

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Detektor kovů s digitálním vyhodnocením

Adam Bartoš

Bakalářská práce

2025

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Adam Bartoš**
Osobní číslo: **I22051**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Detektor kovů s digitálním vyhodnocením**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a rádiových systémů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh detektoru kovů s digitálním zpracováním signálu. Teoretická část popíše dostupné principy detekce kovů, od rozvážení oscilátorů, přes pulzní, indukčně balanční až po případné využití radarů. U každého bude popsán princip detekce, možnost diskriminace, teoretický princip detekce a identifikace. Praktická část práce pak provede návrh a konstrukci modelu detektoru kovů na zvoleném principu. Zpracování bude co nejvíce probíhat digitálně. Hardware i software budou podrobně popsány v práci.

Rozsah pracovní zprávy: **30-50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8
- [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsival**
Katedra elektroniky a rádiových systémů

Datum zadání bakalářské práce: **6. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem Detektor kovů s digitálním vyhodnocením jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 13. 5. 2025

Adam Bartoš

Poděkování

V této části chci poděkovat mému vedoucímu práce, Ing. Pavlu Rozsivalovi, za užitečné rady, ochotu a připomínky k dané bakalářské práci. Poté bych chtěl poděkovat svým rodičům za velkou podporu při celé délce studia a zejména mé přítelkyni za psychickou podporu během studia.

Anotace

Teoretická část práce se zabývá základními principy detekce kovů, možnostmi diskriminace, jejich principy fungování a popisuje výhody a nevýhody jednotlivých typů. V praktické části práce je pak detailně popsán vybraný typ detektoru, návrh jeho konstrukce, analogové a digitální části detektoru. Dále je v práci popsán návrh desky a programování pro daný detektor. Na závěr byl změřen dosah vyrobeného zařízení s různou velikostí hledaného objektu.

Klíčová slova

detekce, mikroprocesor, vířivé proudy, kov, materiál, signál

Title

Metal detector with digital evaluation

Annotation

The theoretical part of the thesis deals with the basic principles of metal detection, the possibilities of discrimination, their principle of operation and describes the advantages and disadvantages of each type. The practical part of the thesis describes in detail the selected type of detector, its design, analogue and digital parts of the detector. Furthermore, the design of the board and programming for the detector is described. Finally, the range of the fabricated device was measured with different size of the search object.

Keywords

detection, microprocessor, eddy currents, metal, material, signal

Obsah

Seznam zkratek.....	8
Seznam obrázků.....	8
Úvod.....	9
1 Princip detektorů kovu	10
1.1 Vířivé proudy.....	11
1.2 Dosah detektorů kovu.....	13
1.3 Diskriminace.....	14
1.4 Pasivní detektory kovu	16
1.5 Aktivní detektory kovů.....	16
1.5.1 Kmitočtové detektory kovu	16
1.5.2 Impulzní detektory kovu.....	18
1.6 Radarové detektory kovu.....	20
1.7 Pulzně indukční detektor	21
2 Cívky detektorů	22
2.1 Vlastnosti.....	23
2.2 Cívka, její magnetické pole a indukce.....	23
3 Návrh detektoru.....	24
3.1 Napájení.....	24
3.2 Cívka detektoru	25
3.3 Mikrokontroler	27
3.4 Napájení ESP.....	29
3.5 Vyhodnocování signálu	30
3.6 Schéma obvodu	30
3.6.1 Cívka a spínací obvod	32
3.6.2 Detekce indukovaného napětí.....	32
3.6.3 Řídící jednotka a dodatečné periferie	33
3.6.4 Shrnutí funkce	34
3.7 Návrh PCB.....	34
3.8 Zdrojový kód	37
Závěr.....	40
Literatura	41

Příloha A – Zdrojový kód	44
---------------------------------------	-----------

Seznam zkratk

ADC	Analog to digital convertor
AGM	Absorbent Glass Mat
ID	Identifikační číslo
PWM	Pulse Width Modulation
TZV	Takzvaně

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Vířivé proudy a jejich magnetické pole (2)	11
Obrázek 2 – Kužel citlivosti (2)	14
Obrázek 3 - Uspořádání cívek u balančních detektorů(1)	17
Obrázek 4 – Zjednodušené blokové schéma balančního detektoru(2)	18
Obrázek 5 – Blokové schéma impulzního detektoru s jednou cívkou(2).....	19
Obrázek 6 – Jednoduché blokové schéma pulzního radarového detektoru(8)	21
Obrázek 7 – Graf vyhodnocování PI detektorů (14)	22
Obrázek 8 – Náhradní zapojení cívky (obrázek: vlastní)	23
Obrázek 9 – AGM Baterie(16)	25
Obrázek 10 – Nárýs úchytů cívky (foto vlastní).....	26
Obrázek 11 – Deska na vinutí cívky (foto vlastní).....	26
Obrázek 12 – Hotová cívka na držáku (foto vlastní).....	27
Obrázek 13 – ESP32-DevKitC(22)	28
Obrázek 14 - Zapojení měniče na 5V (24)	29
Obrázek 15 – Výchozí schéma zapojení (25).....	30
Obrázek 17 – Schéma finálního detektoru (foto vlastní).....	31
Obrázek 16– Přiblížení spínacího obvodu (foto vlastní)	31
Obrázek 18 – Přiblížení detekce změny napětí (foto vlastní).....	32
Obrázek 19 – ESP32 a dodatečné periferie (foto vlastní)	33
Obrázek 20 – LCD Displej (foto vlastní)	33
Obrázek 21 – Modul s enkodérem (foto vlastní).....	34
Obrázek 22 – PCB návrh v programu EAGLE (foto vlastní).....	35
Obrázek 23 – Vyrobena PCB podle návrhu (foto vlastní).....	36
Obrázek 24 - Osazená deska (foto vlastní)	36
Obrázek 25 - USB kabel k programování (foto vlastní).....	37
Obrázek 26 - Průběh pulzu před komparátorem (foto vlastní).....	38
Obrázek 27 - Hotový detektor (foto vlastní)	39

Úvod

Detekce kovů je v dnešní době nejen hobby pro amatérské hledače, ale také činností zasahující do mnoha odvětví různých oborů. Vyžíváme je například pro zvýšené bezpečí na letištích a významných budovách, jako jsou třeba soudy, za pomoci bezpečnostních rámmů. Dále se využívají při třídění recyklovaných materiálů, na kontrolu kvality a bezpečnosti potravin a mnohé další. Velký obor, využívající detekci kovů, je také armáda. A to zejména při čištění území od nevybuchlé munice či min. To se provádí nejčastěji za pomoci ručních detektorů, nebo také za využití detektorů nainstalovaných na vozidlech. Tato bakalářská práce je však zaměřena právě na amatérské hledání kovů pod povrchem.

Kvůli malému množství informací a zejména nepřesným definicím výrazů o základních principech funkce detektorů jsou v teoretické části této práce zjednodušeně shrnuty informace o základních funkcích a fyzikálních principech fungování detektorů. Hlavní částí jsou vířivé proudy, na kterých je založena většina těchto detektorů, a zároveň jsou popsány výhody, nevýhody a omezení plynoucí z těchto principů. V další části jsou popsány základní bloková zapojení nejčastějších podpovrchových typů detektorů.

Praktická část práce se věnuje nejprve návrhu, tvorbě a programování jednoduchého pulzně indukčního detektoru, který využívá výkonného ESP32 se dvěma jádry Tensilica LX6. V práci je také kladen důraz na popsání výroby cívky k takovému detektoru a celkově jeho konstrukční zhotovení. Dále je práce zaměřená na návrh a osazení desky a výběr důležitých komponentů s hlavním důrazem na cenu, která je u samovýroby často hlavním parametrem. Popis zdrojového kódu je také nedílnou součástí. Ke konci práce je jako výsledek uvedené měření dosahu vyrobeného detektoru na různě velkých předmětech skládajících se z vícero kovů.

1 Princip detektorů kovu

Téměř všechny dnešní detektory kovů využívají magnetické pole. Toto pole působí silou na všechny částice, které jsou elektricky nabitě a oproti tomuto poli se pohybují. To lze snadno popsat základními veličinami, a to magnetickou indukci, magnetickým indukčním tokem a intenzitou magnetického pole (1). Základem pro podpovrchové detektory kovů je elektromagnetická indukce. Ta vysvětluje, jak změny magnetického pole generují elektrické napětí a proud ve vodiči a objevil ji Michael Faraday v roce 1831(1).

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

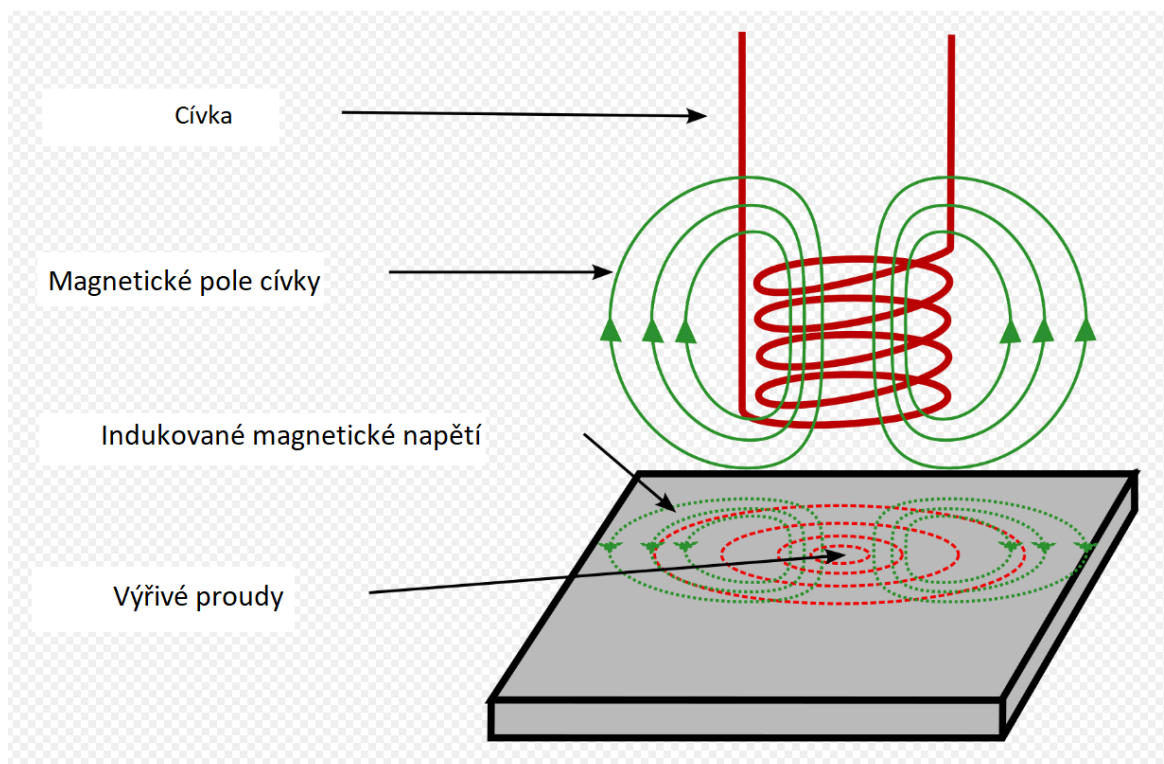
Kde U_i – indukované napětí [V]

Φ – magnetický indukční tok [Wb]

T – čas [s]

Z tohoto vztahu je jasné, že když se v magnetickém poli bude v čase měnit magnetický indukční tok, bude se ve vodivém materiálu v tomto poli indukovat elektrické napětí. Změnu indukčního toku lze docílit změnou veličin uvedených v onom vztahu nebo také změnou plochy kterou tato magnetická indukce prochází. Však u detektorů se dá měnit pouze právě magnetická indukce, protože plochu předmětu pod povrchem neovlivníme (1).

Pro tvorbu proměnného magnetického pole se u detektorů používá cívek. Těmi prochází střídavý elektrický proud. Ve chvíli, kdy se při samotném hledání dostane daný předmět do našeho magnetického pole začne se v něm indukovat napětí. To pak kvůli obvyklé ploše těchto předmětů začne vyvolávat střídavé proudy v uzavřených smyčkách. Těmto proudům se říká vířivé proudy, jak je vidět na obrázku 1.



Obrázek 1 – Vířivé proudy a jejich magnetické pole (2)

Pokud se do magnetického pole budící cívky detektoru dostane vodič, začnou se generovat vířivé proudy, jejich magnetické pole má směr opačný než pole budící, a to ono pole oslabí. To zmenší indukované napětí na cívce a zmenší se její impedance (1).

1.1 Vířivé proudy

Vířivé proudy jsou fascinujícím fyzikálním jevem, který nachází praktické využití v řadě moderních technologií – od bezkontaktního ohřevu kovů až po pokročilé nedestruktivní testování materiálů. Významnou oblastí, kde se s vířivými proudy běžně setkáváme, je konstrukce a funkce detektorů kovů. Tyto přístroje se hojně využívají nejen v bezpečnostních složkách, ale i v archeologii, průmyslu nebo hobby činnostech. Pochopení principu vířivých proudů je klíčové pro správné porozumění fungování těchto zařízení. (3)(4)(5)(6)(7)

Vířivé proudy (angl. *eddy currents*) jsou elektrické proudy, které vznikají ve vodivém materiálu v důsledku změny magnetického pole. Když se vodivý materiál nachází v proměnlivém magnetickém poli, podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce dochází k indukci elektrického proudu. Na rozdíl od klasického proudu vedeného vodičem se tyto proudy šíří vírovitě v rovině kolmých na směr magnetického pole a proudí v uzavřených kruhových smyčkách. Právě proto se jim říká vířivé proudy. (3)(4)(5)(6)(7)

Velikost vířivých proudů závisí na několika faktorech: rychlosti změny magnetického pole (frekvenci), elektrické vodivosti a tvaru materiálu. Vyšší frekvence a lepší vodivost obecně

vedou k silnějším vířivým proudům. Tyto proudy vytvářejí vlastní magnetické pole, které je podle Lenzova zákona orientováno tak, aby bránilo změně původního magnetického pole – čímž vzniká odpor vůči pohybu. (3)(4)(5)(6)(7)

Ačkoliv vířivé proudy často představují nežádoucí ztráty například u transformátorů nebo motorů (kde dochází ke ztrátám energie ve formě tepla), našly i řadu praktických využití. Patří mezi ně:

- **Bezkontaktní ohřev (indukční ohřev):** Vířivé proudy generují teplo v kovových předmětech a používají se například v kuchyňských indukčních varných deskách nebo při ohřevu materiálů ve strojírenství.
- **Brzdné systémy (vířivé brzdy):** Používají se například v moderních vlacích nebo fitness strojích.
- **Nedestruktivní testování materiálů:** Pomocí vířivých proudů lze detekovat trhliny nebo vady v kovových konstrukcích.
- **Detektory kovů:** Přístroje využívající vířivé proudy pro detekci kovových objektů pod povrchem půdy nebo jiných materiálů.

Detektory kovů jsou zařízení, jejichž účelem je detekovat přítomnost kovových objektů v okolí. Většina moderních detektorů funguje právě na principu elektromagnetické indukce a vířivých proudů. (3)(4)(5)(6)(7)

Základní konstrukce detektoru kovu zahrnuje cívku (nebo více cívek), která vytváří proměnlivé elektromagnetické pole. Když je přístroj v provozu a cívka se přibližuje k vodivému materiálu (například minci nebo kovové trubce v zemi), toto proměnlivé pole v něm indukuje vířivé proudy. Tyto proudy následně vytvářejí vlastní sekundární elektromagnetické pole. (3)(4)(5)(6)(7)

Detektor má zároveň přijímací cívku nebo obvod, který detekuje změny v tomto elektromagnetickém poli. Rozdíl mezi původním a ovlivněným polem je zpracován elektronikou a vyhodnocen – což může vést k aktivaci zvukového signálu, světelné indikace nebo jiného typu výstrahy. (3)(4)(5)(6)(7)

Existuje několik typů detektorů kovů, které využívají různé principy, všechny však souvisejí s vířivými proudy,

Výhody:

- Bezkontaktní detekce.
- Možnost rozpoznání rozdílů mezi kovy (např. železo vs. měď).
- Schopnost pracovat ve vlhkém nebo znečištěném prostředí.

Nevýhody:

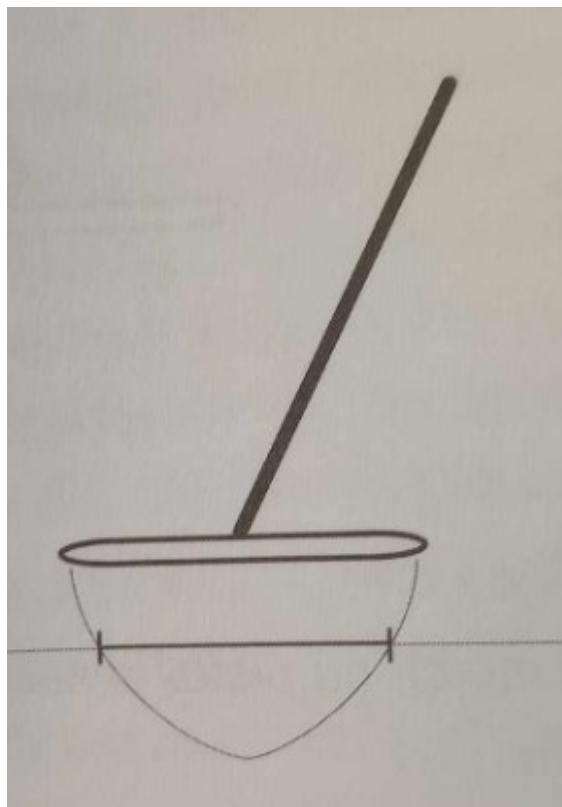
- Omezená hloubka detekce (zejména u malých předmětů).
- Citlivost na minerály v půdě, které mohou způsobit falešné signály.
- Vyšší cena u pokročilejších modelů.

Vířivé proudy jsou příkladem toho, jak může být čistě fyzikální jev využit v praktických a užitečných technologiích. Jejich schopnost interagovat s kovovými předměty bez přímého kontaktu z nich činí ideální nástroj pro detekci kovů pod povrchem. Ať už se jedná o hledače pokladů v lese, bezpečnostní kontrolu na letišti, nebo technika testující potrubí, vířivé proudy hrají klíčovou roli ve funkci detektorů kovů. Tento jev je zároveň krásným příkladem aplikace elektromagnetismu v každodenním životě. (3)(4)(5)(6)(7)

1.2 Dosah detektorů kovu

Dosah detektorů je otázka, která zajímá snad každého, kdo přemýšlí o výrobě či koupi detektoru. Bohužel neexistuje univerzální definice, která by udávala hloubkový dosah. Definice za ideálních podmínek (tedy ve vzduchu) se velmi liší od skutečného dosahu v různé půdě. Obecně lze říct, že dosah je nepřímo úměrný na kmitočku budicí cívky, tedy čím vyšší je frekvence, tím menší je dosah. Obecně řečeno, pro aktivní detektory kovu platí, že dosah se odvíjí od průměru cívky za podmínky, že hledaný objekt má velikost poloviny průměru cívky(2)

Pro znázornění dosahu cívky se často používá takzvaný kužel citlivosti pod cívkou, jak lze vidět na obrázku.



Obrázek 2 – Kužel citlivosti (2)

1.3 Diskriminace

“ Diskriminace je schopnost detektorů kovu rozlišovat, popřípadě potlačovat jednotlivé cíle detektoru na základě tzv. opsané plochy a elektrické vodivosti kovu, z kterého je cíl vyroben. “
(8)

Diskriminace pracuje na základě rozdílů v elektrických a magnetických vlastnostech různých kovů, konkrétně na jejich vodivosti a permeabilitě. Když cívka detektoru vyše elektromagnetický signál a ten se odrazí od kovového předmětu, změní se tvar a časový průběh signálu v závislosti na typu kovu. Elektronika detektoru následně analyzuje tyto parametry a zařadí objekt do určité kategorie.(4)(6)(9)(10)

V praxi to znamená, že detektor při zjištění „nežádoucího“ kovu (např. železo) uživatele neupozorní – signál je potlačen nebo zcela ignorován. Tato funkce výrazně zvyšuje efektivitu hledání a šetří čas, zejména v oblastech s velkým výskytem kovového odpadu.
(4)(6)(9)(10)

Existuje několik způsobů, jakým může být diskriminace realizována. Mezi hlavní typy patří:

1. Statická diskriminace

Tato forma je založena na nastavené prahové hodnotě vodivosti. Detektor vydá signál pouze tehdy, pokud nalezený kov překročí tuto hodnotu. Tento způsob diskriminace je jednoduchý a rychlý, ale méně přesný. Je běžný u základních modelů detektorů. (4)(6)(9)(10)

2. Dynamická diskriminace (multi-tone)

Pokročilejší detektory využívají více frekvencí a tónů. Různé kovy vytvářejí různé akustické odezvy (například nízký tón pro železo, vysoký tón pro měď). Uživatel tak může intuitivně poznat, jaký kov se nachází pod povrchem. Tento systém je vhodný zejména pro zkušenější uživatele. (4)(6)(9)(10)

3. Digitální identifikace kovu (Target ID)

Moderní detektory často využívají číselnou stupnici, tzv. Target ID (např. 0–99), která odpovídá typu kovu. Například železo má hodnoty mezi 0–20, zlato kolem 40–60 a stříbro až 90+. Tento systém umožňuje přesnější rozhodování a často bývá doplněn grafickým displejem. (4)(6)(9)(10)

Výhody:

- **Úspora času:** Uživateli odpadá nutnost kopat nežádoucí předměty (například rezavé hřebíky).
- **Vyšší efektivita:** Lepší zaměření na konkrétní typy kovů (například šperky, mince).
- **Možnost přizpůsobení:** Uživatel si může diskriminaci nastavit podle podmínek terénu.

Omezení:

- **Chybná identifikace:** Malé nebo hluboko uložené předměty mohou být nesprávně vyhodnoceny.
- **Ztráta citlivosti:** Silná diskriminace může vést k přehlédnutí některých cenných předmětů (například drobné zlaté šperky).
- **Mineralizace půdy:** Vysoce mineralizovaná půda může ovlivnit přesnost diskriminace.

Nastavení diskriminace se liší podle typu detektoru. Základní modely mají otočný knoflík nebo jednoduché tlačítko, zatímco pokročilé přístroje nabízejí programovatelná pole, více úrovní diskriminace a možnost manuálního či automatického ladění. Dobrý kompromis mezi citlivostí a selektivitou často vyžaduje praktické zkušenosti a testování v reálném terénu. (4)(6)(9)(10)

Například při hledání na poli s vysokým výskytem železného odpadu je výhodné nastavit vyšší úroveň diskriminace a ignorovat kovy s nízkou vodivostí. Naopak při hledání v lese, kde může být pod vrstvou listí ukrytý historický artefakt, je vhodné detekovat i méně vodivé objekty. V některých případech (například archeologické výzkumy) je diskriminace zcela vypnuta, aby byl nalezen každý objekt bez ohledu na typ materiálu. (4)(6)(9)(10)

Diskriminace je jednou z nejdůležitějších funkcí moderních detektorů kovů. Umožňuje efektivní třídění detekovaných předmětů a zaměření na cílové kovy, čímž výrazně zvyšuje šanci na úspěšný nález. Správné pochopení principu a nastavení diskriminace je klíčové pro každého uživatele, ať už amatéra, nebo profesionála. Přesto je třeba počítat s určitými limity, a proto je vhodné s detektorem získat praktické zkušenosti a jeho nastavení přizpůsobit konkrétním podmínkám terénu. (4)(6)(9)(10)

1.4 Pasivní detektory kovu

Pasivní detektory nevysílají žádnou energii, ale jenom snímají magnetické pole nebo změny v něm. Takové přístroje jsou například magnetometry. Ty měří deformace magnetického pole naší Země, ty však nemusím být způsobeny pouze vodivými předměty, ale jakýmkoli nehomogenitami hledacího prostoru (2).

Funkce těchto detektorů je na bázi měření statického geomagnetického pole a jeho fluktuace. Tyto typy detektorů jsou v dnešní době nejčastěji využívány v archeologii a pyrotechnické prevenci. Hodí se také na lokalizaci velkých, hluboko ležících ocelových předmětů (2).

Lepší, nebo spíše citlivější magnetometry či gradiometry, dokážou odhalit i milíře, pradávna ohniště a hornické výpaly, protože v právě těchto místech vlivem velkého tepla ztrácejí horniny svůj přirozený magnetický moment. Díky své poměrně jednoduchosti je tato kategorie přístrojů nejrozmanitější a také nejbohatší. Takové přístroje jsou například magnetická střílka, indukční a rotační magnetometry, Hallovy sondy, tónové a optické magnetometry a nejrozšířenější jsou permaloyové a feritové magnetometry (2).

1.5 Aktivní detektory kovů

Základní předpoklad aktivního detektoru kovu je ten, že vysílá energii do prostoru. Energie interaguje s okolním prostředím a jsou měřeny změny, tyto detektory se dále dělí podle typu vysílání energie a způsobu zpracování oněch změn v prostoru.(1, 2)

1.5.1 Kmitočtové detektory kovu

Kmitočtové detektory pracují na výše zmíněném principu vířivých proudů a zhuštění magnetických siločar u feromagnetických objektů. Ony kmitočtové detektory nám dovolují určit další parametr, a to magnetickou permeabilitu, tedy dovolují nám určit, zda je těleso feromagnetické. Takové těleso se totiž projeví zvětšením indukčnosti přijímací cívky, a to již můžeme detekovat pomocí vyhodnocovací elektroniky. Avšak značnou nevýhodou kmitočtových detektorů je jejich neschopnost rozeznat velikost předmětu vlivem neměnné

frekvence. Z toho vyplývá, že při hledání například velkých těles nejde hledat tělesa malá, jelikož bychom zaznamenávali velké rušení, příkladem může být rušení samotné půdy Země.(2)

Při deformaci magnetického pole budící cívky, vlivem hledaného feromagnetického předmětu, dojde ke změně indukčnosti budící cívky, nebo změně vybalancovaných cívek v případě balančního detektoru. To je následně detekováno elektronikou přístroje, protože cívky vysílací a přijímací najednou nemají vůči sobě nulový vztah. Z toho plyne, že balanční detektory, které patří do skupiny kmitočtových detektorů, mají vždy alespoň dvě cívky. Rozložení těchto cívek jsou různá, avšak u běžných povrchových detektorů se jedná zejména o koplanární uspořádání, to znamená, že cívky se nachází v jedné rovině. Toto uspořádání lze dělit dále podle společné plochy cívek, což nám velmi ovlivňuje následné vlastnosti detektoru(1, 2).

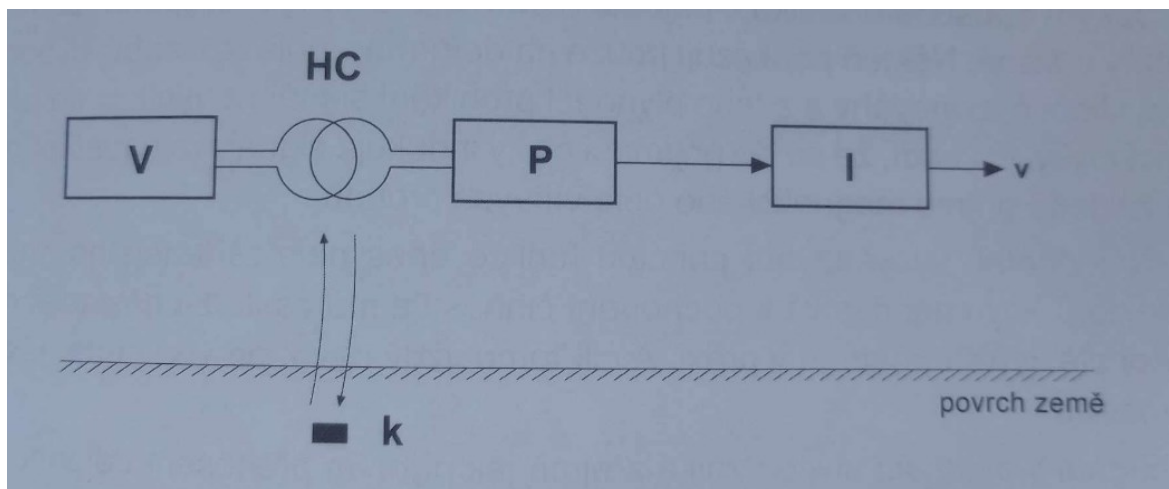


Obrázek 3 - Uspořádání cívek u balančních detektorů(1)

Pro větší dosah detektoru se volí ortogonální uspořádání, 2D uspořádání má poměrně velkou citlivost a dobrou lokalizaci objektu, kdežto 4B cívka má vlastnosti opačné(1).

U těchto jedno frekvenčních detektorů se k diskriminaci používá rozdíl ve fázovém posunu signálu mezi vysílací a přijímací cívkou(8).

Detektory toho typu tedy pracují na bázi vyvážené indukčnosti cívek. Tedy v hledací sondě jsou většinou dvě cívky uspořádány do jednoho typu z uvedených výše. Hlavní je, aby byla zachována ona nulová vazba(2).



Obrázek 4 – Zjednodušené blokové schéma balančního detektoru(2)

Na obrázku můžeme vidět zjednodušené blokové schéma, kde základním prvkem je vysílač V. Ten napájí vysílací cívku. Příjemací cívka je připojena k přijímači P, což je část vyhodnocovací elektroniky, do které patří i indikátor I. HC nám značí spojení vysílací a přijímací cívky, které jsou prostorově vyváženy. Přijímaný signál je však poměrně slabý, proto se na začátku přijímače nachází zesilovač, který nám užitečný signál nejprve zesílí před samotným zpracováním(2).

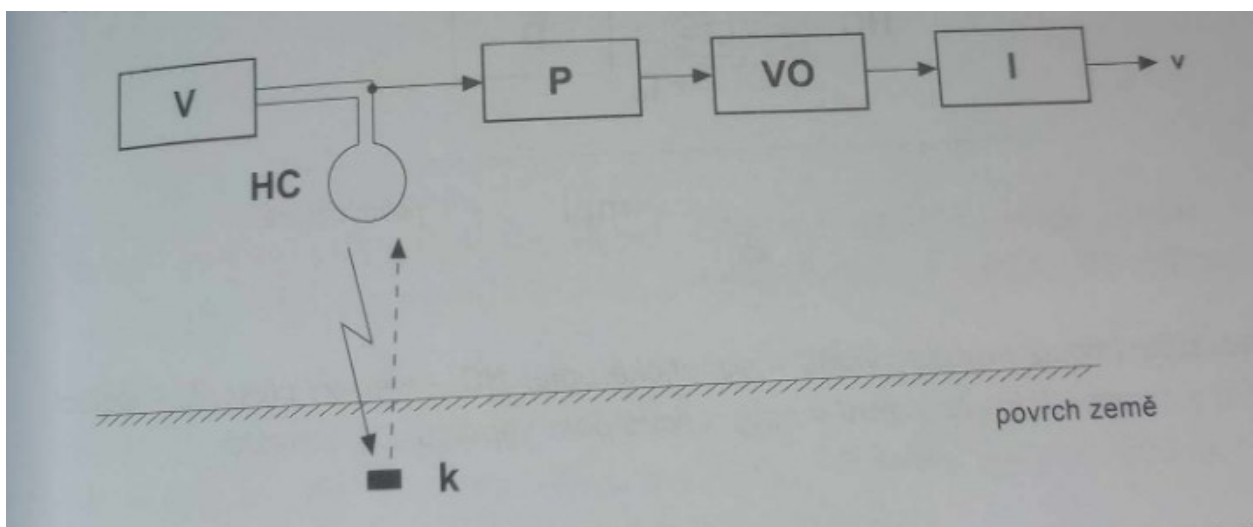
Zvolení kmitočtu budícího oscilátoru taktéž není zanedbatelné. Právě naopak, je to jeden z nejdůležitějších kroků. Šíření elektromagnetického pole, neboli emisivita, se zvětšuje s třetí mocninou frekvence. Kvůli vlastní vodivosti půdy a cíle co nejlepšího vniknutí pole do země, je vhodné volit kmitočet co nejmenší, zároveň chceme udržet kmitočet menší i kvůli permeabilitě železa, která klesá s narůstající frekvencí, tedy klesá zakřivení vysílacího pole. To nám obecně zhoršuje diskriminaci daných materiálů. Značná část těchto detektorů tedy pracuje v oblasti velmi nízkých kmitočtů. Vzhledem k velké rozmanitosti typů půd se přešlo na používání vícero frekvencí, což je ale u detektorů domácí výroby nákladné, u sériové výroby se vyrábějí detektory s rozmezím od 1,5kHz až do 100kHz. Díky oněm rozsahům se dá lépe rozlišovat objekty i v různých typech půd(2).

1.5.2 Impulzní detektory kovu

Vysílací pulzy tohoto typu detektoru generují vířivé proudy ve hledaném objektu, a ty jsou následně detekovány buď na přijímací cívce, nebo v případě pouze jedné cívky mezi pulzy. Na rozdíl od frekvenčních detektorů, které generují stále střídavé elektromagnetické pole, vysílá pulzní detektor pouze krátké pulzy energie. Díky tomu vzniká v předmětech rychlá změna magnetického pole, což má za následek generaci větších vířivých proudů. Pulzy musí

být dostatečně dlouhé, aby u objektu došlo k rovnovážnému stavu. Po konci pulzu se objekt snaží zachovat tento stav generováním svého magnetického pole, obvykle s exponenciálním dozníváním. Právě toto pole je pak detekováno. Podle tvaru doznívající křivky lze usoudit i druh kovu a jeho tvar.

Z důvodu potřeby co nejstrmějšího pulzu, který je závislý na strmosti rezonančního obvodu, je zřejmé, že podle Thomsonova vztahu musí být indukčnost a parazitní kapacita cívky co nejmenší, což nám také udává, že rezonanční kmitočet bude větší. Tedy při dané indukčnosti se snažíme co nejvíce zmenšit právě parazitní kapacitu, a toho můžeme docílit například typem vinutí cívky. Jeden takový způsob vynutí cívky je takzvané košíkové vynutí, které bylo použito i v praktické části této práce(2, 1, 11).



Obrázek 5 – Blokové schéma impulzního detektoru s jednou cívkou(2)

U tohoto blokové schématu opět vidíme vysílací člen V, který budí cívku, ta po svém pulzu detekuje magnetické pole objektu a podle tvaru a velikosti doznívání mohou vyhodnocovací obvody VO určit velikost a materiál daného předmětu(2).

Důležitou vlastností těchto druhů detektorů je proud hledací cívky, ten nám určuje zátěž na baterii, a tedy délku možného provozu detektoru(2). Maximální hodnota tohoto proudu je dána prvky obvodu a je odvozena z rovnice.

$$I_{max} = \frac{U_B - U_{sat}}{R_L + R_p + R_z}$$

Kde U_B je napětí baterie, U_{sat} je úbytek na spínacím prvku (většinou tranzistor), R_L je odpor vinutí s paralelním tlumícím odporem, R_z je odpor zdroje a R_p je odpor přívodů k cívce(2).

Jestliže v dosahu cívky není žádný detekovatelný objekt, není ani žádný vyvolaný exponenciální doběh, z toho vyplývá, že při detekci je vidět jen doběh samotné cívky a voltampérová charakteristika ochranných diod. Výše uvedené vysvětlení funkce je velmi zjednodušeno, proto se teď podíváme na složitější vysvětlení funkce. Při začátku pulzu je

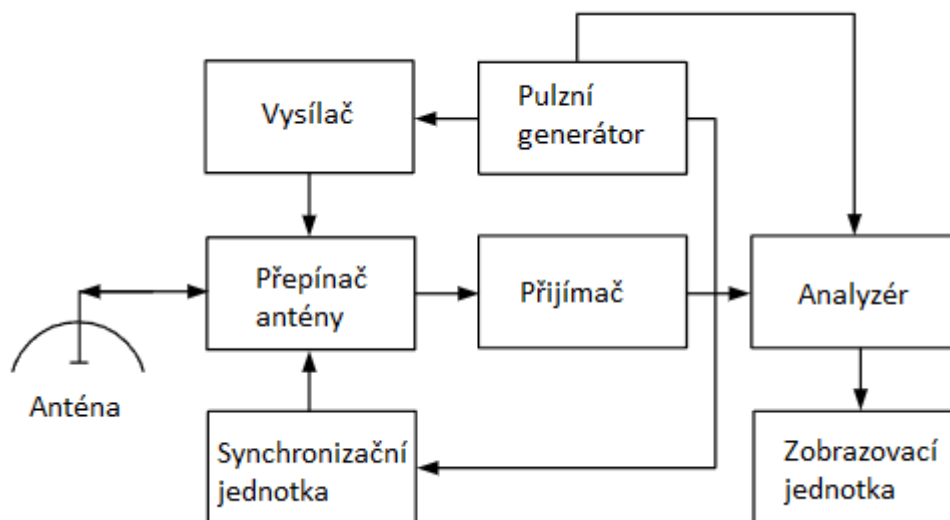
magnetické pole veliké, a proto i vířivé proudy jsou velké. To má za následek neschopnost vysílaného pole proniknout do objektu, takže detekce by v tento moment nebyla možná. Po ustálení vysílacího proudu pole proniká do celého objektu, čím více siločar proniká do objektu, tím větší vířivé proudy vznikají při zániku vysílacího elektromagnetického pole, ty vytvářejí tedy poměrně silné magnetické pole, které pak přijímáme(1, 2, 11).

1.6 Radarové detektory kovu

Tento typ detektoru je jedním z modernějších a aktuálně je nejvíce rozvíjeným řešením detekce kovů. Využívá k detekci odražené mikrovlnné záření radaru od hledaných kovových objektů. Při kontrole přijímané amplitudy z ní dokážeme zjistit nejen velikost daného objektu, ale i jeho vodivost. Zároveň s amplitudou nám přichází informace o fázovém posunu vlny, tato informace nám říká hloubku objektu. Opět jako u předchozích typů může takový detektor pracovat ve dvou různých režimech. Radar může vysílat záření buď ve formě pulzů, jako v předchozí kapitole, nebo ve formě kontinuálního oscilujícího paprsku, tento způsob byl už také zmíněn. Při tomto způsobu se objevuje Dopplerův jev, ten však v tomto případě nemá kromě využití na určení hloubky žádný účel, a proto se téměř nevyužívá v praxi(12).

Jedna z metod, která se však používá, je frekvenční vlnový radar. Ten používá krokový zákon modulace frekvence zvuku. Takový radar pracuje s několika vysílacími frekvencemi, při hledání objektu se postupně vysílají jednotlivé frekvence, u kterých se měří posun fáze. V tomto případě se onen druh detektoru používá spíše k detekci neferomagnetických materiálů. Značnou nevýhodou je poměrně velká náročnost vyhodnocovacích obvodů, a tedy i výrobní cena(12).

Další metodou je pulzní způsob vysílání, který se již používá poměrně hojně. Princip tohoto detektoru je ve vysílání krátkých a silných vysokofrekvenčních pulzů. Jejich odrazy jsou přijímány a obecně se počítá se stejnou vysílanou a přijímanou fází. Blokované schéma takového detektoru můžeme vidět na obrázku níže.



Obrázek 6 – Jednoduché blokové schéma pulzního radarového detektoru(8)

Pulz dodávaný z pulzního generátoru je modulován ve vysílači a následně vyslán anténou. Po odražení od hledaného objektu je pulz zachycen anténou a je analyzován. Spolu s ním je analyzován i pulz vysílací k porovnání. Určuje se zpoždění signálu, které udává hloubku objektu, amplituda pak udává velikost objektu(12).

Stejným typem detekce, ale s jiným provedením, je semi-statický pulzní radar. Rozdíl spočívá v tom, že přijímač má vlastní přijímací anténu. Toto provedení obchází jednu z nákladných operací, a to ochránění přijímací antény od silného signálu vysílací antény. Vypadává nám tedy i nutnost přepínání mezi vysílačem a přijímačem(12).

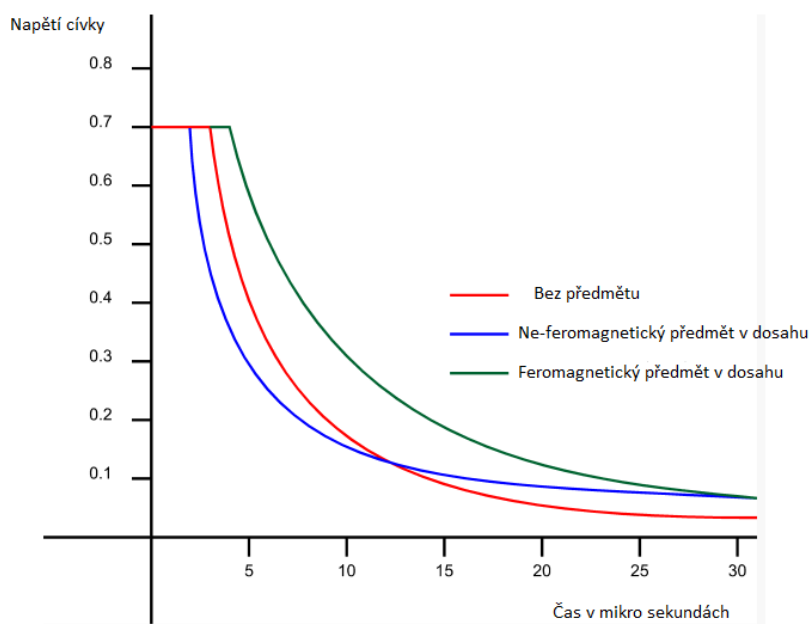
Většina takovýchto radarů, i se společnou cívkou, operuje pod frekvencí 5GHz. Nároky na cívky také nejsou malé, v ideálních podmínkách požadujeme, aby cívka měla stabilní parametry během celé délky měření, a to se týká jejího zisku, který chceme co největší, malé šířky vysílaného paprsku, impedančního přizpůsobení a malé disperze(12).

1.7 Pulzně indukční detektor

Tento typ detektoru bude představen v praktické části bakalářské práce. Pulzně indukční detektory jsou využívány hlavně pro detekci ve velmi mineralizované půdě, písku, či ve vodě. Tento typ může být vybudován s jednou cívkou, která slouží jak k vysílání, tak přijímání magnetického pole, nebo s vícero cívkami, kde každá cívka slouží nějakému účelu (vysílání, přijímání). (13)

Detektory tohoto typu vysílají silné, ale krátké pulzy proudu do vysílací cívky. Ta vytváří magnetické pole. Část, která nás zajímá je však konec tohoto pulzu, který nastane ideálně po ustálení pole cívky. V tu chvíli klesá i magnetické pole cívky, tento pokles však není okamžitý a dá se tedy sledovat postupný zánik napětí na cívce. Pokud je v dosahu hledaný

předmět, jeho vířivé proudy ovlivňují hledací cívku, tedy právě její končící pulz, kde můžeme detekovat změnu v délce a tvaru doznívající křivky. (13)



Obrázek 7 – Graf vyhodnocování PI detektorů (14)

Na předchozím obrázku můžeme vidět, jak přibližně vypadají jednotlivé křivky doznívání podle materiálů v dosahu. Kde za ideálních podmínek pozorujeme měnící se hladinu napětí. Z grafu lze vyčíst, že feromagnetický materiál zpozdí dobu začátku poklesu napětí pod 0.7 voltu, naopak materiál, která není feromagnetický, posune tento moment doleva, tedy dříve. Z analýzy pulzu lze tím pádem odhadnout o jaký materiál se jedná. Je však potřeba mít na paměti slovo odhad, protože velikost, hloubka objektu, okolní prostředí a vlastnosti půdy mohou ovlivnit signál natolik, že přesné určení není možné.(13)

Výhodami těchto detektorů je jejich větší hloubkový dosah, odolnost proti mineralizaci půdy (ne úplná) a možnost podvodního využití i ve slané vodě. S těmito výhodami se však váže i pár nevýhod, a to poměrně špatná možnost identifikace a větší spotřeba.

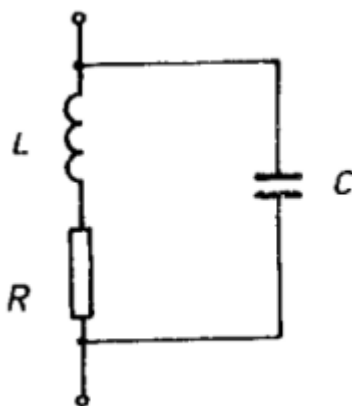
2 Cívky detektorů

Cívka je jedním z nejdůležitějších, ne-li nejdůležitějším prvkem detektoru. Její podíl na kvalitě detektoru je nejméně 60 % a toto číslo stále stoupá. I přes velký posun ve vyhodnocovací elektronice se její kvalita nemůže cílce vyrovnat. Výroba cívek se neobejde bez kvalitních materiálů a jemné manuální práce. Je tedy hlavním prvkem, která při blízkém

kontaktu s vodivým předmětem mění svoje vlastnosti, které následně zachycujeme a vyhodnocujeme(2).

2.1 Vlastnosti

V teorii se uvádějí tři základní pasivní součástky, a to rezistor, cívka a kondenzátor. A k nim základní veličiny, mezi které řadíme odpor, indukčnost a kapacitu. Všechny vyjmenované součástky mají tyto uvedené vlastnosti, avšak vždy jedna z nich dominuje. Každou ze součástek lze také vyobrazit v náhradním zapojení, a to s právě parazitními vlastnostmi jako součástky rezistor, kondenzátor a induktor. Jsou zapojené buď paralelně, nebo sériově. Cívka má v sérii s indukčností odpor vodiče a v paralelní větvi kapacitu vinutí, jak je vidět na obrázku(2).



Obrázek 8 – Náhradní zapojení cívky (obrázek: vlastní)

2.2 Cívka, její magnetické pole a indukce

Cívka není nic jednoduššího, než vodič smotaný do jednoho či více závitů. Vlastnosti cívky, mimo jiné i hlavní indukčnost, určuje materiál, dále způsob vinutí, průměr vodiče, počet závitů a případně jádro. Jestliže cívkou teče proud, tvoří se okolo ní magnetické pole. Stejnoseměrný proud generuje statické magnetické pole a proud střídavý střídavé magnetické pole. Tento střídavý proud může být i ve speciální formě, a to v podobě pulzů. To opět generuje tomu příslušné impulzní magnetické pole. Magnetické pole bývá vyobrazováno magnetickými siločarami. Pokud pronikají skrze jinou cívku, indukují se na ní podle Lenzova pravidla elektrický proud. Tohoto jevu využívají například transformátory. I detektory v některých případech využívají transformátoru, ovšem vzhledem k obklopení vzduchem, který je málo magneticky vodivý, vzniká velké rozptýlení siločar. A to je právě využito u detekce kovových objektů(2; 12).

Když se v blízkosti budící cívky nachází vodivý objekt, indukují se v něm vířivé proudy v kruhových drahách. Tedy za předpokladu, že budící pole je střídavé. Tyto proudy pak vytvářejí magnetické pole vlastní, avšak opačného směru, než pole budící cívky. Toto pole

nám deformuje původní magnetické siločáry, a to lze detekovat vhodnými obvody (princip kmitočtových detektorů). Vytvořené vířivé proudy však nejsou příliš velké, proto i jejich magnetické pole a následná deformace není veliká, i tak lze detekovat změny ve vlastnostech vysílací cívky. Ve vícecívkových systémech je změna pozorována ve vzájemné indukčnosti vazbě(2).

3 Návrh detektoru

Jak již bylo zmíněno v úvodu, další částí této práce je návrh a realizace detektoru kovu. Vybraným typem detektoru, pro který jsem se rozhodl, je pulzně indukční detektor. Zároveň jeden z mých cílů bylo vytvořit tento detektor za co nejmenší náklady. To vedlo k pár diskutabilním rozhodnutím, co se týče použitých součástek i typu vyhodnocování.

3.1 Napájení

Prvním prvkem mého detektoru je napájení, vzhledem k tomu, že není logické chodit s hledačem po poli a za sebou táhnout elektrický drát, se u detektorů téměř vždy používá akumulátor. Výběr se jeví jako široký, ale je pár kritérií, na které je dobré se zaměřit. Asi tím nejdůležitějším je délka provozu, takže ideální baterie je s co nejvyšší kapacitou.(15)

Druhé kritérium je rozhodně váha, protože baterie bývá umístěna přímo na detektoru a při delší době používání se váha rozhodně projeví na únavě hledače. Právě na tento parametr jsem při výběru moc nedbal, i když jsou mnohem lehčí typy akumulátorů jako například nikl-metal hydridové, které jsou vhodné díky lehkosti a přívětivému formátu AA. Naopak jsou ale samovybíjecí a mají nižší napětí, což by šlo vyřešit připojením vícero článku do série, avšak tím narůstá opět hmotnost a také cena. Dalším typem jsou lithiové-iontové baterie, ty jsou však většinou finančně náročnější a u levnějších většinou chybí ochranné obvody proti úplnému vybití či přebití.(15)

U některých starších detektorů se používají také alkalické baterie, avšak kvůli jejich neschopnosti dobíjení jsem je ze seznamu kandidátů rychle vyřadil.

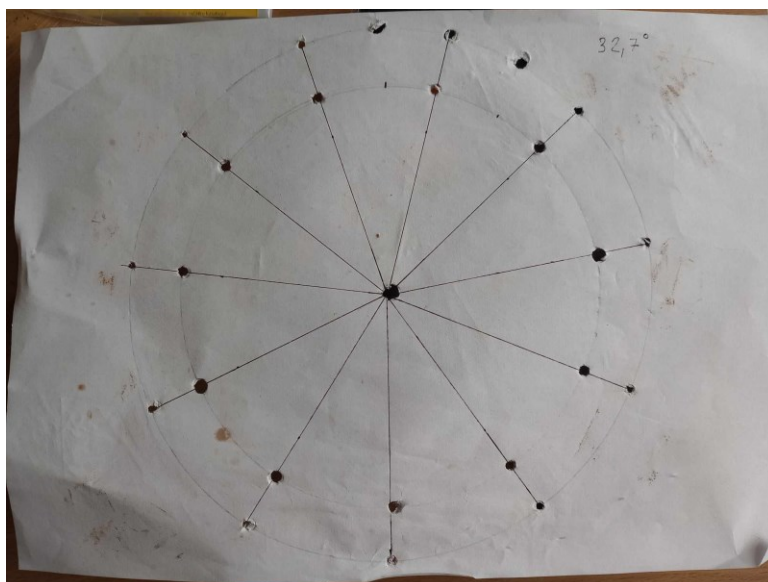
Já si však vybral jiný typ, a to AGM baterii, což je typ olovněného akumulátoru. Ta se běžně nepoužívá u ručních detektorů zejména kvůli její váze, já však dostal nabídku na takovou baterii zdarma, čehož jsem rád využil. Navíc vlastním nabíječku na tento typ baterie, takže cena a velká kapacita vyhrály.(16)



Obrázek 9 – AGM Baterie(16)

3.2 Cívka detektoru

Druhou důležitou částí každého detektoru je samotná hledací cívka. Já se rozhodl pro použití pouze jedné cívky, opět kvůli ceně. Důležité pro mě bylo, abych si cívku namotal sám, což jsem bral také jako výzvu naučit se něco nového. Začal jsem hledáním vhodného typu navíjení takové cívky. Je jich mnoho, mě však na první pohled zaujalo košíkové vynutí. Zejména kvůli vzhledu a poměrné složitosti, ale po podrobnějším zkoumání i kvůli malé parazitní kapacitě, což je u cívek detektorů vhodná vlastnost. Pro samotnou cívku jsem se rozhodl použít měděný lakovaný drát o průměru 0.3 mm navinutý do cívky o vnějším průměru 20 cm a vnitřním průměru 18 cm, tyto dva průměry budou objasněny na následujících obrázcích.



Obrázek 10 – Nárys úchytů cívky (foto vlastní)

Při tvorbě cívky jsem začal nárysem dvou kružnic o zmíněných průměrech a následným rozdělením na 11 segmentů, počet segmentů může být i jiný za předpokladu lichého počtu. Segmenty jsou od sebe vzdálené o $32^{\circ}7'$. K tomuto úhlu jsem došel rozdělením kruhu na 11 segmentů.

$$360/11=32,727272$$

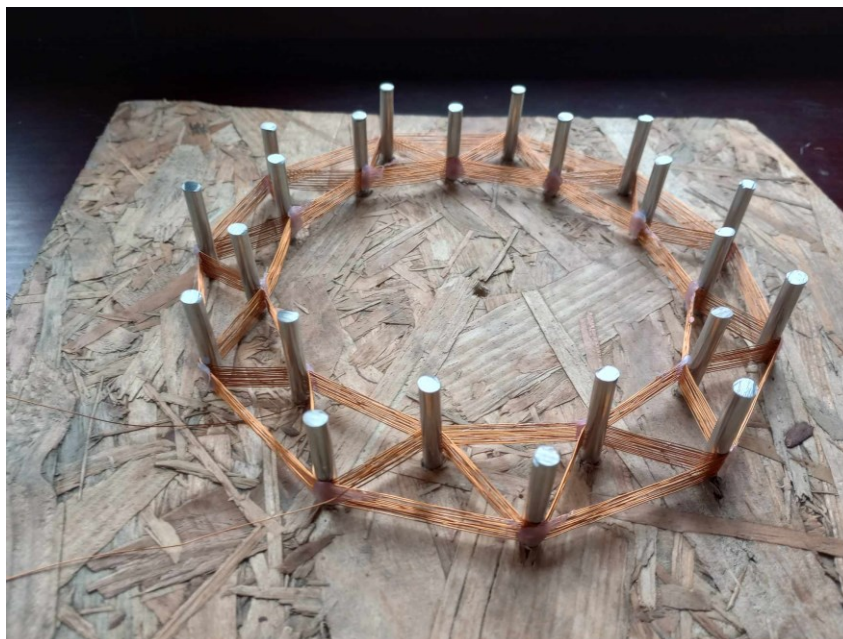
Následně jsem si připravil desku z dřevotřísky, na kterou jsem položil nárys a vyznačil důlčíkem otvory na vnější kružnici, poté jsem pootočil papír o půl dílu a vyznačil vnitřní otvory.



Obrázek 11 – Deska na vinutí cívky (foto vlastní)

Po naznačení otvorů jsem vyvrtal díry a našrouboval šrouby, kterým jsem poté uřezal hlavičky, aby nepřekážely při sundávání cívky z formy. Dále mě čekalo vynutí drátu, vždy

přes dva kolíky vnější a dva vnitřní, takto jsem postupoval pořád dokola. Při tom jsem se snažil držet jednotlivé závity co nejvíce u sebe.(17)



Obrázek 12 – Hotová cívka na držáku (foto vlastní)

Po čtyřiceti závitech jsem cívku ukončil, a nakonec přilepil tavnou pistolí na jednotlivých kolících, za snahy nepřilepit kolíky ke drátu. V tomto stavu jsem vzal cívku na fakultu k měření její rezonanční frekvence, reaktance a indukčnosti.

3.3 Mikrokontroler

Třetí, hlavní částí mého detektoru, je mikrokontroler. Volba pro mě byla jasná. I když možností je mnoho.

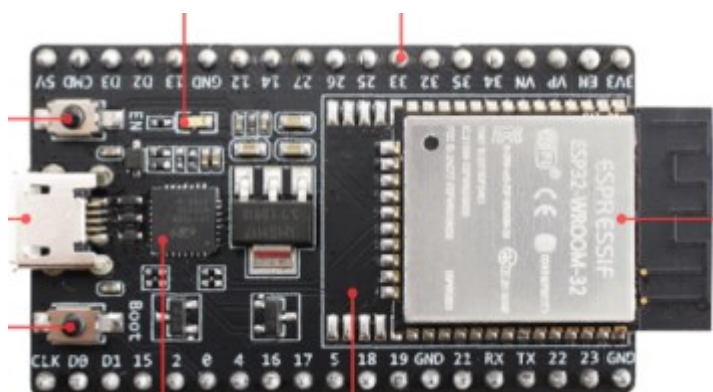
Nyní uvedu pár příkladů vhodných mikrokontrolerů. Jednou z mnoha možností jsou STM32, které disponují velkou škálou tříd od STM32F0, které jsou velmi levné, až po výkonné STM32F4 či STM32H7. Tyto mikrokontrolery mají rychlé 12-16bit ADC převodníky s dobrou podporou a dokumentací k daným výrokům. A například STM32F303 je speciálně vhodný na analogové zpracování.(18)

Dalším vhodným kandidátem je ESP32, při kterém mám opět na výběr ze spousty typů, výhodou těchto mikrokontrolerů je dvouvláknový procesor, případně dokonce modul Wi-Fi a Bluetooth, které jsem v mé aplikaci však nepotřeboval. Tento typ je také levný, snadno dostupný a poměrně lehký na obsluhu.(19)

Vhodná volba by byl i Teensy, který je velmi výkonný s kvalitní ADC a PWM. Programovat se dá v Arduino IDE, což je přívětivé kvůli jednoduchosti návrhu softwaru.(20)

Neposlední možností může být nějaké AVR, například ATmega328P. Ten je jednoduchý na obsluhu a dobře dostupný, má však svá úskalí, a to poměrně pomalou rychlost (16 MHz) a pouze 10bit ADC.(21)

Mou konečnou volbou je ESP32-DevKitC, který splňuje mé požadavky, a navíc jsem vlastníkem dvou těchto modulů z předchozích projektů, tedy mám předchozí zkušenosti s prací a programováním s těmito mikrokontrolery. ADC tohoto mikrokontroleru je bohužel nedostačující k mému rychlému vyhodnocování, ale to jsem obešel jiným způsobem zpracování signálu, o kterém se budu bavit více v dalších kapitolách.



Obrázek 13 – ESP32-DevKitC(22)

ESP32-DevKitC je vývojová deska od společnosti Espressif, která je navržena pro snadné prototypování a vývoj aplikací využívajících mikrokontrolér ESP32. Tato deska je oblíbená mezi vývojáři díky své všestrannosti, podpoře Wi-Fi a Bluetooth a široké škále periférií.(22)(23)

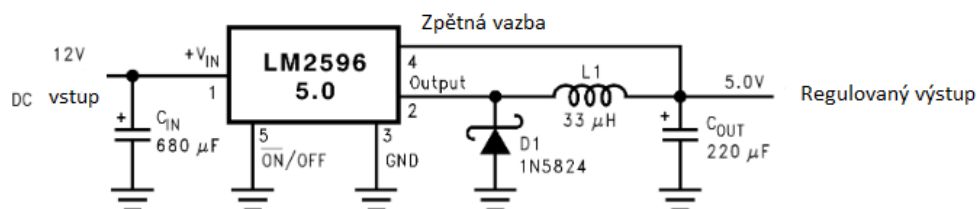
Klíčové vlastnosti ESP32-DevKitC

- **Mikrokontrolér:** ESP32-D0WDQ6, dvoujádrový 32bitový procesor Xtensa® LX6 s frekvencí až 240 MHz.
- **Paměť:** 520 KB SRAM, 4 MB SPI flash paměti.
- **Bezdrátová konektivita:** Wi-Fi 802.11 b/g/n a Bluetooth v4.2 BR/EDR a BLE.
- **Napájení:** 3.0 V až 3.6 V, typicky 3.3 V.
- **Spotřeba proudu:** Průměrně 80 mA při běžném provozu.
- **Rozměry:** 18 mm × 25.5 mm × 3.1 mm.

ESP32-DevKitC nabízí širokou škálu periférií a rozhraní, které umožňují připojení různých zařízení a senzorů: GPIO piny s podporou ADC (12bitový analogově-digitální převodník), DAC (8bitový digitálně-analogový převodník), PWM, I2C, SPI, UART. Integrované kapacitní dotykové senzory. Je zde i podpora pro komunikaci v automobilových aplikacích. Většina z uvedených kapacit nebyla využita, ale mnoho GPIO pinů je velmi užitečná vlastnost. Deska ESP32-DevKitC může být napájena několika způsoby: Přes mikro USB port, kdy slouží zároveň pro napájení a programování desky. Přes 5V a GND piny je externí napájení přes piny na desce, toto napájení jsem využil já, ale dá se také napájet přes 3.3V a GND piny pro přímé napájení logiky. Pro programování je k dispozici USB-UART převodník, který umožňuje nahrávání firmware a komunikaci s mikrokontrolerem. Deska je kompatibilní s vývojovým prostředím ESP-IDF (oficiální SDK od Espressif) a také s Arduino IDE. (22)(23)

3.4 Napájení ESP

Mnou zvolené napájení dodává 12 V, což je víc než 5V potřebných pro ESP32, proto jsem musel použít měnič napětí LM2596, na který jsem narazil jako první a vyhovuje mým potřebám. Tento typ se vyrábí ve vícero variantách, k mému štěstí dokonce i ve variantě měniče na 5 V. Typ zapojení jsem tedy využil z katalogu.(24)



Obrázek 14 - Zapojení měniče na 5V (24)

Součástky jsem použil také dle vzorového zapojení, protože ono schéma je pro fixních 5V na výstupu, což je právě můj případ.

Regulátory řady LM2596 jsou monolitické integrované obvody, které poskytují všechny potřebné funkce pro snižující (step-down, buck) spínaný regulátor napětí. Je schopný řídit zátěž 3 A s vynikající stabilitou výstupního napětí i při změnách vstupního napětí a zátěže. Tyto zařízení jsou dostupná s pevnými výstupními napětími 3.3 V, 5 V, 12 V a také ve verzi s nastavitelným výstupem, pro mě vhodných fixních 5V. Pro svůj provoz vyžadují minimální počet externích součástek, jsou jednoduché na použití a obsahují interní kompenzaci frekvence a oscilátor s pevnou frekvencí. Řada LM2596 pracuje se spínací frekvencí 150 kHz, což umožňuje použití menších filtračních součástek než u regulátorů s nižší frekvencí.

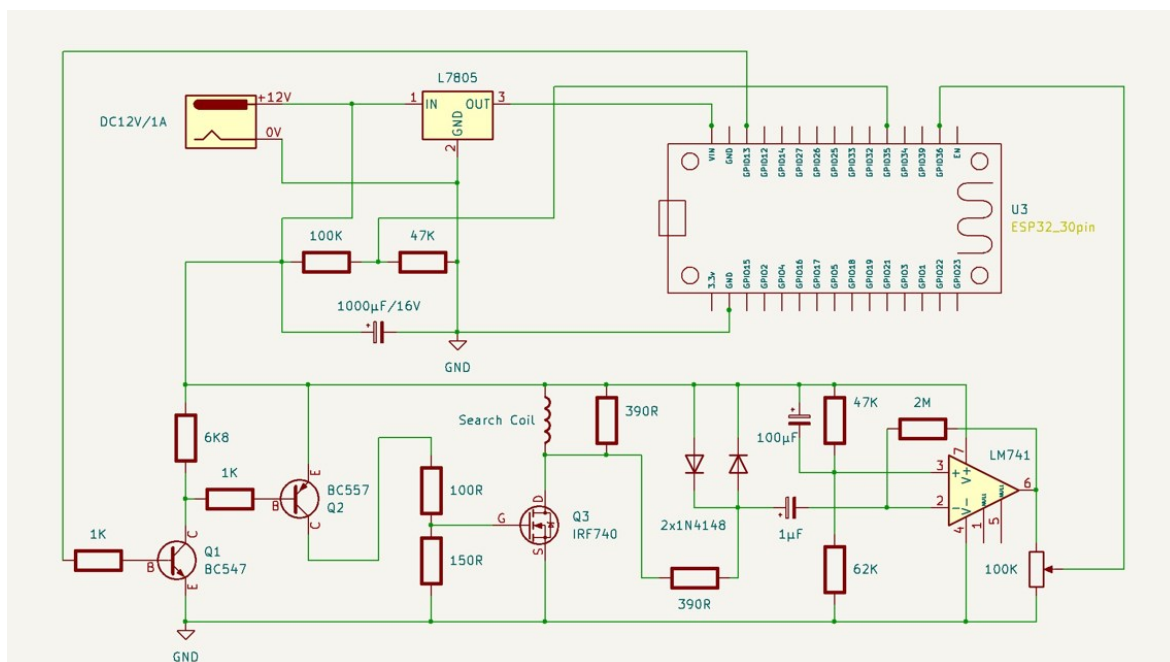
Jsou dostupné ve standardním 5-vývodovém pouzdrů TO-220 s několika variantami ohnutí vývodů a také v 5-vývodovém SMD pouzdrů TO-263. Standardní řada cívek je dostupná od několika výrobců, optimalizovaná pro použití s LM2596. Tato vlastnost výrazně zjednodušuje návrh spínaných napájecích zdrojů. (24)

3.5 Vyhodnocování signálu

Důležitou částí obvodu je také samotné vyhodnocování signálu, které jsem nejdříve plánoval řešit pomocí ADC převodníku mého ESP32, ale po trošce zkoumání jsem zjistil, že bych se pohyboval na hraně možností ESP. Proto jsem si raději zvolil vyhodnocování pomocí komparátoru LM741, což je jednodušší způsob vyhodnocování, který pomocí referenčního napětí na výstup pouští pouze část doznívajícího pulzu a jeho výkyvy způsobené hledaným objektem. Více v celkovém shrnutí funkce obvodu.(23)

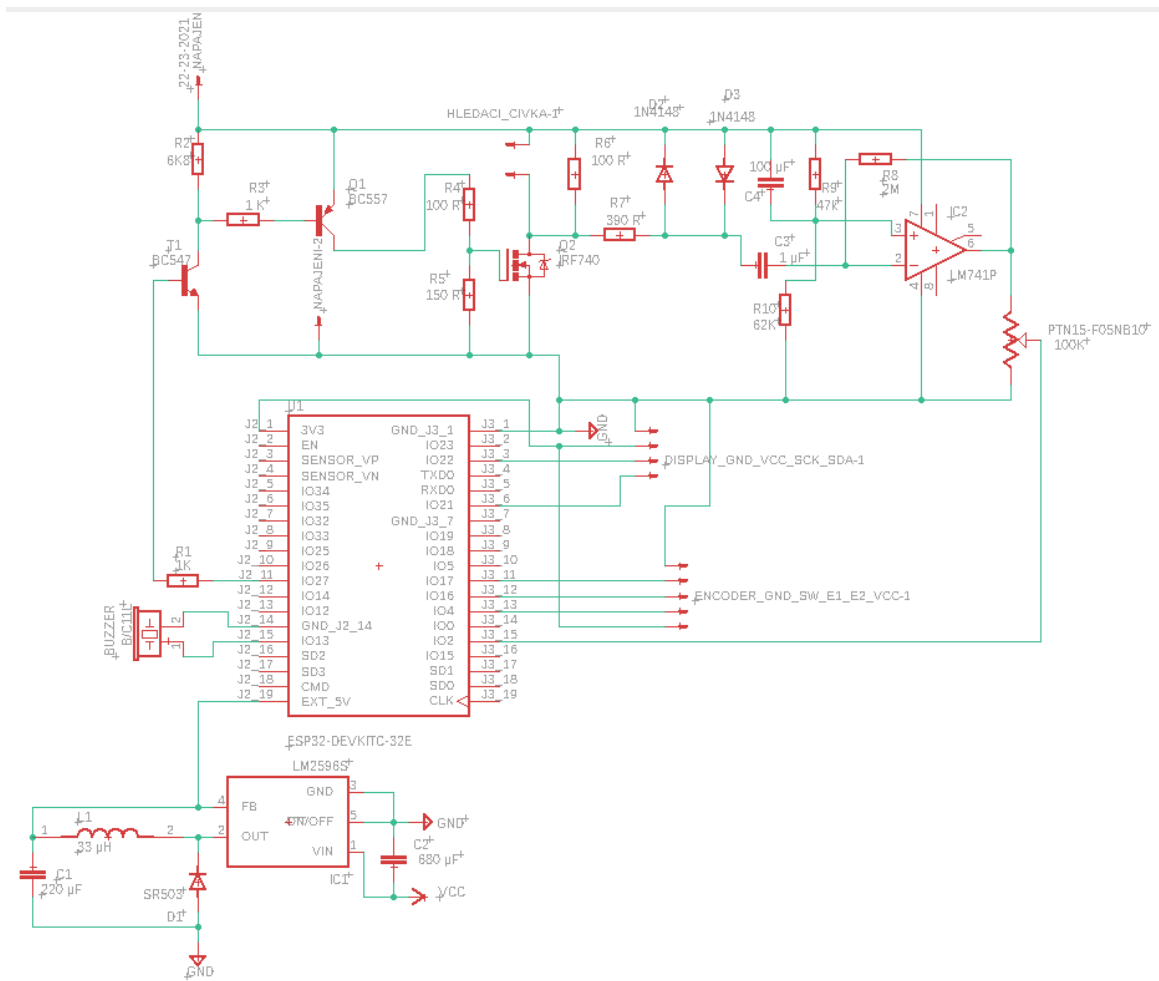
3.6 Schéma obvodu

V této kapitole shrnu blokově funkci obvodu a popíšu jednotlivé součástky a jejich funkce. Zároveň chci zmínit, že princip pomocí komparátoru je velmi rozšířený, proto vycházím z již existujícího schématu, který jsem následně upravil pro mé účely.

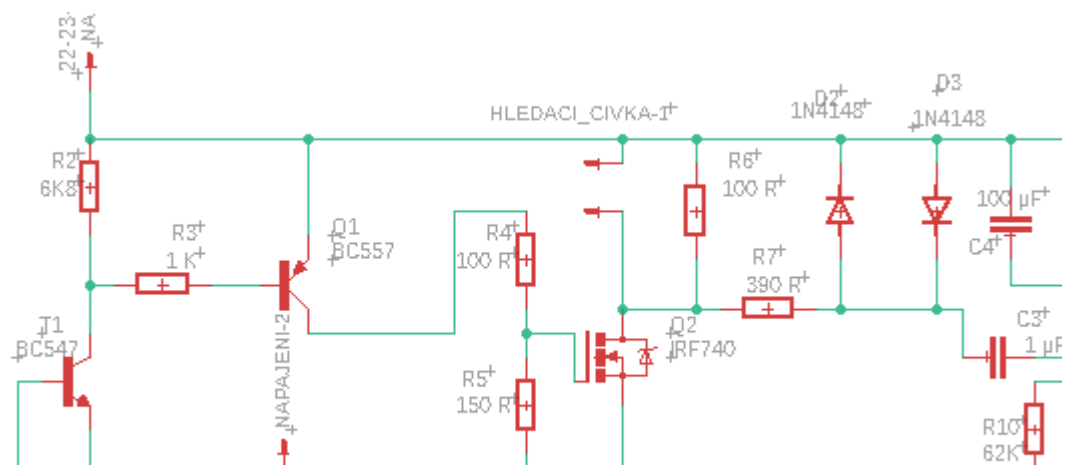


Obrázek 15 – Výchozí schéma zapojení (25)

Obrázek výše ukazuje původní, mnou neupravené schéma. Obrázek níže je již upravené a vytvořené schéma vycházející z obrázku výše.



Obrázek 17 – Schéma finálního detektoru (foto vlastní)



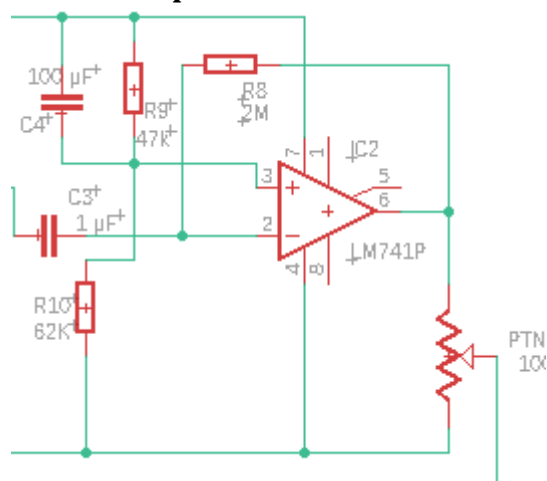
Obrázek 16 – Přiblížení spínacího obvodu (foto vlastní)

Nyní si podrobně představíme fungování celého obvodu.

3.6.1 Cívka a spínací obvod

První částí je samotná cívka a k ní vysílací obvod kde HLEDACÍ_CÍVKA je, jak z názvu vypovídá, samotná hledací cívka mého detektoru. Součástka Q2(IRF740) je výkonový MOSFET tranzistor, který spíná proud do cívky. Tato součástka je trochu naddimenzována, to však nevadí díky jeho příznivé ceně. Q1(BC557) a Q3(BC547) tvoří budič pro řízení hradla MOSFETu Q2, dále Rezistory R2, R3, R4, R5 jsou součástí onoho budiče a s diodou 1N4148 tvoří rychlé vypnutí a ochranu proti přepětí. R6, R7, C3, C4 tvoří obvod pro tvarování a filtrování signálu po odeznění pulzu z cívky. ESP32 přes výstupní pin spíná budič Q1/Q3, který krátkým pulzem sepne MOSFET Q2, čímž do cívky pustí proud. Po jeho vypnutí vznikne v cívce indukované napětí, které se dále měří. (25)(26)

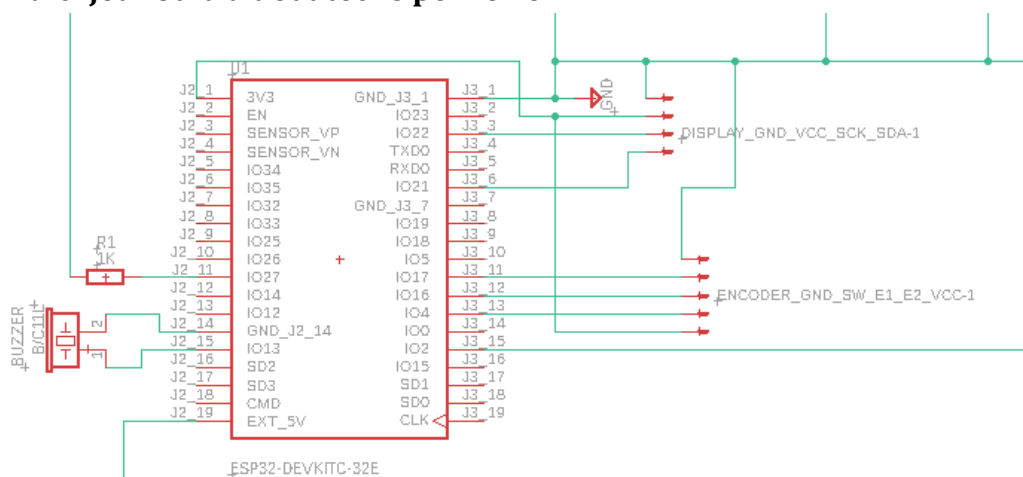
3.6.2 Detekce indukovaného napětí



Obrázek 18 – Přiblížení detekce změny napětí (foto vlastní)

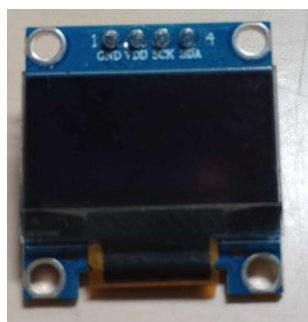
Diody D1, D2 spolu s kondenzátorem C3 filtrují a usměrňují signál z cívky. Rezistory R9, R10 tvoří dělič napětí a R8 je zpětná vazba ovlivňující hysterezi komparátoru LM741, který porovnává signál z cívky vůči referenci a generuje výstup pro ESP. PTN15-F05NB10 je nastavitelný odpor, neboli potenciometr, který slouží právě jako referenční napětí komparátoru. Komparátor porovnává napětí na cívce (které se mění při přiblížení kovového předmětu) s referenční hodnotou. Na vývodu komparátoru je tedy pouze část doznívání pulzu z cívky.(24)

3.6.3 Řídící jednotka a dodatečné periferie



Obrázek 19 – ESP32 a dodatečné periferie (foto vlastní)

ESP32-DevKitC-32E je hlavní mikrokontroler systému, ovládá spínání impulzů do cívky. Délka pulzu je 1 milisekunda s mezerou mezi pulzy 2 milisekundy. Dále také vyhodnocuje signál z komparátoru, tedy cívky, komunikuje a ovládá ostatní periferie jako malý LCD displej ukazující základní ovládací menu a detekci kovového předmětu. Samotné ovládání spínání cívky běží na vlastním jádře ESP32 aby ostatní periferie a vyhodnocování nebrzdilo samotné spínání. To je jedna z výhod ESP32, tedy to, že samotné ESP32 má dvě jádra. (23)



Obrázek 20 – LCD Displej (foto vlastní)

Dále je k samotnému ovládání menu použit modul s enkodérem a jako zvukový ukazatel detekce jsem použil obyčejný piezo.



Obrázek 21 – Modul s enkodérem (foto vlastní)

Posledním blokem je měnič, o kterém jsem mluvil v jedné z předchozích kapitol, jeho schéma je ve spodní části celkového schématu viz obrázek 16.

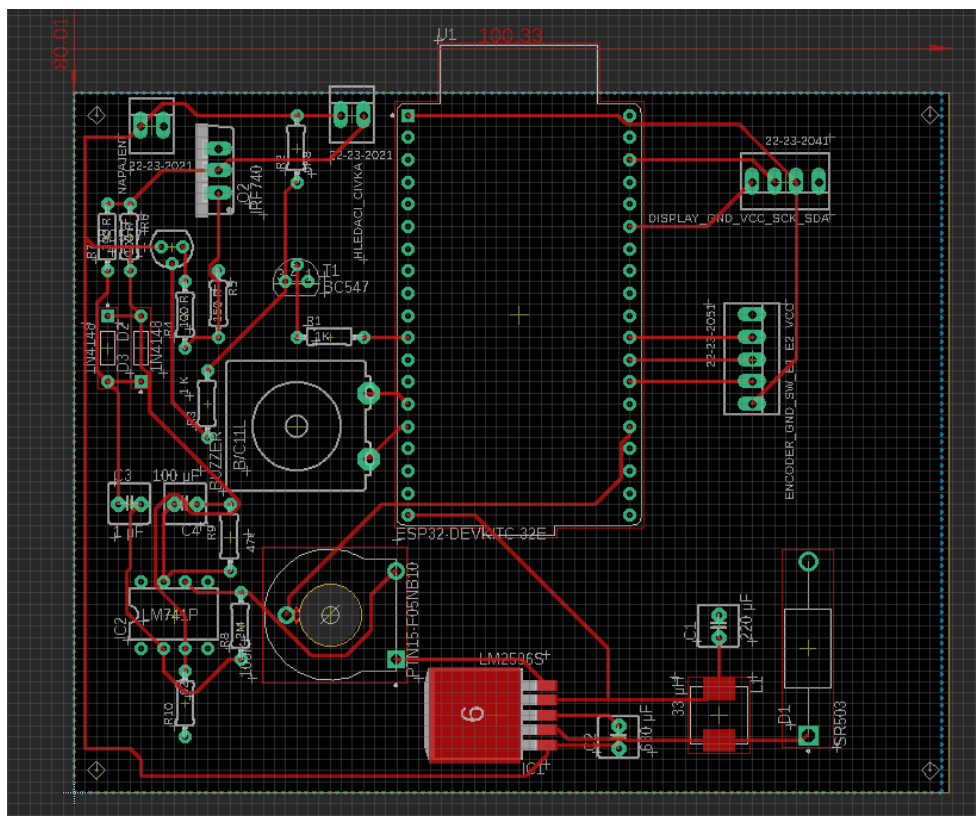
3.6.4 Shrnutí funkce

Na závěr této části bych chtěl vypsát krátké shrnutí funkce celého obvodu:

- ESP32 periodicky sepne tranzistor a vyšle krátký napěťový pulz do hledací cívky.
- Při přítomnosti kovu se v blízkosti cívky mění doba odeznívání signálu (vířivé proudy kovu).
- Tento signál se snímá a filtruje, poté je přiveden na vstup komparátoru (LM741).
- Komparátor porovná signál s referencí nastavenou potenciometrem a vygeneruje pouze doznívání jako výstup.
- ESP32 tento výstup vyhodnotí a spustí signalizaci (např. bzučák) a aktualizuje displej.

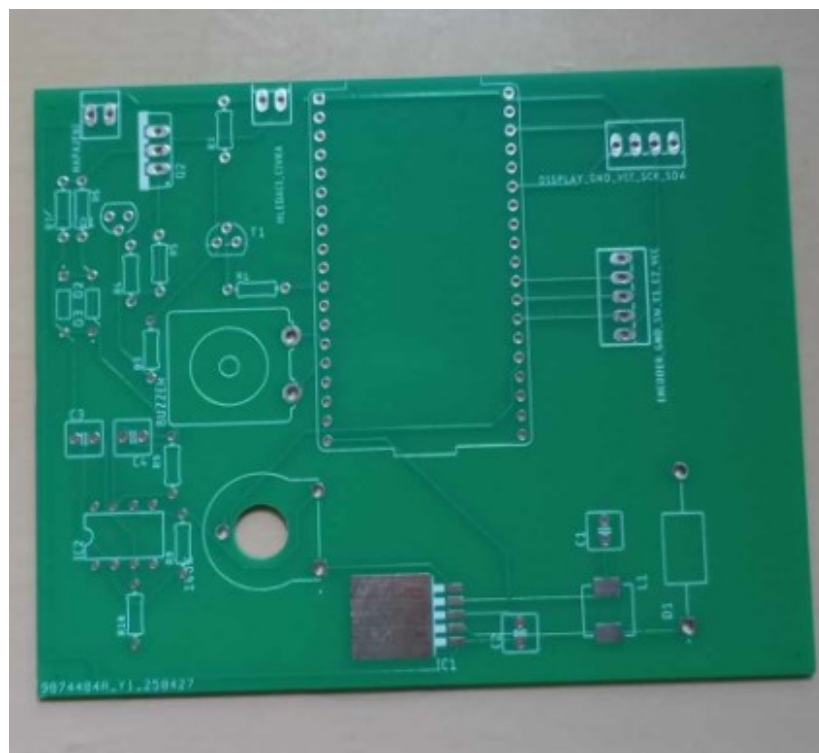
3.7 Návrh PCB

V této kapitole je návrh desky k výrobě a hotová deska i s osazením.

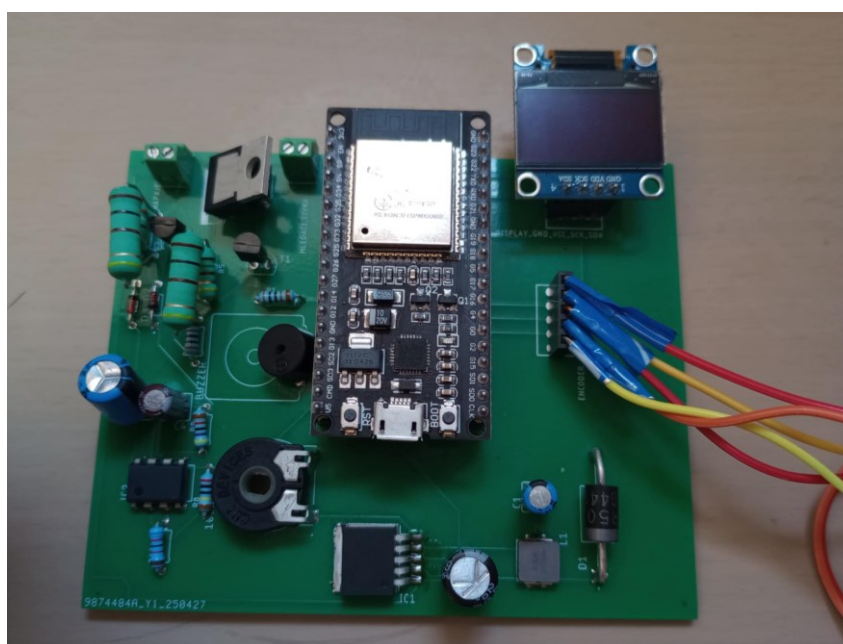


Obrázek 22 – PCB návrh v programu EAGLE (foto vlastní)

K návrhu desky jsem použil stejný software jako ke kreslení schématu, a to program EAGLE se kterým jsme se učili pracovat během studia, tvorba desky tedy nebyla nějakým náročným úkolem. Jedna z věcí, na kterou jsem si při návrhu desky musel dát pozor, je ta, abych vyhodnocovací část obvodu nerušil spínáním MOSFETu, tedy aby tyto dvě části nebyly přímo vedle sebe, zároveň jsem byl značně omezen i velikostí desky. EAGLE má placenou licenci, kterou máme zaplacenou od univerzity, avšak z nezjištěného důvodu mi tato licence nefungovala. Byl jsem tedy omezen verzí programu zdarma, u které, kromě vícero omezení, která se mě netýkala, jsem byl omezen velikostí desky maximálně 80 cm². Což však zas takový problém ve výsledku nebyl a deska by šla navrhnout i v menším formátu.



Obrázek 23 – Vyrobená PCB podle návrhu (foto vlastní)



Obrázek 24 - Osazená deska (foto vlastní)

Nyní k samotnému osazování a pájení. Během osazování jsem narazil na pár problémů, které se mi ale naštěstí podařilo vyřešit. První problém nastal až po zapájení součástek, a to při osazování enkodéru a displeje do pinové lišty, se samotným vložením problém nebyl, avšak při prvních pokusech zprovoznit a nastavit displej ano. Displej nereagoval a po změření napětí na displeji bylo naměřeno pouhých 2,2 V, což je podstatně méně než doporučené 3

V, které by i ESP32 mělo být schopno dodat při mé zátěži. Po zkontrolování studených spojů, ale žádné nápravě, jsem došel k chybě v návrhu desky. Při tvoření desky jsem zapomněl otočit popisky pinových lišt jak u displeje, tak u enkodéru. To vyústilo ke špatnému zapojení, tedy nefunkčnosti. Naštěstí nedošlo k žádnému poškození daných součástek a po otočení bylo vše v pořádku, to však jen za předpokladu toho, že piny jsou symetrické, což v tomto případě platí. Zbytek osazení proběhl bez problému.

3.8 Zdrojový kód

V této kapitole popisují psaní a funkce zdrojového kódu, viz Příloha A. Před samotným programováním EPS 32 jsem zakoupil napájecí a zároveň datový kabel USB A – USB Mikro.



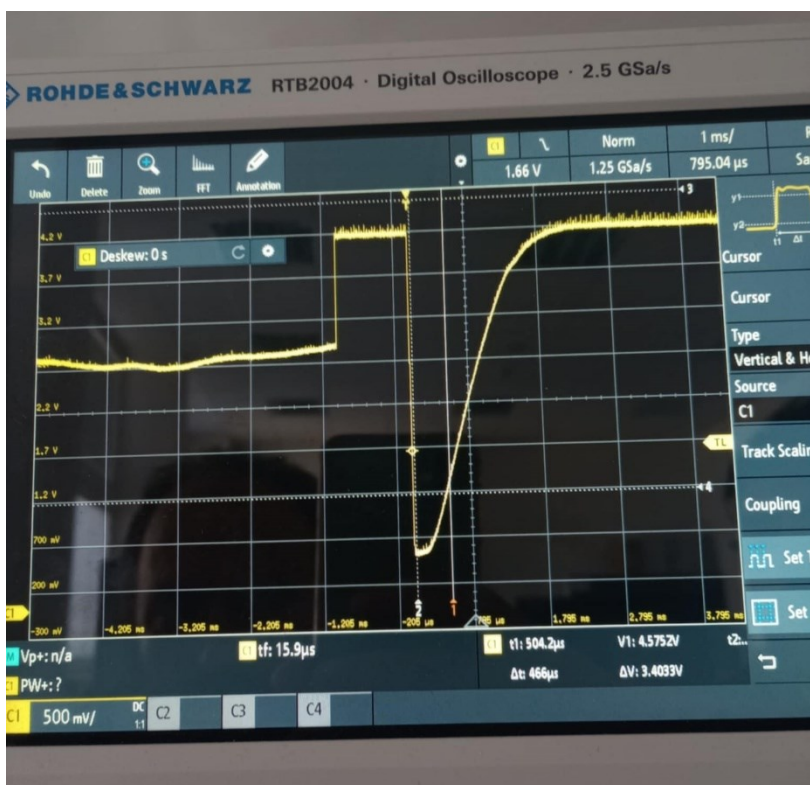
Obrázek 25 - USB kabel k programování (foto vlastní)

Po instalaci programovacího softwaru Visual Studio Code a stáhnutí rozšíření PlatformIO, které je vhodné pro programování ESP zařízení, jsem se pustil nejdříve do nastavení rozhraní, a to na obsluhu displeje a enkodéru se signalizačním bzučákem. Pro nastavení displeje jsem využil knihovnu Adafruit_GFX a Adafruit_SSD1306. Knihovny jsou jednoduché na používání a obsahují vše potřebné k základnímu nastavení a obsluze displeje. Při zapnutí ESP32 se chvíli počká než se obvod a samotné ESP32 ustálí. Poté se začne spínat cívka a na displeji se zobrazují měřené časy. Stisknutím enkodéru se potvrdí referenční čas bez přítomnosti kovu. Použité Piezo je aktivní typ, tedy nelze obsluhovat přímo PWM, tedy reálná hlasitost nelze nastavit. Lze však nastavit frekvence pípání a jeho cyklické pípání, což navozuje pocit měnící se hlasitosti. To jsem nakonec nevyužil ale v prvotní verzi programu jsem měl toto nastavení funkční. Funguje to na podobné principu jako ovládání jasu LED, ale bez PWM. (27)(28)

Pro zmíněný enkodér jsem využil knihovnu ESP32Encoder.

V aktivním módu je obsluha cívky a zpracování signálu. Pro spínání cívky by se dalo dobře využít PWM, která by jednoduše otevírala MOSFET a tím spínal cívku, avšak kvůli prvotní nevědomosti spínací frekvence jsem zvolil prostý způsob opakovaného nastavování pinu

MOSFETU na logickou úroveň HIGH a následně po ustálení proudu cívkou úroveň LOW. Tuto volbu jsem udělal, jak již je zmíněno výše, neznalostí spínací frekvence, ale také délkou pulzu, jelikož tyto dva parametry jsem musel nejdříve vyzkoušet, a to nastavením větší délkou pulzu a mezerou mezi pulzy. Po změření na osciloskopu je pak patrná doba ustálení, tedy délka pulzu a možná četnost opakování. Ta díky více vláknovému programu není zpomalována zpracováním signálu ani zobrazováním na displeji. Zároveň by toto opakování mělo probíhat co nejčastěji pro co největší přesnost.



Obrázek 26 - Průběh pulzu před komparátorem (foto vlastní)

Na obrázku výše je vidět pulz před komparátorem. Na výstupu komparátoru je pro pin ESP32 v době bez pulzu logická jednička. Při náhlém poklesu, tedy v doznívání pulzu, mikroprocesor zaznamená přechod do logické nuly a začne měřit dobu pomocí funkce micros. Při následném překročení napětí, zpět do logické jedničky, zaznamená ESP32 tuto změnu stavu. Zastaví měření času a vypíše ho na displej. Pokud je tento čas delší než prvotně nastavený čas na „prázdnou“, vypíše na displej detekovaný čas a zvýrazní tuto skutečnost pípnutím piezo.



Obrázek 27 - Hotový detektor (foto vlastní)

Na posledním obrázku je ukázaný hotový detektor s kompletní konstrukcí.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout, sestavit a také otestovat funkční prototyp pulzně indukčního detektoru kovů s digitálním vyhodnocením. V praktické části byl navržen a poté sestaven funkční detektor využívající pulzně indukční metodu. Klíčovou výhodou tohoto řešení je jeho odolnost vůči mineralizaci půdy a schopnost detekovat kovové objekty i ve ztížených podmínkách, jako je vlhké nebo slané prostředí. V rámci návrhu byl kladen důraz na jednoduchost, cenovou dostupnost a využití běžně dostupných komponent, což vedlo k použití výkonného mikrokontroleru ESP32 a jednočipového komparátorového řešení pro detekci změn v odezvě signálu cívky. Dále byl vytvořen návrh hledací cívky s minimální parazitní kapacitou, který byl následně zrealizován. Potom jsem postoupil na návrh desky plošných spojů v programu EAGLE. Výsledný detektor byl otestován na dosah detekce větších kovových předmětů, přičemž bylo potvrzeno, že zařízení správně reaguje na větší vodivé objekty a nabízí alespoň nějaký dosah.

Při dokončování tohoto projektu jsem musel upravit některé součástky, aby byla výsledná citlivost ideální. Úprava však nemá velký efekt na předem daný návrh zařízení. V budoucnu mám v plánu tento projekt předělat a dovést k lepším výsledkům, a to hlavně k detekci i mnohem menších předmětů.

Z praktického hlediska mi přinesla práce cenné zkušenosti jak s konstrukcí a testováním elektronického zařízení, tak i s programováním mikrokontroleru v prostředí PlatformIO. Zároveň byla ověřena schopnost jednoduchého obvodového řešení úspěšně detekovat změny způsobené vířivými proudy. Přestože zařízení nedosahuje takové přesnosti a rozsahu jako je tomu u profesionálních přístrojů, považuji i tyto výsledky za určitý úspěch, hlavně díky využití cenově velmi dostupných materiálů. Byly rovněž identifikovány limity navrženého řešení, zejména v oblasti přesnosti detekce, rychlosti vyhodnocení signálu a omezené možnosti diskriminace kovů, což může být předmětem budoucího zlepšení.

Dalším možným směrem rozvoje této práce by mohlo být vylepšení vyhodnocovacího obvodu použitím rychlejšího a přesnějšího A/D převodníku, případně implementace vícekanálového vzorkování. Zajímavou možností představuje i rozšíření o Bluetooth komunikaci a mobilní aplikaci, která by uživateli umožnila vzdálené zobrazení detekovaných údajů. Celkově lze práci hodnotit jako úspěšně naplněnou, a to jak z hlediska konstrukce funkčního zařízení, tak i získaných praktických dovedností a hlubšího porozumění problematice detekce kovů.

Literatura

- (1) SIXTA, Martin. *Detekce a klasifikace kovových předmětů*. Online, diplomová práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013-07-20T01:54:05Z. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/52108>. [cit. 2025-03-03].
- (2) HÁJEK, Jan a JARCHOVSKÝ, Zdeněk. *Detektory kovu - návod na stavbu: princip zapojení a praktické návody na tři konstrukce*. Elektronické hledače. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-220-6.
- (3) TIPLER, P., A a G., Mosca. *Fyzika pro gymnázia: Elektřina a magnetismus*. Praha: Prometheus, 2007. ISBN 978-80-7196-546-6.
- (4) HALLIDAY, D.; RESNICK, R. a WALKER, J. *Fundamentals of Physics*. 10. Hoboken: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-23376-5.
- (5) SKOKAN, V. *Elektřina a magnetismus pro techniky*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010. ISBN 978-80-01-04577-0.
- (6) GARRETT, J. *Metal Detector Basics and Theory*. Online. 2021. Dostupné z: <https://garrett.com>. [cit. 2025-05-11].
- (7) NATIONAL HIGH MAGNETIC FIELD LABORATORY. *Eddy Currents*. Online. 2020. Dostupné z: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy>. [cit. 2025-05-11].
- (8) LOVECPOKLADU.CZ. *Diskriminace*. Online. LovecPokladu.cz. Dostupné z: <https://www.lovecpokladu.cz/slovník-pojmu/diskriminace-17>. [cit. 2025-03-05].
- (9) HARRISON, I. *Understanding Metal Detector Discrimination*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.detectorprospector.com>. [cit. 2025-05-11].
- (10) NATIONAL HIGH MAGNETIC FIELD LABORATORY. *Eddy Currents*. Online. 2020. Dostupné z: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy>. [cit. 2025-05-11].
- (11) *Ruční detektor na rozpoznávání kovových materiálů*. Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014.
- (12) BRYAKIN, Ivan V.; BOCHKAREV, Igor V.; KHRAMSHIN, Vadim R. a GASIYAROV, Vadim R. Overview of Promising Solutions in Subsurface Sounding

Equipment. Online. *Sensors* (14248220). 2023, roč. 23, č. 20, s. 8461-8494. ISSN 14248220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s23208461>. [cit. 2025-03-06].

- (13) LAMMERT BIES © 1997-2021. *Pulse induction metal detector with DSP*. Online. Lammert Bies. 2021. Dostupné z: <https://www.lammertbies.nl/electronics/pi-metal-detector>. [cit. 2025-04-18].
- (14) *MetalDetector.com*. Online. 2023. Dostupné z: https://www.metaldetector.com/blogs/new_blog/understanding-metal-detector-batteries. [cit. 2025-04-18].
- (15) COULDN'T FIND AUTHOR. *Understanding Metal Detector Batteries*. Online. MetalDetector.com. 2023. Dostupné z: https://www.metaldetector.com/blogs/new_blog/understanding-metal-detector-batteries. [cit. 2025-04-18].
- (16) COULDN'T FIND AUTHOR. **Green Cell AGM Baterie 12V 9Ah*. Online. Levne-baterky.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.levne-baterky.cz/Green-Cell-AGM-Baterie-12V-9Ah-d5507.htm>. [cit. 2025-04-18].
- (17) JK. *JK; YouTube*. Online. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=UWdWNnuIJzY>. [cit. 2025-04-18].
- (18) COULDN'T FIND AUTHOR. *STM32 32-bit Arm Cortex MCUs*. Online. STMicroelectronics. 2025. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>. [cit. 2025-05-04].
- (19) COULDN'T FIND AUTHOR. *ESP32*. Online. Espressif Systems. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. [cit. 2025-05-04].
- (20) COULDN'T FIND AUTHOR. *Teensy® 4.0 Development Board*. Online. Couldn't find publisher. Dostupné z: <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>. [cit. 2025-05-04].
- (21) *ATmega328P: DATASHEET*. 2015. Dostupné také z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf.
- (22) COULDN'T FIND AUTHOR. *ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide 3*. Online. — ESP-IDF Programming Guide v5.2.2 documentation. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>. [cit. 2025-05-04].

- (23) *ESP32-WROOM-32: DATASHEET*. 2025. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.
- (24) ALLDATASHEET.COM. *LM2596S PDF*. Online. Couldn't find publisher. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/543794/TI1/LM2596S.html>. [cit. 2025-05-04].
- (25) PAVLESKI, Mirko. *DIY -Spirit PI- ESP32 Smartphone Sensitive Metal Detector*. Online. Hackster.io. Dostupné z: <https://www.hackster.io/mircemk/diy-spirit-pi-esp32-smartphone-sensitive-metal-detector-07d774>. [cit. 2025-05-04].
- (26) ALLDATASHEET.COM. *IRF740 PDF*. Online. Couldn't find publisher. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22400/STMICROELECTRONICS/IRF740.html>. [cit. 2025-05-04].
- (27) *GitHub*. Online. 2006. Dostupné z: https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306. [cit. 2025-05-11].
- (28) COULDN'T FIND AUTHOR. *Global navigation*. Online. GitHub. 2006. Dostupné z: https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306. [cit. 2025-05-11].

Příloha A – Zdrojový kód

```
#include <Arduino.h>

#include <Wire.h>

#include <ESP32Encoder.h>

#include <Adafruit_GFX.h>

#include <Adafruit_SSD1306.h>

// displej

#define SCREEN_WIDTH 128

#define SCREEN_HEIGHT 64

#define OLED_RESET -1

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);

// Piezo

#define PIEZO_PIN 13

// Enkodér

#define ENCODER_A 17

#define ENCODER_B 16

#define ENCODER_BUTTON 4

ESP32Encoder encoder;

volatile bool buttonPressed = false;

// Měření pulzu

volatile bool pulseOngoing = false;

volatile unsigned long startTime = 0;
```

```

volatile unsigned long pulseLength = 0;
volatile unsigned long pulseLengthcomp = 10000;
volatile bool newPulseReady = false;

unsigned long lastBeep = 0;
bool setupDone = false; // určuje, jestli už byl výběr potvrzen

void IRAM_ATTR handleButton() {
    buttonPressed = true;
    pulseLengthcomp = pulseLength;
}

#define COIL_PIN 27 // výstup na cívku
#define COMPARATOR_PIN 2 // vstup z komparátoru
unsigned long lastPulseTime = 0;
bool pulseActive = false;
const int pulseDuration = 1; // délka pulzu (ms)
const int pauseDuration = 2; // pauza mezi pulzy (ms)

void IRAM_ATTR comparatorChangeISR() {
    int state = digitalRead(COMPARATOR_PIN);
    if (state == LOW) {
        startTime = micros();
        pulseOngoing = true;
    } else if (state == HIGH && pulseOngoing) {
        pulseLength = micros() - startTime;
    }
}

```

```

    pulseOngoing = false;
    newPulseReady = true;
}
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("ESP32 startuje...");

    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
        Serial.println(F("OLED nenalezen"));
        while (true);
    }

    display.clearDisplay();
    display.display();

    pinMode(PIEZO_PIN, OUTPUT);
    pinMode(ENCODER_BUTTON, INPUT_PULLUP);
    pinMode(ENCODER_A, INPUT_PULLUP);
    pinMode(ENCODER_B, INPUT_PULLUP);
    pinMode(COIL_PIN, OUTPUT);
    pinMode(COMPARATOR_PIN, INPUT);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCODER_BUTTON), handleButton,
FALLING);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(COMPARATOR_PIN),
comparatorChangeISR, CHANGE);
}
}

```

```

encoder.attachHalfQuad(ENCODER_A, ENCODER_B);

}

void loop() {
  if (!setupDone)
  {
    unsigned long now = millis();

    // Spínání cívky
    if (!pulseActive && now - lastPulseTime >= pauseDuration)
    {
      digitalWrite(COIL_PIN, HIGH); // sepní cívku
      pulseActive = true;
      lastPulseTime = now;
    }

    if (pulseActive && now - lastPulseTime >= pulseDuration)
    {
      digitalWrite(COIL_PIN, LOW); // vypni cívku
      pulseActive = false;

      // OLED výstup pro nastavení citlivosti
      display.clearDisplay();
      display.setTextSize(1);
      display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
      display.setCursor(0, 0);
    }
  }
}

```

```

display.print("Nastav citlivost");
display.setCursor(10, 20);
display.println(pulseLength);
display.display();

}

// Kontrola stisknutí tlačítka
if (buttonPressed) {
    buttonPressed = false;
    setupDone = true;

    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0, 0);
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.println("Citlivost nastavena:");
    display.setTextSize(2);
    display.setCursor(0, 20);
    display.print(pulseLengthcomp);
    display.print(" us");
    display.display();
    delay(2000); // krátké zobrazení potvrzení
}

}

```

```

else {
    unsigned long now = millis();

    // Spínání cívky
    if (!pulseActive && now - lastPulseTime >= pauseDuration) {
        digitalWrite(COIL_PIN, HIGH); // sepní cívku
        pulseActive = true;
        lastPulseTime = now;
    }

    if (pulseActive && now - lastPulseTime >= pulseDuration) {
        digitalWrite(COIL_PIN, LOW); // vypni cívku
        pulseActive = false;

        // Vyhodnocení komparátoru
        if (pulseLength > pulseLengthcomp+10)
        {

            // OLED DETEKCE
            display.clearDisplay();
            display.setTextSize(1);
            display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
            display.setCursor(10, 20);
            display.println(pulseLength);
            display.println(" us");
            display.display();
        }
    }
}

```

```
digitalWrite(PIEZO_PIN, HIGH);

}

else

{

    // OLED režim bez detekce

    digitalWrite(PIEZO_PIN, LOW);

    display.clearDisplay();

    display.setTextSize(1);

    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);

    display.setCursor(10, 20);

    display.println(pulseLength);

    display.println(" us");

    display.display();

}

}

}

}
```