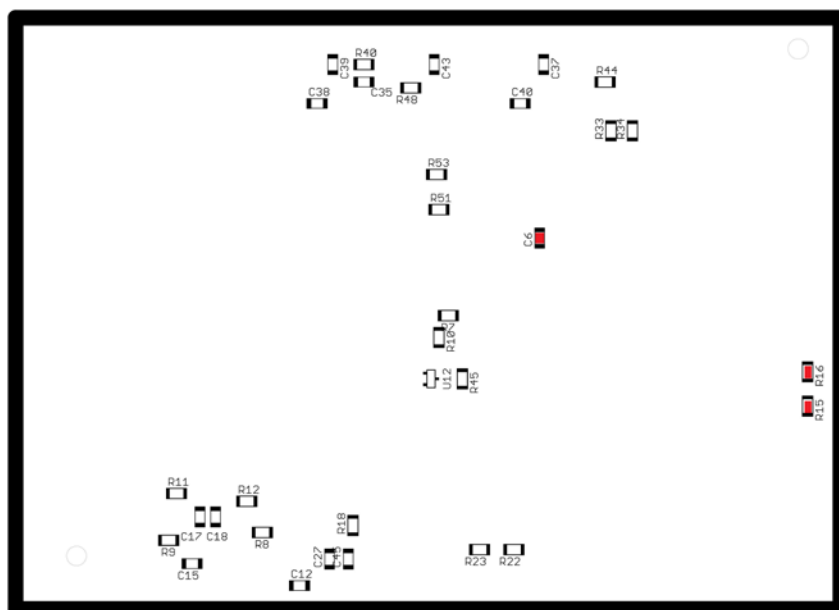
Při osazování a ožívování desky je nanejvýš vhodné zvolit správný postup osazení a zprovoznění desky plošných spojů. Nedodržením tohoto postupu se zařízení vystavuje vyššímu riziku poškození součástek při nedokonalém pájení či jiné výrobní chybě.

#### 4.3.1 Zdrojová část

Začneme s osazením zdrojové části, neboli 4 spínanými měniči, které na desce jsou. Součástky těchto zdrojů jsou zvýrazněny červeně na obrázku 43 a 44.

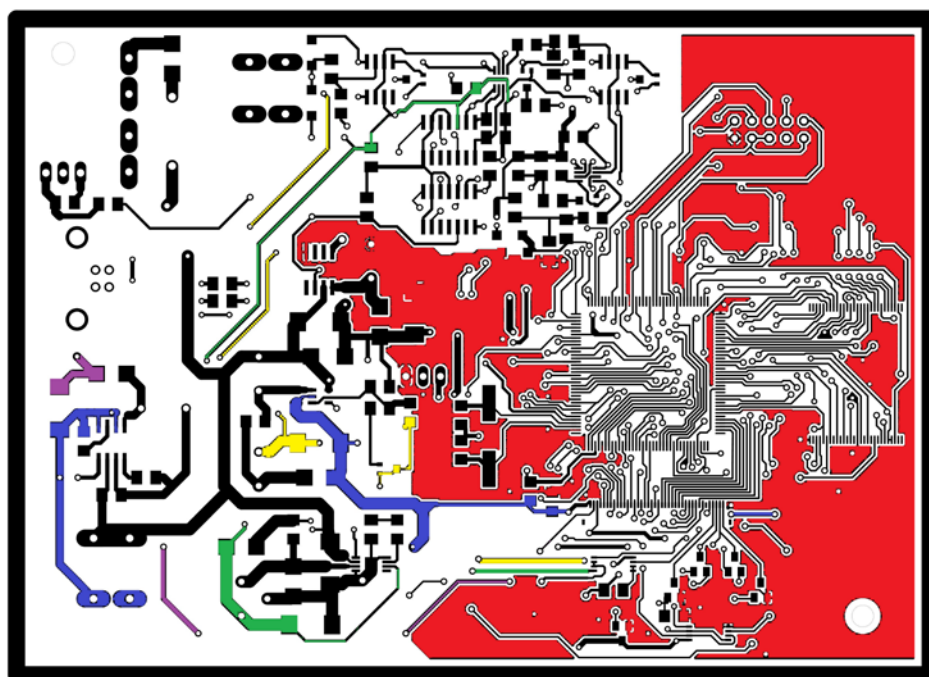


Obr. 43 Vyznačení součástek zdrojů - přední strana



Obr. 44 Vyznačení součástek zdrojů - zadní strana

Po osazení těchto součástek můžeme připojit baterii a provést test správné funkčnosti spínaných měničů. Vhodné místa pro měření výstupních napětí jsou barevně označeny na obrázku 45. Modrá je GND, červená je +3,3V, zelená je +5V, žlutá je -5V a fialová je napětí pro LCD displej.



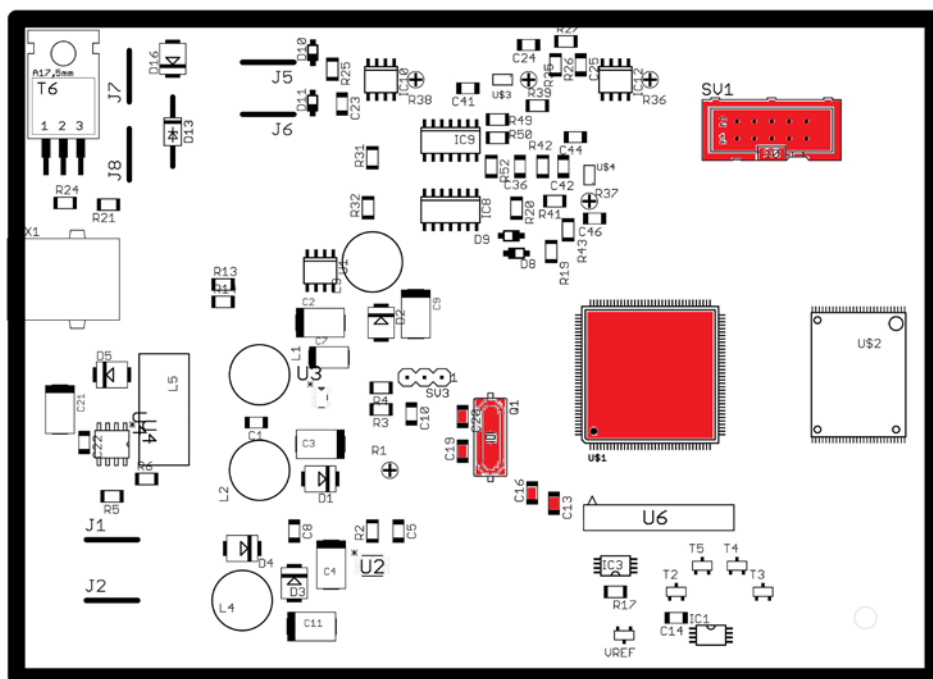
Obr. 45 Zvýraznění napájecích cest - přední strana

Pokud jsou výstupní napětí správná lze pokračovat v osazování desky.

#### 4.3.2 MCU a podpůrné obvody

Další krok ve výrobě zařízení je osazení mikrokontroléru a jeho podpůrných jakožto i programovacích součástek. Mezi ně patří krystal, blokovací kondenzátory a konektor JTAG. Tyto součástky jsou umístěny na přední straně desky viz obrázek 46.





Obr. 46 MCU a jeho podpůrné součástky

### 4.3.3 Ostatní součástky

Po zkontrolování funkčnosti MCU pomocí programátoru, můžeme přikročit k zapájení zbylých součástek. V průběhu pájení můžeme kontrolovat bezchybnost pájení například prozváněním napájecích cest vůči zemi nebo sobě navzájem.

## 4.4 Měřicí cívka

Měřicí cívka byla vyrobena podle návodu popsaného v kapitole 3.5.2 a 3.5.4 a v patentu Soustava cívek s nulovou vzájemnou indukčností pro detektory kovů [3]. Cívka je složená z přijímací a vysílací cívky. Vysílací cívka byla navinuta o průměru 125mm na délce 5mm o 200 závitů. Výsledné parametry vysílací cívky jsou:

Sériový odpor  $R_s$ : 43,5 $\Omega$

Indukčnost  $L$ : 123mH

Přijímací cívka byla navinuta o průměru 3,4 větší nežli vysílací a následným přehnutím bylo vytvořeno 8 ok které ohneme a připevníme k vysílací cívce.

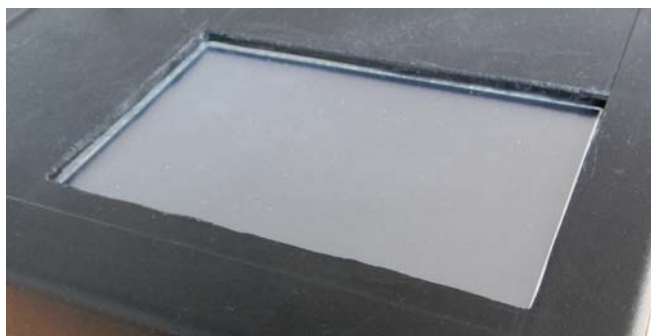


Obr. 47 Měřicí cívka před dotvarováním a zafixováním

Pro dosažení nulového přenosu je nutné cívku dotvarovat a po dosažení co nejnižšího přenosu zafixovat. Poté se uloží do kulatého pouzdra viz obr. 47.

## 4.5 Dotykový displej

Dotykový displej je připevněn zespoda horní poloviny krytu, ve které je vyříznutý otvor potřebných rozměrů. Umístění je znázorněno na obrázku 48 a 49.



Obr. 48 Displej a otvor pro něj



Obr. 49 Displej pohled zespodu

## 4.6 Kompletace zařízení.

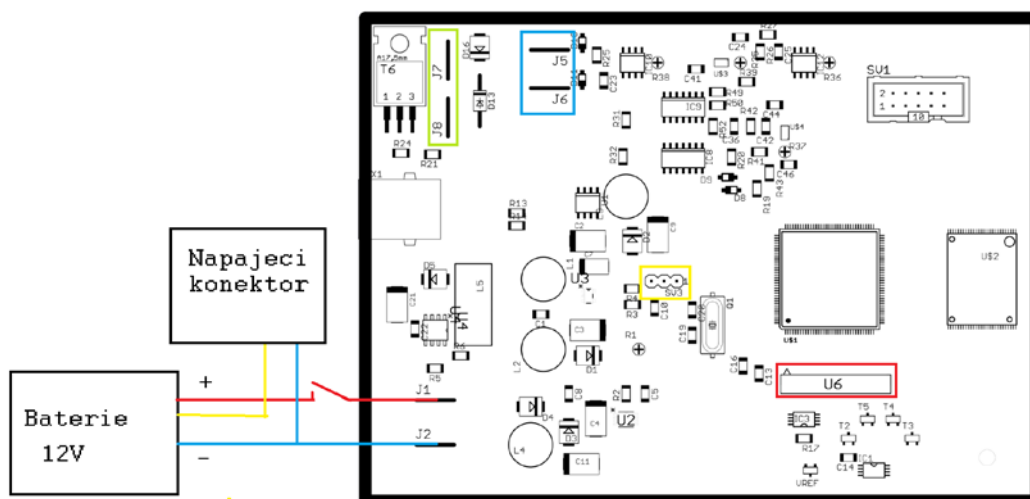
Zařízení bude uloženo ve dvoudílné černé krabici. Desku plošného spoje je vhodné přišroubovat pro možnost pozdější demontáže. Ostatní komponenty je vzhledem k vlastnostem krabice vhodné přilepit, případně zatavit plastem. Na zadní stěnu přilepíme detekční cívku v kulatém pouzdře a připojíme podle obrázku 52. Červeně je vyznačen konektor displeje, žlutě konektor piezo-reproduktoru, modré svorky jsou vstup zesilovače (zde připojíme přijímací cívku), Zelené svorky jsou výstupy pro budící cívku



Obr. 50 Kompletní zařízení



Obr. 51 Kompletní zařízení



Obr. 52 Zapojení cívky a ostatních komponentů.

Je zapotřebí z levé strany krabičky vyříznout otvor pro USB konektor, vypínač a napájecí konektor. Vhodně umístíme piezo reproduktor, u kterého vyvrtáme několik dírek pro zlepšení akustického přenosu. Zapojení těchto komponentů je zakresleno na obrázku 52. Po přidělení a připojení všech komponentů uzavřeme krabičku.

# 5 Programování zařízení

Pro pochopení této části textu se předpokládá alespoň základní znalost jazyka C a programování MCU typu ARM.

## 5.1 Programovací software a hardware

S ohledem na výrobce mikrokontroléru je vhodné použít originální vývojové prostředí Atmel Studio. Tento software je volně ke stažení na stránkách firmy Atmel. Výhodou originálního software je hlavně plná podpora tohoto mikrokontroléru, všech jeho periférií a umožňuje krokovat program v reálném čase. V tomto prostředí je možno využít průvodce neboli ASF, který disponuje předpřipravenými funkcemi, které se ale moc nehodí pro časově náročný kód. Další možností programování je přímý zápis do kontrolních registrů. Tato možnost je značně složitější ale umožňuje naprostou kontrolu nad všemi perifériemi s ohledem na časovou náročnost programu.

Jako debugger byl použit Atmel-ICE, který je zobrazen na obrázku 53. Tento vývojový nástroj umožňuje programovat téměř všechny mikrokontroléry od firmy Atmel. Lze je připojit pomocí SPI, JTAG nebo dWIRE. Vhodné je připojení pomocí sběrnice JTAG, které umožňuje krokování programu v reálném čase a další výhody jako možnost zapisovat do proměnných za běhu programu atd. Návod na připojení MCU k debuggeru nalezneme v návodu k debuggeru, který je dostupný na webu výrobce.



Obr. 53 Debugger Atmel-ICE

## 5.2 Nastavení výstupů a hodinových signálů

Správná funkce detektoru vyžaduje aby byly na začátku běhu programu přednastaveny vstupy a výstupy MCU, popřípadě přiděleny perifériím. Toto nastavení provádí funkce

```
void PinInit(void)
```

kteřá je volána jednou při zapnutí zařízení. Nalezneme ji vypsanou v příloze 3. Po vytvoření projektu a zvolení konkrétního MCU je potřeba změnit defaultní nastavení zdroje hodinového signálu. Toto nastavení se provádí v souboru `system_sam4e.c`. Je důležité zkontrolovat následující proměnné, aby měly stejné nastavení.

```
#define SYS_BOARD_PLLAR      (CKGR_PLLAR_ONE \
| CKGR_PLLAR_MULA(0x1DU) \
| CKGR_PLLAR_PLLACOUNT(0x3FU) \
| CKGR_PLLAR_DIVA(0x1U))
```

Dále je nutné správné nastavení děliče hodinového signálu pro USB. Nastavuje se to registrem

```
PMC->PMC_USB = (0x4u << 8) ;
```

Nastavením těchto registrů a proměnných dosáhneme potřebného nastavení a můžeme přistoupit k programování jednotlivých částí zařízení.

### 5.3 Zobrazovací funkce displeje

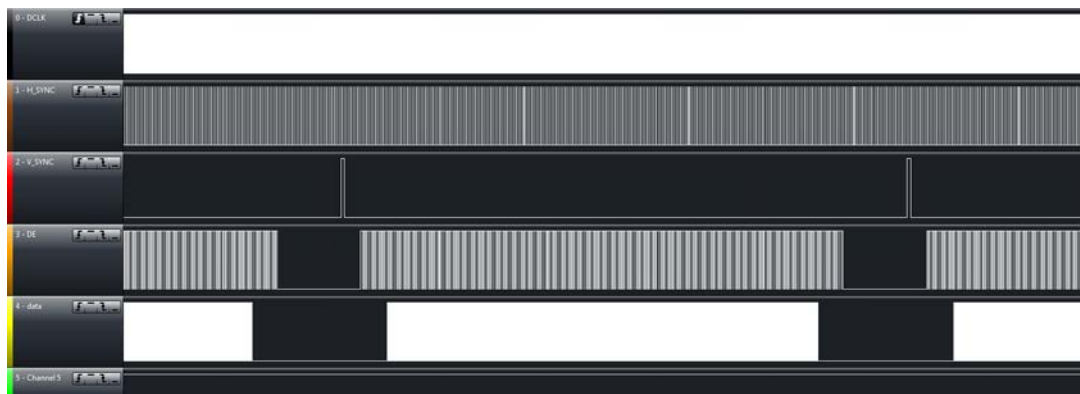
V této podkapitole bude podrobně popsán princip zobrazovací funkce, nastavení MCU a také princip zobrazování znaků, čísel a objektů.

#### 5.3.1 Zapojení výstupů

Displej je připojen k mikrokontroléru na portu C. Piny 0-23 jsou datové piny, které slouží k přenosu zobrazovaných dat. Pin 24 slouží k přenosu hodinového pixelového signálu, který je generovaný čítačem. Piny 26 a 27 jsou nakonfigurovány jako vstupy A/D převodníku, který slouží pro detekování dotyku na displeji. Pin 28 je použit jako signál VSYNC, pin 29 je HSYNC. Displej může být zapnut nebo vypnut pinem 30. Pin 31 je připojen jako signál DE (Data Enable).

#### 5.3.2 Princip zobrazování a nastavení čítačů

Použitý displej pracuje v tzv. transmisivním režimu, který by se dal nejlépe přirovnat k principu analogové televize, kde jsou data vysílány pixel po pixelu, jednotlivé řádky jsou začínány signálem HSYNC a zobrazování nového snímku začíná impulsem VSYNC. Aktivní zobrazovací doba dat je dána signálem DE. Příklad zobrazovacích signálů je zobrazen na obrázku 54.



Obr. 54 Zobrazovací průběhy displeje

Signály jsou na obrázku jsou seřazeny takto: CLK, HSYNC, VSYNC, DE a DATA. Podrobné informace o signálech nalezneme v datasheetu displeje[11]. signály CLK a HSYNC jsou generovány automaticky čítači, které je nutné pro správnou činnost správně nastavit. Nastavení čítačů je detailně popsáno v datasheetu[4] MCU. Provádí se při zapnutí přístroje funkcí, kterou nalezneme detailně popsanou jako součást zdrojového kódu v příloze 3.

```
void TimerInit(void)
```

K zobrazení je potřeba mít proměnnou která bude obsahovat informace o všech zobrazovaných bodech. Pokud by jsme uvažovali o uložení informací o celé ploše displeje, 24-bitů na každý pixel, potřebovali by jsme SRAM o velikosti 392 kB. Jelikož zvolený MCU disponuje pouze 128 kB SRAM bylo nutné přijmout některé topologické omezení, Hlavním je použití pouze 256 barev a tudíž 8-bitů na pixel. Výsledná velikost 131 kB je ale stále moc velká tudíž byla aktivní zobrazovací plocha zmenšena z 480x272 na 420x238 pixelů. Tímto omezením dosáhneme velikosti proměnné 100 kB, která se do SRAM paměti vejde. Hodnota jednotlivých barev RGB je v 8 bitové hodnotě zakódována stejně jako u obrázku formátu

BMP. Při zobrazování je tato hodnota použita jako adresa v dekodovacím vektoru který má 256 prvků z nichž každý obsahuje 32 bitovou hodnotu z nichž spodních 24 bitů je hodnota odeslaná do displeje. Hlavní pole které uchovává zobrazovací data nazvané

```
uint8_t DISPLAY_POLE[420][238];
```

je plněné pomocí razítkových funkcí, které se postupně volají a plní pole znaky, čísla a písmeny. Poté je zavolána zobrazovací funkce a data jsou zobrazeny na displeji. Zobrazením se stav tohoto pole nezmění.

### 5.3.3 Zobrazovací funkce

Zobrazovací funkce slouží pro okamžité zobrazení obsahu proměnné DISPLAY\_POLE na displej. Pro kontinuální zobrazování je nutno jí volat opakovaně, nejlépe v podmíněné smyčce. Zobrazovací funkce:

```
void ZobrazitDISP(void)
```

je detailně popsána v příloze 3. Tento způsob zobrazování způsobuje změnu počtu zobrazených snímků za vteřinu v závislosti na vytíženosti mikrokontroléru.

Zobrazovací funkce je tvořena hlavní smyčkou která se periodicky opakuje 279x, přičemž je synchronní s HSYNC. První 3 průběhy tvoří impuls VSYNC. 6 cyklus je první řádek displeje. Prvních 17 řádků je prázdných tudíž dochází ke spuštění pouze signálu DE přičemž všechny datové signály jsou v logické 0. Následující řádky jsou tvořeny cyklem, který je synchronizovaný k signálu CLK. Prvních 30 pixelů po zapnutí DE jsou data neaktivní, následuje synchronizovaná smyčka která postupně zobrazuje pixel po pixelu a poté následuje na konci 30 prázdných pixelů. Tento cyklus proběhne 238x a poté následuje dalších 17 prázdných řádků. Výrobce doporučuje vyčkat před dalším VSYNC impulsem ještě několik HSYNC impulsů. Funkce obsahuje cca 4 tyto cykly navíc.

Při tvorbě funkce je velice užitečné použít logický analyzátor který umožňuje kontrolovat průběhy, které lze podle toho následně modifikovat či optimalizovat. Jakékoli přerušení při běhu této funkce není přípustné, proto je nutno je na začátku funkce zakázat a dle potřeby je na konci povolit.

### 5.3.4 Sada znaků, čísel a objektů

Pro zobrazování textu bylo nutné vytvořit sadu znaků, abecedy, čísel a znamének. Pro tyto účely byla vytvořena sada funkcí, které slouží k naplnění zobrazovacího pole. Znaky abecedy, čísla a znaménka jsou vytvořeny metodou razítek. Vstupním parametrem jsou poloha X, Y, velikost znaku, barva a barva pozadí. Znak je podle těchto parametrů otisknut do zobrazovací proměnné. Vkládání geometrických prvků jako obdélníků, kruhů a rámečků je využito podmiňovacích funkcí pro naplnění proměnné. Vstupními parametry jsou souřadnice, velikost popřípadě síla rámečku, barva a barva pozadí. Příkladem je například funkce písmene A, která je podrobně popsána v příloze 3.

```
void A(uint16_t y, uint16_t x, uint8_t size, uint8_t barva, uint8_t pozadi)
```

Součástí této sekce jsou také funkce pro vyčištění zobrazovací proměnné a to funkce pro vyčištění celé proměnné:

```
void OBR_CLS(void)
```

a také funkce pro vyčištění obdélníkové části zobrazovacího pole.

```
void OBR_CLS_SEG(uint16_t y1, uint16_t x1, uint16_t y2, uint16_t x2)
```

Tyto funkce pracují se dvěma vnořenými cykly, přičemž v té částečné funkci dochází ještě s porovnáním rozsahu se vstupními proměnnými. Obdobně jsou zde také funkce pro vyplnění celé zobrazovací proměnné jednou barvou nebo její částí. Všechny tyto funkce jsou vypsány v příloze 3.

## 5.4 A/D převodník a jeho nastavení

Pro správnou funkci zařízení je potřeba použít A/D převodník. Zařízení potřebuje měřit hodnotu napětí baterie, pro vypočtení velikosti budícího impulsu detekční cívky, dále je třeba měřit napětí na výstupech X a Y dotykových obvodů. Hlavní funkcí A/D převodníku je však vzorkovat signál, který je přijat cívkou a zesílen programovatelným zesilovačem.

Pro tyto účely dostačují převodníky obsažené v pouzdře mikrokontroléru. Ten obsahuje 2 samostatné A/D převodníky, kde každý disponuje až 12 vstupy, mezi kterými lze přepínat. Pro měření dotyku displeje je tedy využit převodník 0 a pro měření baterie a vzorkování naměřeného signálu je použit převodník 1.

Před vzorkováním je nutno nastavit převodníky na správnou pracovní frekvenci. Detailněji je nastavení popsáno v datasheetu mikrokontroléru. Nastavení převodníků se provádí funkcí, která je volána při spuštění přístroje.

```
void ADC_Init(void)
```

Tato funkce je popsána v příloze 3.

### 5.4.1 Funkce měření napětí baterie

Měření baterie je potřebné, protože buzení detekční cívky je prováděno napěťovými impulsy obdélníkového tvaru a napětí tohoto pulsu spolu s délkou ovlivňuje velikost indukovaného proudu. Funkce pro změření napětí baterie

```
void ADC_Battery(void){
```

při každém zavolání změří napětí baterie, které následně zprůměruje s posledními hodnotami. Nejprve dojde k zapnutí příslušného vstupu převodníku 1. Poté je spuštěn převod A/D. Poté je nutné chvíli počkat, Naměřená hodnota se musí vydělit konstantou vypočtenou empiricky v závislosti na odporovém děliči. Pro průměrování je využit jednoduchý rekurzivní filtr který není náročný na velikost paměti. Na konci funkce dojde k deaktivaci použitého vstupu A/D převodníku.

### 5.4.2 Funkce měření dotyku displeje

Funkce pro měření hodnoty dotyku displeje jsou podobně té na měření baterie. Tyto funkce jsou navrženy tak, že musejí být volány na střídavě. Je to dáno tím že na konci každé z funkcí dochází k přepnutí detekčních obvodů pro druhou osu, protože po přepnutí je zapotřebí čas na ustálení obvodů. To také vyžaduje aby mezi měřeními byly časové intervaly. Pokud použijeme univerzální funkci:

```
void ADC_Dotyk(void)
```

nemusíme se tímto zabývat, ochranný časový interval je v ní již zabudován Naměřené hodnoty jsou zase empiricky upravovány konstantami, které zaručí rozsah dotyku souhlasící s zobrazovací plochou.

### 5.4.3 Funkce vzorkování naměřeného signálu

Při návrhu této funkce bylo opět využito výhod logického analyzátoru pro odladění přesného kmitočtu vzorkování. Přesnost frekvence vzorkování udává správnost následných naměřených hodnot ta proto je nutné tomu věnovat pozornost. Vhodné je též použít generátor signálu pro ověření těchto hodnot.

Součástí této funkce je také vyslání impulsu vysílací cívkou. Zavoláním této funkce se tedy provede celý proces měření. Velikost vysílacího impulsu a periodičita měření je zajištěna použitím čítače. Ten byl nastaven při nastavování displejových čítačů. Tato funkce:

```
void ADC_sequence(void)
```

používá globální proměnnou která udává velikost proudu budící cívkou. Poté co je impuls vypnut, začne vzorkovací cyklus, který změří 256 vzorků kmitočtem 500 kHz.

## 5.5 Flash paměť

Detektor je vybaven 16 MB externí flash paměti, která slouží pro uchování naměřených dat i po vypnutí přístroje. Pro obsluhu paměti je zapotřebí 3 funkcí. Čtení, zápis a mazání sektoru, protože po zapsání hodnoty je jediná možnost dalšího zápisu vymazání celého sektoru. Hlavní jsou funkce

```
void FLASH_WRITE(uint32_t adresa, uint8_t data)
uint8_t FLASH_READ(uint32_t adresa)
```

Průběhy těchto funkcí jsou odladěny pomocí logického analyzátoru. Ideální průběhy jsou uvedeny v datasheetu výrobce paměti. Obě funkce jsou uvedeny v příloze 3.

## 5.6 Menu a systém

Pro práci s přístrojem byl navržen primitivní software skládající se z několika obrazovek menu vybavených tlačítky.

Každá obrazovka menu vyjma hlavní, je tvořena podmíněně nekonečnou smyčkou. Při každém průchodu smyčkou je nutno změřit polohu dotyku a poté zkontrolovat zdali nedošlo ke stisknutí tlačítka. Podmínkou pro návrat do předchozího menu je tlačítko pro návrat. Hlavní menu, jako jediné, je tvořeno nekonečnou smyčkou, kterou program nikdy neopustí.

## 5.7 DFT

Pro analyzování vzorků je možno použít zjednodušené DFT. Tato metoda nám umožní zobrazit diskrétní spektrum signálu.

Zjednodušení je možné díky tomu že měřený signál má pouze reálné vzorky a tudíž není nutné počítat s imaginárními daty. Dále není zapotřebí fázové spektrum ale pouze amplitudové spektrum. Další zjednodušením je to že dochází k výpočtu pouze poloviny spektra, protože druhá polovina je zrcadlově shodná s první.

Tyto zjednodušení umožňují relativně rychlý výpočet DFT a jeho možné použití. Funkce pro výpočet obsahuje 2 vnořené smyčky. Vnější má 128 opakování a při každém průběhu je sečteno 256 hodnot pro výpočet DFT. Tato funkce je uvedena v příloze 3.

```
void DFT(void)
```



## 6 Návod k obsluze a měření

V této kapitole nalezneme stručný popis obsluhy a používání přístroje. Také zde nalezneme popis principu činnosti přístroje a měření kovů.

### 6.1 Popis zařízení

Zařízení lze po mechanické stránce rozdělit na dvě části. Cívkovou část v kulatém pouzdře, která obsahuje detekční cívky, a přístrojovou část v hranaté krabičce, která obsahuje elektronické obvody, konektory, ovládací prvky a baterii.

### 6.2 Konektory a jejich účel

Napájecí konektor se nachází na straně zařízení směrem k uživateli (horizontální umístění) nebo směrem dolů (vertikální umístění). Slouží k připojení napájecího adaptéru, kterým se musí nabíjet baterie. Je to standardizovaný kulatý konektor, s kladnou vnitřní elektrodou. Napětí adaptéru by mělo být 15 - 19V a proud alespoň 1A.

Na levém boku přístroje nalezneme USB port. Slouží pro připojení k PC. Podporovány jsou verze USB 2.0 ale i starší 1.1. Tento port neslouží k programování zařízení, slouží pouze pro přenos dat do PC.

Pro změnu programu zařízení je nutno se připojit k internímu JTAG konektoru.

### 6.3 Zapnutí a vypnutí přístroje

Zapnutí přístroje se provádí vypínačem umístěným na horní straně zařízení, vlevo nahoře vedle displeje. Po zapnutí přístroje dojde k rozsvícení displeje. Pokud displej bliká nebo nezobrazuje správně, s největší pravděpodobností je to způsobeno vybitou baterií, a je nutno přístroj připojit na nabíječku.

Po zapnutí přístroje se na obrazovce objeví úvodní logo, zobrazené na obrázku 55.



Obr. 55 Úvodní obrazovka

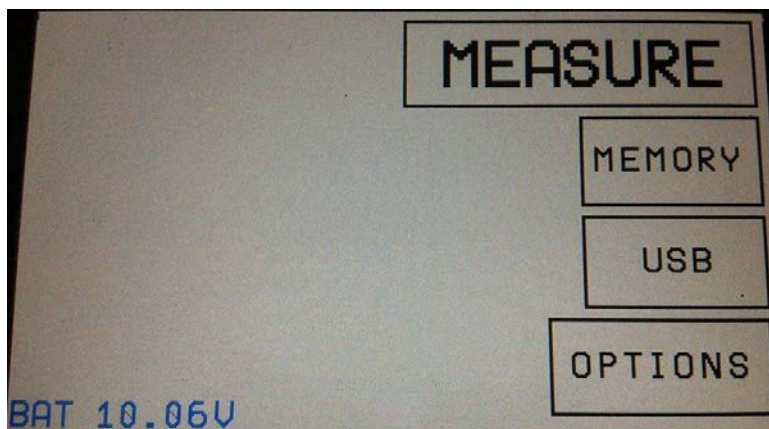
Po chvíli se zobrazí hlavní menu. Vypnutí přístroje je možno v kterýkoli moment běhu programu, všechna data neuložená v paměti FLASH však budou ztracena.

## 6.4 Hlavní menu a uživatelské prostředí

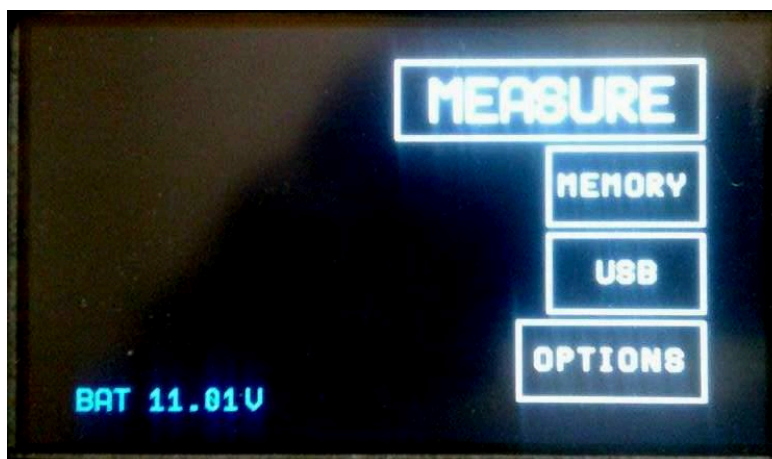
Práce s přístroje je velice individuální. Všechny ovládací prvky jsou soustředěny na dotykový displej. Pro opakované stisknutí jednoho tlačítka je nutné jej nejprve uvolnit, protože obsahují ochranu před násobným stiskem. Též není podporován vícenásobný dotek. Při stisku více bodů bude ve skutečnosti změřený dotyk mezi stisknutými body v závislosti na síle stisku. Pozice, velikost tvar a barva tlačítek jsou závislé na verzi programu a může být v dalších verzích programu jiná.

V levé dolní části obrazovky nalezneme údaje o napětí baterie. Zařízení pracuje spolehlivě, jeli napětí vyšší nežli 7V. V levém horním rohu se nachází tlačítka OPTIONS, které obsahuje menu pro nastavení uživatelského rozraní (např. přepínání mezi světlou a tmavou verzí menu. Dalším tlačítkem je MEASURE, které slouží pro přechod na obrazovku měření. Dalšími tlačítky jsou MEMORY, které otevírá menu paměti flash a USB, pro přenos dat do PC.

Další stránky menu obsahují podobné tlačítka, stejné je tlačítka RETURN pro návrat do předchozího menu.



Obr. 56 Hlavní menu - světlé



Obr. 57 Hlavní menu - tmavé

## 6.5 MEMORY a USB menu.

V menu MEMORY nalezneme informace o využití flash paměti. Zápis do paměti se provádí při měření na pokyn uživatele. Vymazání paměti se provádí v menu OPTIONS.

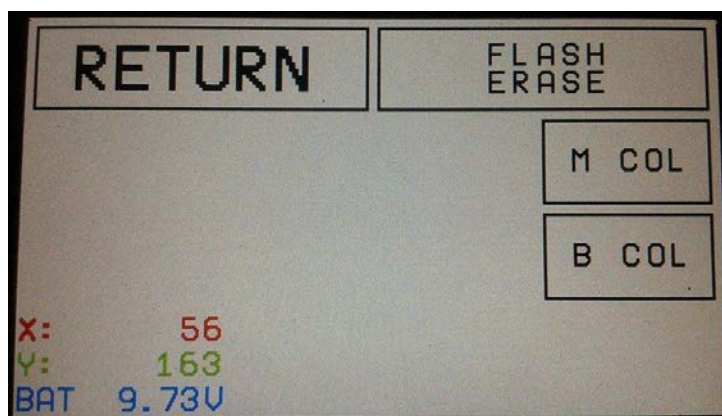
V menu USB nejsou tlačítka dokud nedojde k propojení k PC. Po připojení k PC se zobrazí tlačítka odeslat data. Odesílání nějaký čas trvá a může při něm dojít k chybám zobrazování displeje, které ale hned po skončení zmizí.

## 6.6 OPTIONS menu

Menu OPTIONS slouží k nastavení barev zobrazení, mazání flash paměti a další nastavení. Při mazání flash paměti, pomocí tlačítka FLASH ERASE, je nutno volbu potvrdit na potvrzující obrazovce.

K nastavení barev slouží tlačítka M COL, pro barvu textu a objektů a B COL, pro barvu pozadí. Po jejich stisknutí dojde k zobrazení barevné nabídky, ze které lze vybrat barvu a poté potvrdit stisknutím. Nedoporučuje se použití barev červená, modrá a zelená protože jsou využity k zobrazení dat a textů jako napětí baterie.

V tomto menu jsou zobrazeny též hodnoty dotyků.



Obr. 58 OPTIONS menu

## 6.7 MEASURE menu a princip měření

Toto menu slouží k samotnému detekování kovů.

### 6.7.1 Ovládací prvky

Přístroj disponuje zesilovačem s proměnným zesílením, které je možné podle potřeby měnit. Také je možné nastavovat velikost budícího proudu vysílací cívky.

Menu obsahuje barevný přepínač sloužící pro přepínání mezi nastavováním proudu budící cívkou (červeně) nebo zesílením PGA (zeleně). Dále je zde tlačítka CAL, jehož činnost bude popsána v dalších kapitolách a tlačítka SAVE jehož stisknutí uloží právě naměřené vzorky do paměti flash.

### 6.7.2 Vzorkování detekčního signálu

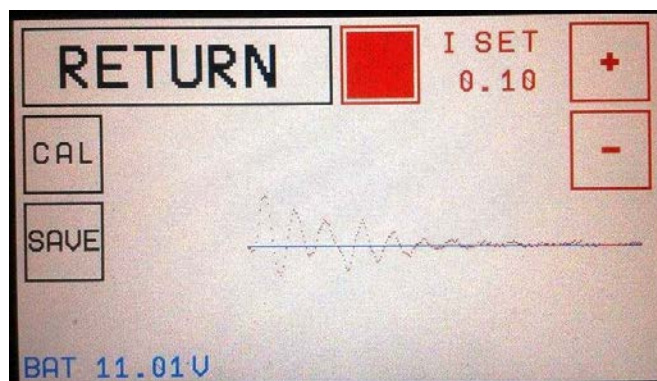
Dále je v tomto menu probíhá samotné měření. Podle nastaveného proudu je vypočtena doba sepnutí vysílací cívky. Poté dojde k sepnutí vysílací cívky na přesně definovaný čas. Po vypnutí budící cívky začne vzorkování signálu z přijímací cívky, zesíleného programovatelným zesilovačem, vzorkovací frekvencí 500 kHz. Takto je navzorkováno 256 vzorků. Velikost budícího impulsu je počítána pomocí vzorce 30.

### 6.7.3 Kalibrace

Naměřená data obsahují parazitní signály, které jsou dány tvarem a nedokonalostmi cívek, zesilovačů a celkově elektroniky. Pro tyto účely je zde tlačítka CAL, po jehož stisku dojde k uložení aktuálních naměřených hodnot do referenčních hodnot, které jsou od následně měřeného signálu odečteny. Tuto kalibraci lze kdykoli opakovat. Je vhodné jí provádět v nepřítomnosti kovových předmětů v okolí cívky, jinak bude měření zatíženo hrubou chybou. Při změně parametrů proudu nebo zesilovačů dojde k vynulování kalibračních hodnot a je nutno znovu provést kalibraci. Tato kalibrace probíhá pouze softwarově a tudíž je limitována rozsahem A/D převodníku.

#### 6.7.4 Zobrazení dat

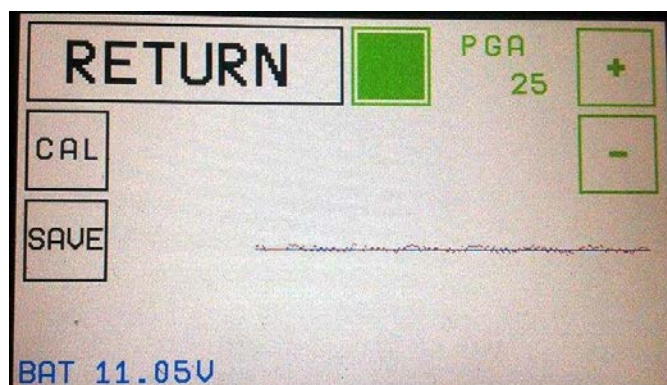
Na displeji jsou naměřené vzorky zobrazovány, obdobně jako na osciloskopu. Signál je zobrazen s pomocnou úrovní značící stejnosměrnou složku signálu. Stisknutím SAVE budou právě naměřená data uložena do paměti flash.



Obr. 59 Měření signálu - po zapnutí

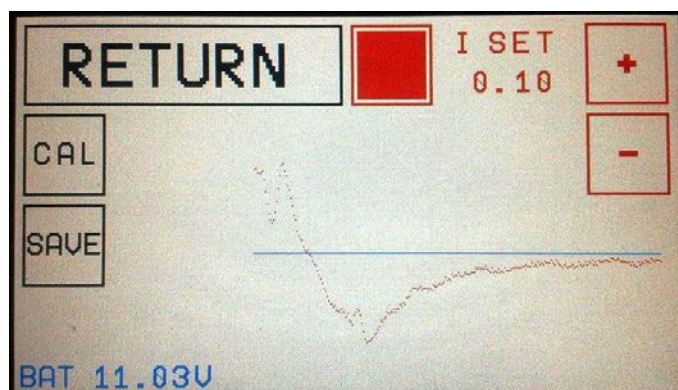
Na obrázku 59 vidíme naměřené hodnoty bez kalibrace po zapnutí bez přítomnosti kovu. Tvar tohoto signálu je závislý na hodnotě budícího proudu. Tato hodnota se nastavuje červenými ovládacími prvky, načez vybarvené tlačítko přepíná mezi nastavením proudu budící cívky a zesílením měřícího zesilovače.

Tento signál je dán přítomností zařízení v poli cívky a nedokonalostí měřící cívky. Po stisknutí tlačítka CAL dojde k vykompenzování tohoto signálu, jak lze vidět na obrázku 60. Také je zde vidět nastavení zesílení měřících obvodů.



Obr. 60 Měření signálu - po kalibraci

Po správné kalibraci můžeme jednoduše detekovat přítomnost vodivých předmětů. Na obrázku 61 vidíme vybuzení způsobené přítomností oceli. Nastavení proudu i zesílení bylo pro všechny 3 situace stejné.



Obr. 61 Měření signálu - přítomnost oceli

## 7 Závěr

Po zkušenostech s první verzí zařízení, byla druhá verze navržena s důrazem na zjednodušení zapojení a zvýšení kvality zobrazení a výpočtu detekovaných hodnot. Toho se dosáhne pomocí výkonnějšího mikrokontroléru ATSAM4E16E-AU. Rovněž byly odstraněny nedostatky první verze, které si vyžádali přídavné obvody pro nápravu. Podle návrhu byla navržena deska plošných spojů, osazena a oživena. Poté byl vytvořen program, který dokáže spolehlivě obsluhovat dotykový RGB displej v rozlišení 420x238 pixelů při 256 barvách. Přístroj dokáže vysílat budící impulsy v závislosti na aktuálních parametrech přístroje. Naměřená data je možné ukládat v paměti přístroje nebo je zpracovat pomocí DFT. Přístroj nadále odhaduje hustotu železa pod ním. Vhodným vylepšením by bylo použití rychlejšího MCU s větší SRAM pamětí, který je nyní dostupný.

## Seznam literatury

- [1] HÁJEK, Jan. *Elektronické hledače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 103 s. ISBN 80-730-0011-3.
- [2] HÁJEK, Jan a Zdeněk JARCHOVSKÝ. *Detektory kovu - návod na stavbu, princip zapojení a praktické návody na tři konstrukce*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 250 s. ISBN 978-80-7300-220-6.
- [3] JARCHOVSKÝ, Z. a P. SOCHÁŇ. Soustava cívek s nulovou vzájemnou indukčností pro detektory kovů [patent]. Česká republika.
- [4] 32-bit Atmel ARM-based Flash MCU. ATMEL CORPORATION. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-11157-32-bit-Cortex-M4-Microcontroller-SAM4E16-SAM4E8\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-11157-32-bit-Cortex-M4-Microcontroller-SAM4E16-SAM4E8_Datasheet.pdf)
- [5] LT3652HV - Power Tracking 2A Charger. LINEAR TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1692510.pdf>
- [6] Power Converter High Efficiency 1A Step-Down Voltage Regulator. NATIONAL SEMICONDUCTOR. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/51323.pdf>
- [7] LT1767 - Monolithic 1.5A, 1.25MHz Step-Down Switching Regulators. LINEAR TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1864558.pdf>
- [8] LT1931 - 1.2MHz/2.2MHz Inverting DC/DC Converters in ThinSOT. LINEAR TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1642064.pdf>
- [9] MC34063 - DC/DC converter control circuits. STelectronics. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1723944.pdf>
- [10] Yuasa NPO0.8-12 - DCNP-Series - Valve Regulated Lead Acid Battery. Yuasa. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1637393.pdf>
- [11] Kentec K430WQA-V4-F - Standart LCD module 480x272. Kentec. [online]. [cit. 2015-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1563930.pdf>

# 8 Seznam zkratek, symbolů a příloh

## 8.1 Seznam zkratek

ADC	=	Analog/Digital převodník
AGND	=	Analogová zem
EM	=	Elektromagnetická(ý)
ESR	=	Ekvivalentní sériový odpor
GND	=	Digitální zem
MCU	=	Mikrokontrolér
PLL	=	Fázový závěs
RGB	=	Červená, Modrá a Zelená
USB	=	Univerzální sériová sběrnice

## 8.2 Seznam symbolů

U	=	elektrické napětí
I	=	elektrická proud
R	=	elektrický odpor
C	=	kapacita
L	=	indukčnost
t	=	čas
T	=	perioda
E	=	elektrická intenzita pole
H	=	magnetická intenzita pole
$\mu$	=	permeabilita
$\varepsilon$	=	permitivita
$\gamma$	=	vodivost prostředí
$\omega$	=	úhlový kmitočet
$\phi$	=	indukční tok
B	=	magnetická indukce
d	=	průměr
S	=	plocha
r	=	poloměr, vzdálenost
$\ell$	=	délka
N	=	počet závitů

## 8.3 Seznam příloh

Příloha 1	=	Celkové schéma obvodu, velikost A3.
Příloha 2	=	Seznam použitých součástek, velikost A4 - 4 listy.
Příloha 3	=	Ukázkový zdrojový kód, velikost A4 - 19 listů.