

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DETEKTOR PROTILEHLOSTI

INDICATOR OPPOSITE POSITION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

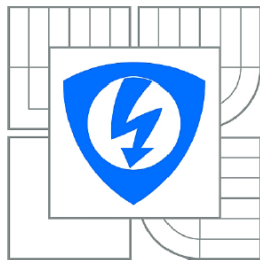
Radek Slavíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Radek Slaviček

ID: 146100

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Indikátor polohy místa za zdí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte relevantní literaturu o rezonančních obvodech a měření síly pole. Provedte návrh zařízení, který bude indikovat přesné místo polohy za zdí. Zařízení bude ukazovat sílu signálu vysílače, podle kterého je schopen uživatel zaměřit jeho přesnou polohu za zdí. Pro zařízení navrhnete vhodné napájecí obvody, obvody pro vysílání a příjem signálu a vhodný typ vysílací i přijímací antény.

Zařízení realizujte, a jeho správnou činnost experimentálně ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SADIKU, M.N.O. Elements of Electromagnetics. Saunders College Publishing. London, 1994.

[2] COLLIN, R.E. Field Theory of Guided Waves. 2nd Edit., IEEE Press, New York 1991.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRACT

V této bakalářské práci jsou objasněny fyzikální základy elektromagnetismu a rezonančního jevu, na kterých je založen princip funkce indikátoru protilehlé polohy. Dokument se podrobněji zabývá magnetickou složkou pole. Uvádí návrhy vysílacích a přijímacích antén pro zařízení a představuje jejich nejvýhodnější řešení. V práci je postupně zdokumentována konstrukce vysílacích a přijímacích obvodů indikátoru protilehlé polohy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Indikátor polohy, detektor, rezonance, indukčnost, poloha, lokátor

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on explaining of basics of electromagnetism and principles of resonant circuits. These solutions are used for design the indicator opposite position. The next step of document is solution by using magnetic field for design of transmitter and receiver antennas for electronics devices. The final products are solved as the best way for the design. Development process is described step by step in individual chapters.

KEYWORDS

Position indicator, detector, resonance, inductance, location, locator

SLAVÍČEK, R. *Detektor protilehlosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zoltán Szabó, Ph.D..

Prohlášení

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

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a 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 25.května 2015

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zoltán Szabó, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování této práce.

V Brně dne 25. května 2015

.....
podpis autora

OBSAH

Obsah	vi
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1. Fyzikální základy	2
1.1 Elektromagnetismus.....	2
1.1.1 Elektromagnetické pole	2
1.1.2 Magnetické pole.....	3
1.1.3 Zákon elektromagnetická indukce	7
1.1.4 Vlastní indukčnost	8
1.1.5 Vzájemná indukčnost.....	9
1.1.6 Činitel vazby	10
1.1.7 Vířivé proudy	11
1.2 Rezonance	11
1.2.1 Sériový rezonanční obvod	11
1.2.2 Paralelní rezonanční obvod.....	14
1.2.3 Vázané rezonanční obvody	16
2. Návrhy antén	19
2.1 Vysílací a přijímací antény	22
2.2 Pozorování a měření	27
3. Realizace	32
3.1 Vysílač	33
3.1.1 Generátor signálu	33
3.1.2 DC-DC měnič	33
3.2 Přijímač.....	35
3.2.1 Ochrana vstupu	35
3.2.2 Zesílení přijatého signálu.....	36
3.2.3 Číslicový přístroj pro měření napětí	36
3.3 Napájecí obvody přijímače	36

4. Závěr	39
Literatura	40
Seznam symbolů, veličin a zkratk	42
A Návrh zařízení	44
A.1 Obvodové zapojení vysílače	44
A.2 Deska plošného spoje vysílače – bottom (strana spojů)	45
A.3 Osazovací schéma vysílače – top.....	45
A.4 Osazovací schéma vysílače - bottom	46
A.5 Obvodové zapojení přijímače	47
A.6 Deska plošného spoje přijímače – bottom	48
A.7 Osazovací schéma přijímače - top	48
A.8 Osazovací schéma přijímače - bottom	49
A.9 Obvodové zapojení zdroje přijímače	50
A.10 Deska plošného spoje zdroje přijímače – bottom	51
A.11 Osazovací schéma zdroje přijímače - top	51
A.12 Osazovací schéma zdroje přijímače - bottom	52
B Seznam součástek	53
B.1 Vysílač	53
B.2 Přijímač.....	54
B.3 Zdroj přijímače	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Časový průběh napětí a proudu v LC článku [1].....	3
Obr. 1.2 LC článek.....	3
Obr. 1.3 Zmagnetování feromagnetického materiálu [2].....	6
Obr. 1.4 Hysterezní smyčka [2]	6
Obr. 1.5 Procházející magnetické indukční čáry smyčkou [3]	7
Obr. 1.6 Indukované napětí v cívce [7]	8
Obr. 1.7 Vzájemná indukčnost cívek [7]	10
Obr. 1.8 Znázornění magnetického pole solenoidu	11
Obr. 1.9 Sériový rezonanční obvod [4].....	11
Obr. 1.10 Rezonanční křivka a fázová charakteristika sériového RLC obvodu [4]	12
Obr. 1.11 Vliv na selektivitu sériového rezonančního obvodu [4]	14
Obr. 1.12 Paralelní rezonanční obvod [4].....	14
Obr. 1.13 Rezonanční křivka a fázová charakteristika paralelního rezonančního RLC obvodu [4].....	15
Obr. 1.14: Vliv na selektivitu paralelního rezonančního obvodu [4].....	16
Obr. 1.15: Vázané rezonanční obvody [4]	17
Obr. 1.16: Křivky selektivity a fázové charakteristiky vázaných rezonančních obvodů [15].....	18
Obr. 2.1 Program mini Ring Core Calculator 1.2	20
Obr. 2.2: Laboratorní zkoušení navržených antén	20
Obr. 2.3 Rezonanční křivka vázaných LC obvodů.....	21
Obr. 2.4 Přijímací rámová anténa [8]	21
Obr. 2.5 Feritová přijímací anténa a její vliv na magnetické pole [8]	22
Obr. 2.6 soustava vysílacích cívek vyzařující kvadrupólové pole.....	22
Obr. 2.7 Simulace kvadrupólové antény.....	23
Obr. 2.8 Různé konstrukce antén.....	23
Obr. 2.9 Testování vzduchové cívky	24
Obr. 2.10 Pavučinová cívka při detekci.....	25
Obr. 2.11 Přijímací anténní soustava	25
Obr. 2.12 Rámová anténa	26
Obr. 2.13 Lorenzova cívka	26

Obr. 2.14 Antény s feritovými jádry	27
Obr. 2.15 Měření protilehlé polohy	28
Obr. 2.16: Hledání minimální intenzity pole.....	28
Obr. 2.17: Poloha cívek „vedle sebe“	29
Obr. 2.18: Poloha cívek při měření „za sebou“	29
Obr. 2.19 Detekování polohy vysílače za překážku	29
Obr. 2.20 Detekce polohy přes fantom stěny.....	30
Obr. 2.21 Velké rozdíly indukovaného napětí	30
Obr. 2.22 Testování detektoru polohy	31
Obr. 2.23 Vnitřní uspořádání přístroje	31
Obr. 3.1 Vysílač a přijímač detektoru protilehlosti	32
Obr. 3.2: Zapojení IO 40106 s RC členem [20]	33
Obr. 3.3 Zvyšující DC – DC měnič [11].....	33
Obr. 3.4 Typické zapojení DC-DC měniče 43[19]	34
Obr. 3.5 Ochrana vstupu operačního zesilovače.....	35
Obr. 3.6 invertující zapojení OZ	36
Obr. 3.7 Zdroj malého záporného napětí	37
Obr. 3.8 Napájecí zdroj digitálního voltmetru	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Permeabilita vybraných látek	5
Tab. 2 Hodnoty rezonanční křivky	20
Tab. 3 Útlum elektromagnetického pole v různých materiálech	28
Tab. 4 Změřené hodnoty naindukovaného napětí v závislosti na poloze a vzdálenosti .	29

ÚVOD

V některých situacích potřebujeme určit protilehlou polohu bodu na stěně nebo na jiné překážce. To ovšem může být problém, a nalezení místa pomocí měření vzdáleností je nejen zdoluhavé, ale i nepřesné a někdy dokonce nemožné. Proto je snahou této práce navrhnout takový přístroj, který splní požadovaná kritéria a bude použitelný v praxi.

Navrhovaný indikátor polohy se skládá z vysílací a přijímací části. Základem vysílače i přijímače jsou LC obvody naladěné na stejnou rezonanční frekvenci. Aktivní vysílací část vyzařuje elektromagnetické pole, které má za následek indukování napětí v přijímacím obvodu. Posunováním přijímače po zdi hledáme místo s největší intenzitou elektromagnetického pole. Jako indikátor nalezení polohy může sloužit ručičkový měřicí přístroj nebo digitální měřidlo s displejem. Hlavní využití se dá očekávat především ve stavebnictví, ale v různých modifikacích jistě i jinde.

Pro pochopení principu funkce navrhovaného zařízení, je třeba znát fyzikální zákony, které indikátor využívá. Jsou to zákony elektromagnetického pole, především jeho magnetické složky a rezonanční jev.

Obzvláště důležitou částí zařízení jsou jeho přijímací a vysílací antény. Jejich návrh, konstrukční řešení, simulace a naměřené výsledky popisuje druhá kapitola.

Možným konstrukčním řešením vysílacích a přijímacích obvodů detekčního zařízení se věnuje poslední kapitola. Podrobně je popsán obvod budícího signálu zdroj vysílací antény a zdroj pro přijímací část zařízení.

1. FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY

Znalost fyzikálních základů je základem úspěšného návrhu přístroje. V následujícím textu jsou vysvětleny principy elektromagnetismu a rezonance, které jsou fyzikální podstatou zařízení.

1.1 Elektromagnetismus

Elektromagnetismem se rozumí soubor jevů, ve kterém se projevuje vzájemná souvislost elektřiny a magnetismu.

1.1.1 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole se klasicky popisuje složením dvou polí: elektrického a magnetického. Tato pole ovlivňují částice s elektrickým nábojem a jsou jimi a jejich pohybem přímo definovány. Elektrické pole vzniká v okolí elektricky nabitých částic, magnetické pole zpravidla vzniká pohybem elektrických nábojů (např. elektrického proudu tekoucího drátem) a jeho důsledkem je také magnetická síla. Vztah mezi magnetickým a elektrickým polem popisují Maxwellovy rovnice.

Toto tvrzení lze předvést na LC obvodu.

Představme si nabitý kondenzátor spojený s cívkou. Co se bude dít:

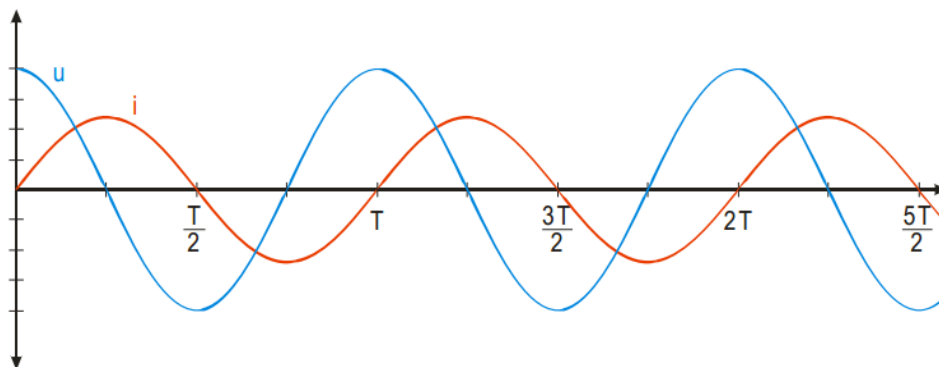
- Kondenzátor je zkratován přes cívku. Začne se vybíjet. Proud však neroste skokově (cívka indukuje protinapětí). $\Rightarrow$ Kondenzátor se vybíjí (a klesá jeho energie). Přes cívku prochází zvětšující se elektrický proud, který vytváří zvětšující se magnetické pole (a zvětšuje energii obsaženou v cívce). $\Rightarrow$ Kondenzátor se vybije (napětí klesne na nulu). Všechna energie přešla do cívky.
- Na deskách kondenzátoru není další náboj, který budil proud. Proud však neklesne na nulu, protože cívka se snaží udržet aktuální stav (průchod proudu) a indukuje proud jdoucí stejným směrem jako dosud. $\Rightarrow$ Kondenzátor se nabíjí na opačnou polaritu než na počátku (energie se přesouvá z cívky zpět do kondenzátoru).
- Proud se postupně zmenšuje a napětí na kondenzátoru roste. $\Rightarrow$ Kondenzátor se nabije na stejné napětí, ale opačnou polaritu (energie se přesune zpět z cívky na kondenzátor). $\Rightarrow$ Vše může začít znovu v opačném směru [1].

kondenzátor shromažďuje elektrostatickou energii.

$$E = \frac{1}{2} C U^2 \quad (1.1)$$

cívka shromažďuje magnetickou energii

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1.2)$$

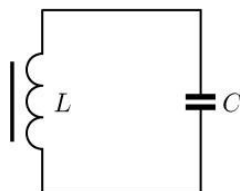


Obr. 1.1 Časový průběh napětí a proudu v LC článku [1]

Z Obr. 1.1 jsou zřejmé maximální hodnoty proudu a napětí v LC článku.

Kondenzátor je nabitý na maximální napětí v okamžicích, kdy je největší okamžitá hodnota napětí $\Rightarrow$ v časech $T/2, T, 3T/2, \dots$

Magnetické pole cívky je nejsilnější v okamžicích, kdy prochází největší okamžitá hodnota proudu $\Rightarrow$ v časech $T/4, 3T/4, 5T/4, \dots$ [1]



Obr. 1.2 LC článek

1.1.2 Magnetické pole

Podrobnější objasnění si zaslouží hlavně magnetické pole a vše co s ním souvisí. Magnetické pole můžeme rozdělit podle závislosti jeho změn na čas.

- Magneto-statické – speciální stacionární pole, které vytvářejí permanentní magnety a zmagnetované látky (zdrojem jsou vázané proudy).
- Stacionární magnetické pole – v čase je neměnné.
- Nestacionární magnetické pole – časově proměnné pole.

Další dělení je podle prostorového rozložení na stejnorodé neboli homogenní a nehomogenní. V dalších kapitolách se bude uvažovat nestacionární (střídavé) magnetické pole s nehomogenním rozložením. Takové pole totiž využívá polohovací zařízení.

Kolem každého vodiče protékaného proudem se vytváří magnetické pole, jehož zdrojem jsou volné nosiče náboje. Pro znázornění magnetických polí byly zavedeny magnetické indukční čáry. Jsou to prostorově orientované uzavřené křivky, které modelují silové účinky magnetických polí vodičů a cívek protékaných proudem. Indukční čáry směřují dohodnutým směrem od severního pólu k jižnímu. V každém bodě magnetického pole lze definovat magnetické napětí U_m , které je vyjádřeno vztahem

$$U_m = NI, \quad (1.3)$$

Přičemž N je počet závitů a I proud tekoucí vodičem. Intenzita magnetického pole H popisuje sílu působící v určitém bodě pole a je definována jako podíl magnetického napětí U_m a délky siločáry l , která tímto bodem prochází. Jednotkou je $A \cdot m^{-1}$. Pro přímý vodič s proudem je magnetická intenzita podle

$$H = \frac{U_m}{l} = \frac{U_m}{2\pi r} \quad (1.4)$$

Magnetická intenzita je vektorová veličina, jejíž směr udává tečna indukční čáry.

Hustota indukčních čar vyjadřuje velikost magnetického indukčního toku ϕ . Jednotkou magnetického toku je *weber* $[Wb]$, podle německého fyzika Wilhelma Eduarda Webera. Je to skalární veličina, pro kterou platí Hopkinsov zákon (analogie Ohmova zákona).

$$\phi = \frac{U_m}{R_m} = U_m G_m \quad (1.5)$$

R_m je magnetický odpor látky neboli reluktance vyjádřená v H^{-1} a G_m je magnetická vodivost, permeance v H . Pro ně platí

$$R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{1}{G_m}, \quad (1.6)$$

kde l je délka, S průřez a μ permeabilita prostředí.

Velikost magnetického pole popisuje magnetická indukce B , jejíž jednotkou je *tesla* $[T]$, podle srbského vynálezce Nikoly Tesly. Je určena velikostí magnetického toku na jednotku plochy.

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (1.7)$$

Magnetické indukční čáry přímého vodiče s proudem mají tvar soustředných kružnic rozložených v rovině kolmé k vodiči, jejichž středy leží v místě průchodu vodiče rovinou. Ve vzdálenosti d od vodiče, jímž teče proud I v prostředí s permeabilitou μ bude působit magnetická indukce podle

$$B = \mu \frac{I}{2\pi d} \quad (1.8)$$

Pokud z vodiče vytvoříme smyčku o poloměru r , ve středu smyčky bude magnetická indukce rovna

$$B = \mu \frac{I}{2r} \quad (1.9)$$

Magnetické pole zesílí, když vytvoříme z vodiče cívku. Ve středu válcové cívky se vytvoří pole o síle

$$B = \mu \frac{NI}{l}, \quad (1.10)$$

kde N je počet závitů a l délka cívky.

Zásadní vliv na velikost magnetické indukce má látka použitá v jádru cívky. Tuto závislost zjistil André Marie Ampère a této vlastnosti později využil Joseph Henry ke konstrukci elektromagnetu. Vlastnost látek mající vliv na velikost magnetické indukce se nazývá permeabilita μ [Hm^{-1}]. Vyjadřuje obecnou schopnost látky vést magnetický tok. Pro porovnání magnetických vlastností látek byla zavedena relativní permeabilita μ_r [-], která se vypočítá jako poměr permeability látky μ a permeability vakua μ_0 .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.11)$$

Přičemž

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1} = 1,2566 \times 10^{-6} Hm^{-1}. \quad (1.12)$$

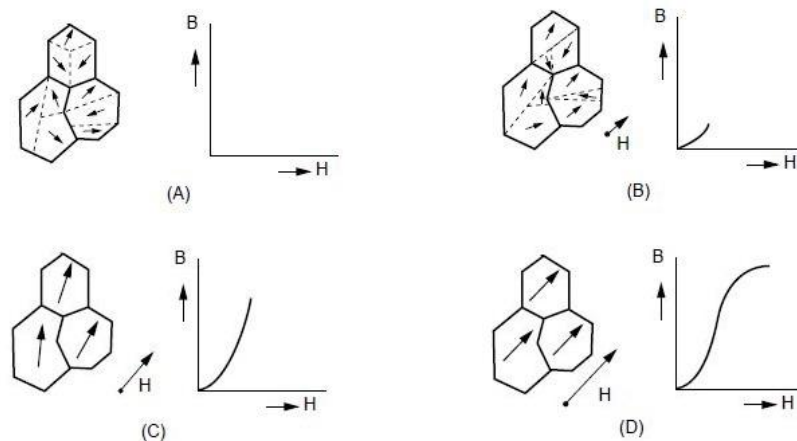
Podle této hodnoty rozdělujeme látky na paramagnetické ($\mu_r > 1$, konstantní), diamagnetické ($\mu_r < 1$, konstantní) nebo feromagnetické ($\mu_r \gg 1$). Feromagnetické materiály nemají za určitých podmínek permeabilitu μ stálou, ale je ovlivňována intenzitou magnetického pole. Navíc vykazují hysterezi, což v tomto případě znamená, že jejich magnetické vlastnosti závisí také ještě na hodnotách magnetického pole, jemuž byly vystaveny v minulosti. Kromě toho, výše uvedená definice platí pro neměnné pole, v případě, že je pole proměnlivé – střídavé, objevuje se také závislost na frekvenci.

Volba materiálu pro zhotovení jader ovlivňuje dosažené vlastnosti a má zásadní vliv pro výrobu a použití cívek. Pro zesílení magnetického pole cívek se využívá jader z feromagnetických materiálů. V Tab. 1 je vidět rozdílnost permeabilit vybraných materiálů. Tato materiálová vlastnost má také vliv na „průchodnost“ překážkou vysílaného pole k přijímací anténě. Ovlivňuje měření protilehlosti a to jak pozitivně, tak negativně. Průchodnost elektromagnetického pole je na permeabilitě materiálu závislá podle (2.1).

Tab. 1 Permeabilita vybraných látek

Materiál	μ_r [-]
permalloy	50 000 - 140 000
železo	300 - 10 000
kobalt	80 - 200
hliník	1,000 023
voda	0,999 991
měď	0,999 990

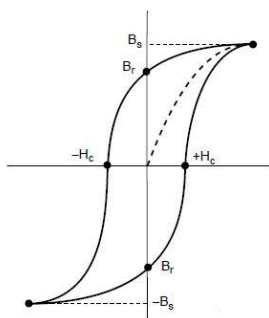
Vysoká μ_r feromagnetických materiálů je způsobena tím, že mezi atomy působí tzv. výměnné síly, které paralelně uspořádají jejich magnetické momenty do tzv. magnetických domén (Weissovy domény), což jsou oblasti se shodně orientovanými magnetickými dipóly. Na Obr. 1.3 vidíme postupné zmagnetování feromagnetického materiálu vlivem intenzity magnetického pole.



Obr. 1.3 Zmagnetování feromagnetického materiálu [2]

V nepřítomnosti vnějšího magnetického pole je směr magnetických momentů jednotlivých domén různý a výsledný magnetický moment látky je tedy nulový. V postupně sílícím magnetickém poli dochází k rozšiřování hranic domén, jejichž dipólový moment je orientován ve směru vnějšího magnetického pole, to vede k značnému zesílení vnějšího magnetického pole. Při vyšší intenzitě vnějšího magnetického pole se magnetické dipólové momenty domén natočí skokem do krystalografického směru, který je nejbližší směru vnějšího magnetického pole. Dojde k magnetickému nasycení látky.

Zvláštní skupinu magnetických materiálů tvoří ferrimagnetické látky čili ferity. Jsou to sloučeniny oxidu železa Fe_2O_3 s oxidy jiných kovů (Mn, Ba...). Ferity se chovají stejně jako ostatní feromagnetické materiály, ale díky použitému výrobnímu procesu (sintrování) mají velmi nízkou elektrickou vodivost (mnohem větší měrný elektrický odpor). Díky nízké elektrické vodivosti v nich při vysokých frekvencích vznikají zanedbatelné ztráty vířivými proudy (viz níže).



Obr. 1.4 Hysterezní smyčka [2]

Protože relativní permeabilita feromagnetických látek není konstantní, závislost magnetické indukce a intenzity magnetického pole není lineární, ale je dána hysterezní smyčkou (Obr. 1.4). Nárůst magnetické indukce díky jádru cívky plyne z následujícího vztahu.

$$B = \mu H, \quad (1.13)$$

kde H je intenzita magnetického pole. Veličina popisující míru silových účinků magnetického pole. Na rozdíl od magnetické indukce nezahrnuje vliv vázaných magnetizačních proudů prostředí, ale pouze "vnějších" zdrojů pole, tedy volných elektrických proudů. Úpravou rovnic (1.10) a (1.13) dojdeme ke vztahu intenzity magnetického pole válcové cívky

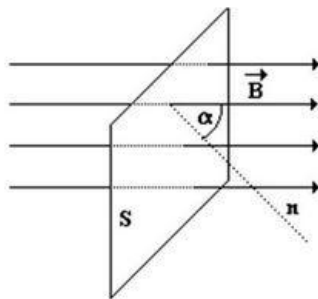
$$H = \frac{NI}{l} = \frac{U_m}{l}. \quad (1.14)$$

1.1.3 Zákon elektromagnetická indukce

Zákon elektromagnetické indukce je fyzikální zákon, který vyslovil v r. 1831 Michael Faraday. Tento zákon pojednává o vzniku elektrického napětí v uzavřeném elektrickém obvodu, který je způsoben změnou magnetického indukčního toku, který protéká smyčkou (obvodem). Z toho vyplývá vztah, který se označuje jako Faradayův zákon elektromagnetické indukce.

$$u_i(t) = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (1.15)$$

kde u_i je indukované elektromotorické napětí a ϕ představuje celkový magnetický tok, který má rozhodující vliv na hodnotu indukovaného napětí. Hodnota indukovaného elektromotorického napětí je rovna časové změně celkového magnetického toku, který prochází smyčkou nebo závity cívky.



Obr. 1.5 Procházející magnetické indukční čáry smyčkou [3]

Tok magnetické indukce se mění se změnou magnetické indukce a protékané plochy, jak je vidět na obrázku 1.5. Tato závislost je vyjádřena vztahem

$$\phi = BS \cos \alpha \quad (1.16)$$

kde B je magnetická indukce, S plocha, kterou prochází magnetické indukční toky a α úhel, který svírá normála plochy s magnetickými indukčními čarami. Pro více závitů platí

$$\phi = NBS \cos \alpha. \quad (1.17)$$

K elektromagnetické indukci může dojít dvojím způsobem.

a) Časovou změnou magnetického toku

Indukované napětí vzniká v uzavřené smyčce, jestliže v její blízkosti působí magnetické pole opětovným zesílením a zeslabením, vznikem a zánikem nebo změnou směru.

$$u_i = \frac{\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1} \quad (1.18)$$

Indikátor využívá časovou změnu magnetického toku, způsobenou změnami směru magnetického pole v čase, jedná se o střídavé magnetické pole.

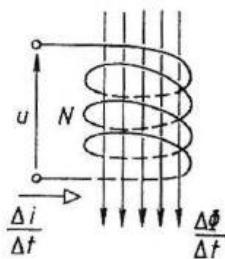
b) Pohybem vodiče v magnetickém poli

Směr indukovaného napětí ve smyčce je určuje Lenzův zákon. Tento zákon říká, že magnetické pole vytvořené indukovaným elektrickým proudem se snaží kompenzovat změny magnetického toku, které jsou odpovědné za vznik indukovaného proudu. Jinými slovy, indukovaný elektrický proud vytváří magnetické pole, které se snaží působit proti změnám, které indukci elektrického proudu způsobují, tedy proti primárnímu magnetickému poli [29]. Tuto skutečnost reprezentuje mínus ve vzorci (1.15).

Indukční zákon tvoří fyzikální základ většiny elektrických zařízení, které slouží k výrobě a přenosu elektrické energie (generátor, transformátor, elektromotor atd.).

1.1.4 Vlastní indukčnost

Z předchozí kapitoly vyplývá, že se v cívce indukuje napětí vždy, když v okolí vodiče nebo v dutině cívky mění magnetický tok. Magnetický tok je funkcí času a v cívce s N závitů se při změně magnetického toku Φ indukuje napětí u_i . To ilustruje obrázek Obr. 1.6.



Obr. 1.6 Indukované napětí v cívce [7]

Vlastní indukčnost dlouhé válcové cívky (solenoidu), při zanedbání rozptylu magnetického pole na krajích cívky se vypočte

$$L = S \frac{\mu N^2}{l} = N^2 G_m, \quad (1.19)$$

kde S je obsah průřezu cívky. Jednoduchou úpravou rovnic (1.10) a (1.19) dostaneme tok válcovou cívkou

$$\phi = S \frac{\mu N^2}{l} I. \quad (1.20)$$

Další úprava rovnic (1.19) a (1.20) vede k základní definici vlastní indukčnosti

$$L = \frac{\phi}{I}. \quad (1.21)$$

Vlastní indukčnost kruhové smyčky lze přibližně určit podle

$$L \approx \mu r \left(\ln \frac{8r}{a} - \frac{7}{4} \right). \quad (1.22)$$

r je poloměr smyčky, a je poloměr průřezu vodiče. Vztah je platný pro smyčku, kde $r \gg a$.

Pro výpočet vlastní indukčnosti specifických cívek s jádry se využívá katalogového listu feritových jader, resp. součinitele indukčnosti A_L . Je to konstanta určená pro každý typ vyráběného jádra, tedy různá pro různý materiál a geometrický rozměr jádra. Součinitel vyjadřuje vlastní indukčnost cívky se sto závitů. Lehce lze tedy spočítat indukčnost při známém počtu závitů vzorcem

$$L = \frac{A_L N^2}{10000}. \quad (1.23)$$

Jednotkou indukčnosti jsou *henry* $[H]$, podle Josepha Henryho, který nezávisle na Faradayovi přišel na zákon elektromagnetické indukce.

1.1.5 Vzájemná indukčnost

Je to indukčnost, která se týká dvou cívek. Cívka 1 je aktivní (primární) a prochází jí elektrický proud, který vybudí magnetický tok ϕ_1 . Druhá cívka 2 je pasivní (sekundární) a není připojena ke zdroji elektrického proudu. Magnetický tok ϕ_1 z části prochází i sekundární cívkou 2, označujeme ho ϕ_{12} a je vybuzen magnetomotorickým napětím cívky 1

$$F_m = N_1 I_1. \quad (1.24)$$

Podle Hopkinsonova zákona platí

$$\phi_{12} = G_{m12} N_1 I_1 \quad (1.25)$$

Magnetické spřažení obou cívek Ψ_{12} dostaneme pomocí

$$\Psi_{12} = N_2 \phi_{12}, \quad (1.26)$$

kde N_2 vyjadřuje počet závitů sekundární cívky. Vztah (1.26) je roven

$$\Psi_{12} = M I_1. \quad (1.27)$$

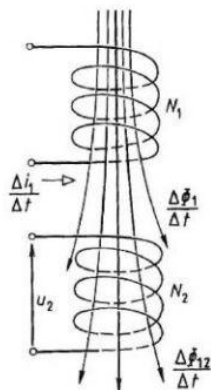
Konstanta M se nazývá vzájemná indukčnost a její jednotkou je *henry* $[H]$.

$$M = G_{m12} N_1 N_2 \quad (1.28)$$

Lze ji dynamicky definovat podle

$$M = \frac{u_2}{\frac{\Delta i_1}{\Delta t}} \quad (1.29)$$

Rovnice určuje napětí u_2 indukované v pasivní sekundární cívce při změně proudu i_1 v primární cívce za jednotku času. Vzájemná indukčnost vyjadřuje míru vzájemné vazby mezi dvěma prvky vlastní indukčnosti. Tuto skutečnost znázorňuje Obr. 1.7 [4].



Obr. 1.7 Vzájemná indukčnost cívek [7]

1.1.6 Činitel vazby

Vlivem rozptylových magnetických toků ϕ_r neprochází sekundární cívkou (a ani primární) magnetický tok celý. Zavádí se proto činitel (koeficient) vazby k (v jiné literatuře také jako χ - kappa).

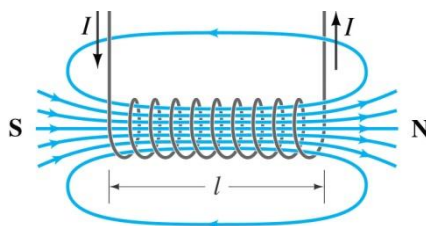
$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1.30)$$

Činitel vazby je bezrozměrný a nabývá hodnot $<0;1>$. V případě $k = 1$ nastává pevná vazba. Je-li $k > 1$ vzniká vazba s rozptylovými toky. Jestli-že $k = 0$ vazba nenastává. U transformátorů napětí se společným jádrem se dosahuje přibližně $k = 0,98$. Tato problematika těsně souvisí s kapitolou 1.2.3 Vázané rezonanční obvody.

Magnetické póly cívek při průchodu elektrického proudu určuje ampérovo pravidlo pravé ruky. Šipky indukčních čar směřují podle dohody od severního pólu k jižnímu. Pravidlo zní následovně:

Cívkou uchopíme do pravé ruky tak, že ohnuté prsty ukazují směr elektrického proudu v jejích závitech. Odtážený palec pak ukazuje severní pól cívky.

Tuto poučku je důležité neopomenout při navíjení cívek a cívkových soustav pro detektor polohy. Důležité je také pro tečkovou konvenci cívek ve schématech. Na Obr. 1.8 je znázorněn solenoid protýkaný proudem.



Obr. 1.8 Znázornění magnetického pole solenoidu

1.1.7 Vířivé proudy

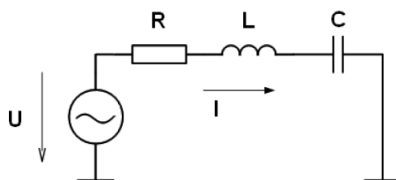
V některé literatuře také jako Foucaultovy proudy. Díky elektrické vodivosti G dochází v kovových předmětech nejen k soustředování magnetických siločar (platí jen pro látky magneticky vodivé), ale v předmětu se indukují i vířivé proudy. Tyto proudy mají vlastní magnetické pole, které zeslabuje původní magnetické pole a způsobuje jeho deformaci. Celková deformace prvotního magnetického pole je závislá na magnetické a elektrické vodivosti kovu. Na principu vířivých proudů pracuje například indukční snímač, indukční vaříč, indukční brzdy nebo frekvenční detektor kovu.

1.2 Rezonance

Rezonanční obvod je komplexní jednobran. Vznikne paralelním nebo sériovým spojením kondenzátoru a cívky. Při jedné, tzv. rezonanční frekvenci se v tomto obvodu vyrovnává kapacitní a induktivní reaktance a rezonanční obvod se pro tuto frekvenci chová jako činný odpor. Stav obvodu, který nastane při rezonanční frekvenci, se nazývá rezonance. Je to jev, při kterém se v obvodu RLC při určitém kmitočtu podstatně zvětší proud u sériového obvodu nebo se podstatně zvětší napětí u obvodu paralelního. Sériový rezonanční obvod má při rezonančním kmitočtu nejmenší impedanci. Paralelní rezonanční obvod má při rezonančním kmitočtu největší impedanci.

1.2.1 Sériový rezonanční obvod

Sériový rezonanční obvod nakreslený na obrázku se skládá ze sériového zapojení ideálních součástí RLC, přičemž rezistor R vyjadřuje ztráty reálného kondenzátoru a cívky.



Obr. 1.9 Sériový rezonanční obvod [4]

Pro impedanci takového obvodu platí

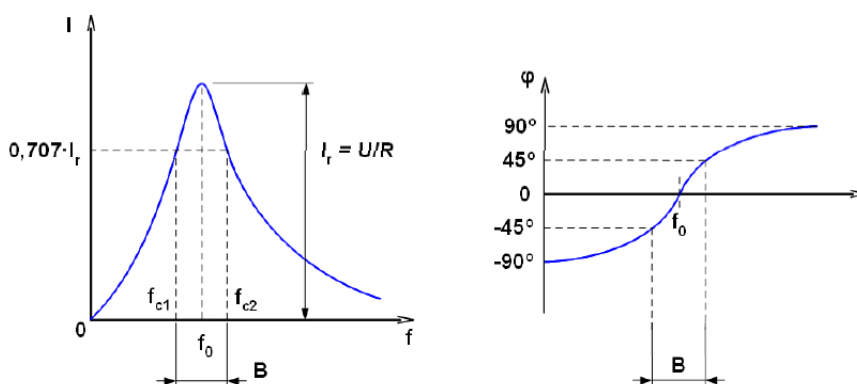
$$Z(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + jX = Ze^{j\varphi}, \quad (1.31)$$

kde Z je celková impedance obvodu, R je velikost sériového odporu, ω je úhlový kmitočet, L indukčnost, C kapacita, j imaginární jednotka.

Budeme-li budít tento obvod ideálním zdrojem harmonického napětí o amplitudě U , závisí velikost proudu tekoucího obvodem na modulu impedance, $|Z|$ a tedy i na kmitočtu signálu zdroje ω podle vztahu

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (1.32)$$

Závislost velikosti proudu na kmitočtu, která je nakreslena na Obr. 1.10 vlevo se nazývá rezonanční křivka. Kmitočtová závislost argumentu (fáze) impedance Z se nazývá fázová charakteristika Obr. 1.10 vpravo.



Obr. 1.10 Rezonanční křivka a fázová charakteristika sériového RLC obvodu [4]

Protože stejnosměrná složka proudu je blokována kapacitou C , vychází rezonanční křivka z nuly. Maxima nabývá v případě, kdy jsou si kapacitní a induktivní reaktance rovny. Jinak řečeno, když reaktance celého obvodu je $X=0$. Tento stav se nazývá sériová rezonance a obvod v něm vykazuje pouze rezonanční odpor R . Dále pak křivka klesá a blíží se limitně k nule. Je zřejmé, že jestli je za rezonance $X=0$, pak modul impedance nabývá své minimální hodnoty $|Z|=R$ a obvodem teče maximální (rezonanční) proud $I_r=U/R$. Kmitočtová závislost fáze impedance sériového rezonančního obvodu (fázová charakteristika) ukazuje, že na kmitočtech nižších než je rezonanční má obvod kapacitní charakter, zatímco na vyšších má charakter induktivní. Impedance kapacitoru je na nízkých frekvencích větší než impedance induktoru a při jejich sériovém spojení se tedy kapacita výrazněji podílí na výsledné impedanci obvodu.

Z podmínky rezonance $X=0$ lze stanovit velmi důležitý Thomsonův vztah pro výpočet rezonančního kmitočtu:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.33)$$

Po úpravě

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (1.34)$$

kde je ω_0 úhlový rezonanční kmitočet a f_0 je rezonanční kmitočet.

Mezní frekvence a šířka pásma

Po stranách rezonančního kmitočtu jsou definovány dva mezní kmitočty f_{c1} a f_{c2} (viz Obr. 1.10), pro které platí podmínka, že velikost reaktance je rovna rezonančnímu odporu $|X|=R$. Na mezním kmitočtu je tedy modul impedance roven

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + R^2} = R\sqrt{2} \quad (1.35)$$

Potom můžeme pro proud I_B na mezním kmitočtu psát

$$I_B = \frac{U}{|Z|} = \frac{U}{R\sqrt{2}} = \frac{I_r}{\sqrt{2}} = 0,707I_r \quad (1.36)$$

Pro poměr proudů I_B a I_r dostaneme vztah pro pokles proudu na mezním kmitočtu v decibelech

$$20\log \frac{I_B}{I_r} = 20\log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3dB \quad (1.37)$$

Pásmo mezi těmito dvěma mezními kmitočty se nazývá propustné pásmo obvodu a definujeme tak šířku propustného pásma jako rozdíl mezních kmitočtů.

$$B = f_{c2} - f_{c1} \quad (1.38)$$

Činitel jakosti

Kvalitu rezonančního obvodu kvantifikujeme činitelem jakosti Q , který je obecně vyjádřen jako poměr energie akumulované v podobě elektromagnetického pole v reaktancích obvodu $\omega_0 A$ a energie, která se mění v teplo P v reálném odporu obvodu.

$$Q = \frac{\omega_0 A}{P} \quad (1.39)$$

Jestliže vyjádříme výkon na induktoru L a výkon na rezistoru R v rezonanci jako $A = \frac{1}{2} LI^2$ a $P = \frac{1}{2} RI^2$, pak můžeme vyjádřit vztah pro činitel jakosti sériového rezonančního obvodu

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}. \quad (1.40)$$

Do čitatele můžeme libovolně dosadit X_L nebo X_C , protože činitel jakosti definujeme za rezonance, kdy platí $X_C = X_L$. Dalším možným způsobem vyjádření činitele jakosti je vztah

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{Z_0}{R}, \quad (1.41)$$

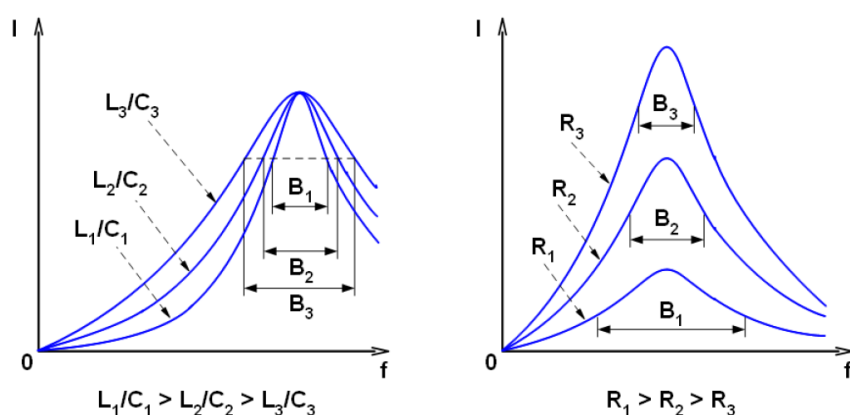
kde Z_0 je charakteristická impedance obvodu. Z Thomsonova vztahu vidíme, že stejnou rezonanční frekvenci lze dosáhnout pro různé kombinace hodnot L a C . Vztah (1.41) nám však říká, že pro různé poměry L/C dostaneme (při konstantním R) různé hodnoty

činitele jakosti obvodu (viz Obr. 1.11). Ze vztahu (1.41) tedy vyplývá, že při volbě velkých hodnot indukčnosti L dostaneme sériový rezonanční obvod s vysokým činitelem jakosti Q a naopak.

Číselník jakosti Q také souvisí s šířkou pásma B a rezonančním kmitočtem f_0 , často používaný vztah zní

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (1.42)$$

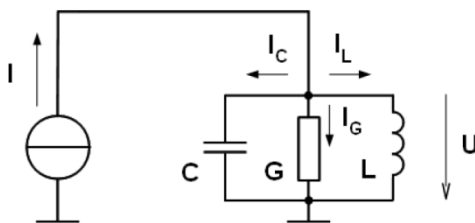
Ze vztahů (1.41) a (1.42) pro číselník jakosti vyplývá souvislost mezi šířkou pásma a odporem R sériového rezonančního obvodu. Zvětšování odporu R (např. vlivem odporu vinutí cívky) má za následek pokles činitele jakosti Q a následné zvětšování šířky pásma obvodu B . Rezananční obvod tím ztrácí svoji selektivitu (viz Obr. 1.11) [4].



Obr. 1.11 Vliv na selektivitu sériového rezonančního obvodu [4]

1.2.2 Paralelní rezonanční obvod

Paralelní rezonanční obvod nakreslený na Obr. 1.12 se skládá z paralelního zapojení ideálních součástek RLC. Vzhledem k paralelnímu zapojení je výhodné počítat s vodivostmi G , admitancemi Y , a susceptancemi B . Vodivost G zde představuje ztráty reálného kondenzátoru a cívky.



Obr. 1.12 Paralelní rezonanční obvod [4]

Pro admitanci takového obvodu platí

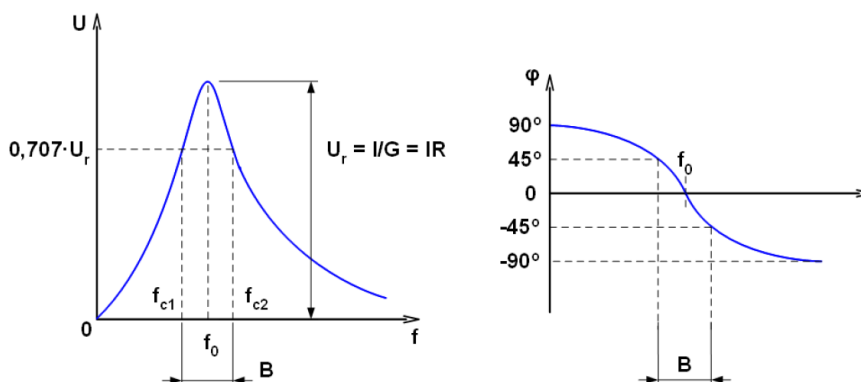
$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = G + jB = Y^{j\varphi} \quad (1.43)$$

Budíme-li obvod ideálním zdrojem harmonického proudu o amplitudě I , závisí

velikost napětí na obvodu U na modulu admitance $|Y|$ a tedy i na kmitočtu signálu zdroje ω .

$$U = \frac{I}{|Y|} = \frac{I}{\sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (1.44)$$

Rezonanční křivka bude v tomto případě zobrazovat závislost velikosti napětí U na kmitočtu, jak ukazuje Obr. 1.13 vlevo. V pravé části obrázku je nakreslena kmitočtová závislost argumentu (fáze) impedance $Z=1/Y$ paralelního rezonančního obvodu.



Obr. 1.13 Rezonanční křivka a fázová charakteristika paralelního rezonančního RLC obvodu [4]

Rezonanční křivka bude vycházet z nuly, protože stejnosměrná složka je zkratována ideálním induktorem L (v reálném případě to není možné, protože na reálné cívce vždy vzniká nějaký úbytek napětí).

Stejně jako u sériového obvodu nabývá rezonanční křivka maxima v případě, kdy jsou si kapacitní a induktivní reaktance rovny $X_C = X_L$ neboli když susceptance celého obvodu je $B=0$. Tento stav se nazývá paralelní rezonance a obvod v něm vykazuje pouze reálnou vodivost G . Dále pak křivka klesá a blíží se limitně k nule. Kmitočtová závislost fáze impedance paralelního rezonančního obvodu (fázová charakteristika) ukazuje, že na kmitočtech nižších než je rezonanční má obvod induktivní charakter, protože impedance induktivní větve je na nízkých kmitočtech menší než impedance kapacitní větve. Na vyšších frekvencích má charakter kapacitní.

Z podmínky rezonance $B=0$ lze opět stanovit Thomsonův vztah, který má stejný tvar jako v případě sériového obvodu:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.45)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.46)$$

Za rezonance obvod vykazuje pouze reálnou vodivost $G=1/R$, kde R je podobně jako u sériového obvodu rezonanční odpor. Velikost napětí na obvodu za rezonance nabývá tedy maxima $U_r = I/G = IR$.

Mezní kmitočty a šířka pásma

Pro mezní kmitočty f_{c1} a f_{c2} platí stejná pravidla jako u sériového obvodu. Šířku propustného pásma odečítáme i zde pro pokles o 3dB, tedy na hodnotě $0,707 U_r$.

Činitel jakosti

Stejným způsobem jako u sériového obvodu můžeme odvodit vztah pro činitele jakosti, který má v tomto případě tvar

$$Q = \frac{R}{X_L} = \frac{1}{GX_L} = \frac{R}{X_C} = \frac{1}{GX_C} \quad (1.47)$$

Nebo

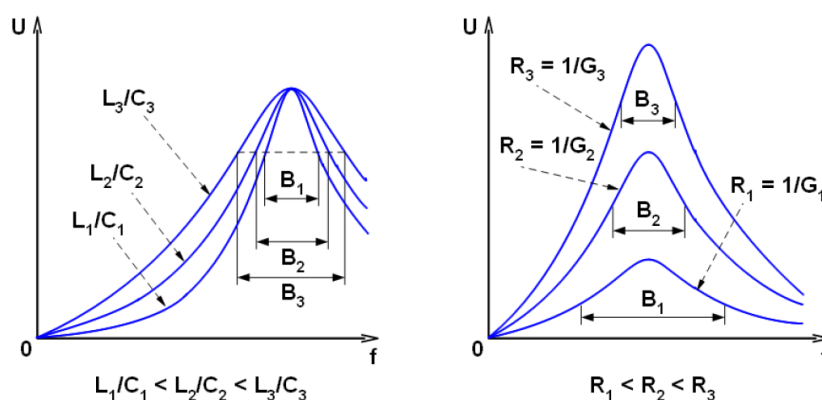
$$Q = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{R}{Z_0} \quad (1.48)$$

Z tohoto vztahu vidíme rozdíl oproti sériovému obvodu. Volbou velké kapacity (nebo malé indukčnosti) v paralelním rezonančním obvodu dostáváme velký činitel jakosti. Vysoký činitel jakosti je tedy dosažen volbou malého poměru L/C .

Činitel jakosti paralelního obvodu má stejnou závislost na rezonančním kmitočtu a šířce pásma jako v případě sériového obvodu

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (1.49)$$

Ze vztahů (1.48) a (1.49) plyne souvislost mezi šířkou pásma a rezonančním odporem. Zmenšování odporu R (nárůst vodivosti G) má za následek pokles činitele jakosti Q a následné zvětšování šířky pásma B . Obvod tak ztrácí svoji selektivitu [4].



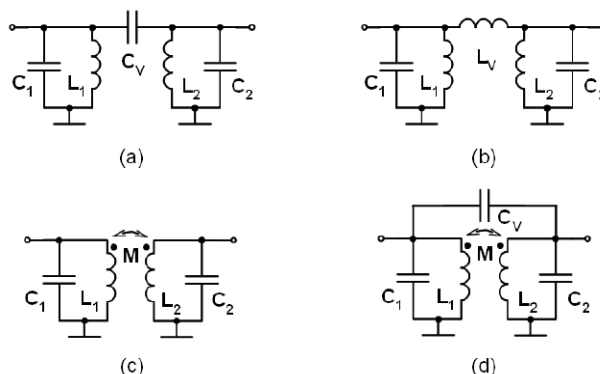
Obr. 1.14: Vliv na selektivitu paralelního rezonančního obvodu [4]

1.2.3 Vázané rezonanční obvody

Vázané rezonanční obvody patří do skupiny selektivních dvojbranů s charakterem pásmové propusti. Jsou tvořeny dvěma rezonančními obvody konstrukčně upravenými tak, aby část signálu, obvodu primárního pronikla do obvodu sekundárního a naopak. Toto vzájemné ovlivňování obvodů se nazývá vazba obvodů. Možné způsoby vazby

jsou elektrickým nebo magnetickým polem, případně jejich kombinací [4].

- Vazba elektrickým polem - vazební kondenzátor – Obr. 1.15a
- Vazba magnetickým polem
 - 1) vazební cívkou – Obr. 1.15b
 - 2) vzájemnou indukčností – Obr. 1.15c
- Vazba kombinací el. a mag. pole (různé možnosti) – Obr. 1.15d



Obr. 1.15: Vázané rezonanční obvody [4]

Dále zaměřeno pouze na indukční vazbu. Při této vazbě se indukuje do druhého obvodu elektromotorická síla vlivem vzájemné indukčnosti M . Velikost signálu pronikajícího z primárního obvodu do sekundárního a naopak se posuzuje tzv. součinitelem vazby, jak už bylo řečeno v kapitole 101.1.6.

$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1.50)$$

kde L_1 a L_2 jsou indukčnosti cívek a M vzájemná indukčnost.

Vazby využívající vzájemné indukčnosti mají znaménko součinitele vazby závislé na smyslu vinutí cívek. Součinitel vazby je v případě indukční vazby (kvůli vzájemné indukčnosti M) závislý na velikosti: budícího (vstupního) proudu I_1 (čím vyšší proud, tím lepší vazba); na vzdálenosti primárního a sekundárního obvodu (cívek) (čím blíže, tím lépe) a na frekvenci signálu (nejlépe $f_{01} = f_{02}$).

V praxi se používají pouze vázané obvody složené z rezonančních obvodů naladěných na stejný rezonanční kmitočet. Za tohoto předpokladu se dvojice obvodů, i když se skládá z obvodů různě tlumených, chová tak, jako by byla složena z obvodů se stejným činitelem jakosti

$$Q = \sqrt{Q_1 Q_2} \quad (1.51)$$

a stejnými tlumícími odpory.

$$R_p = \sqrt{R_{p1} R_{p2}} \quad (1.52)$$

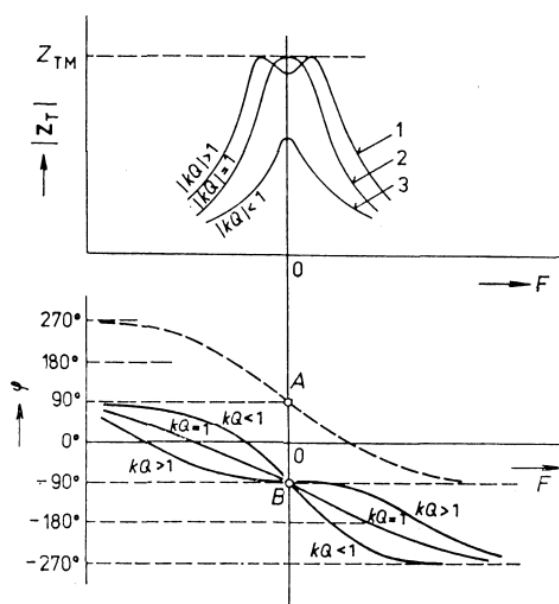
Nejdůležitější veličinou pro posuzování dvojice vázaných rezonančních obvodů je

jejich přenosová (tranzitní) impedance

$$Z_t = \frac{u_2}{i_1} \quad (1.53)$$

kde u_2 je napětí sekundárního obvodu a i_1 je vstupní proud primárního obvodu.

Součin kQ se nazývá stupeň vazby. Jeho velikost je určující veličinou pro průběh křivek selektivnosti i fázové charakteristiky. Stupeň vazby $kQ < 1$ charakterizujeme jako podkritickou vazbu (volnou), vazba kritická nastává při $kQ = 1$ a $kQ > 1$ charakterizujeme jako vazbu nadkritickou (těsná vazba) [15], [16].



Obr. 1.16: Křivky selektivnosti a fázové charakteristiky vázaných rezonančních obvodů [15]

Jak z obr. 1.11 vidíme, pro podkritickou a kritickou vazbu mají křivky selektivnosti jediný vrchol při rezonančním kmitočtu. Pro vazbu nadkritickou dochází ke snížení impedance na rezonančním kmitočtu a na křivkách vznikají dva vrcholy, které jsou souměrné podle osy rezonančního kmitočtu. Maximální hodnota impedance je pro vazbu kritickou a nadkritickou stejná [15].

2. NÁVRHY ANTÉN

Předpokladem pro správné detekování polohy protilehlého bodu za překážkou je kvalitní návrh vysílacích a přijímacích LC obvodů. Z teorie rezonančních obvodů vyplývá, že je vhodné na vysílací straně použít anténu konstruovanou jako sériový rezonanční obvod – SRO a na přijímací straně paralelní rezonanční obvod – PRO. Experimentálně byla vyrobena a ozkoušena řada různých vysílacích a přijímacích antén. Některé z nich byly simulovány programem FEMM. Lišily se hodnotami indukčnosti L a kapacitou C , odporem vinutí R , tvarem, velikostí, průřezem vodiče, použitým materiálem jádra, jejich polohou umístění. Jejich konstrukce má samozřejmě zásadní vliv na indukci napětí v sekundárním přijímacím obvodu a tím i na přesném zaměření hledané polohy. Antény byly navrhovány především na rezonanční frekvenci $f_0 = 280\text{KHz}$. Testování ale probíhalo také na $f_0 180\text{KHz}$ a 450KHz .

Zvolený rezonanční kmitočet ovlivňuje výsledné vlastnosti přístroje. Pro dosažení maximální citlivosti detekce je třeba volit vysoké frekvence. Ovšem na druhou stranu se absorpce elektromagnetického pole zvětšuje s odmocninou kmitočtu. Například hlinité půdy vykazují poloviční útlum při kmitočtu 1 MHz a při dalším zvyšování kmitočtu absorpce prudce stoupá. Prostupnost elektromagnetického pole je definována hloubkou vniku d . Rozumíme tím vzdálenost, na které se v daném materiálu amplituda elektromagnetické vlny utlumí e - krát, kde e je Eulerovo číslo. Hloubku vniku lze určit vztahem

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu f}}, \quad (2.1)$$

kde σ je vodivost prostředí a μ je permeabilita prostředí. Ze vztahu je patrné, že hloubka vniku klesá s rostoucí měrnou vodivostí materiálu a rostoucím kmitočtem[5]. Permeabilita se výrazně uplatní pouze v magneticky vodivých látkách.

Jestliže budeme vysílací anténu budít zdrojem signálu o frekvenci 280KHz, potom navržené hodnoty kondenzátorů a cívek musí být takové, aby rezonanční frekvence vysílacího i přijímacího LC obvodu byla 280KHz. Hodnoty součástek vypočítáme pomocí Thomsonova vztahu

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

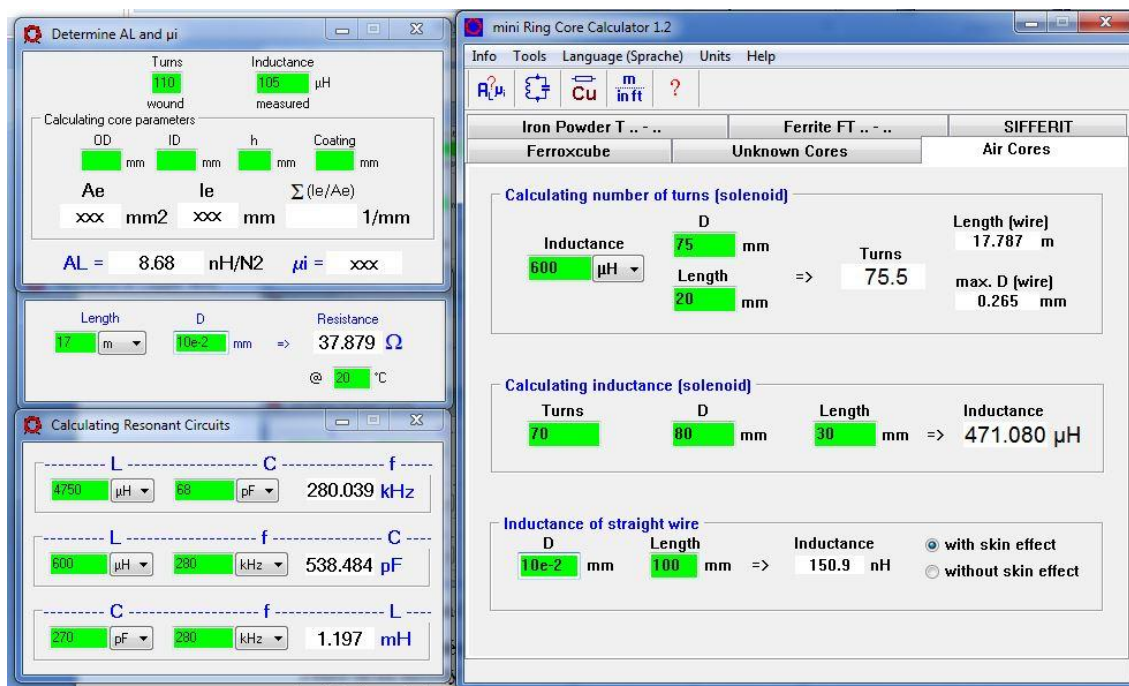
Pro výpočet kapacity C platí

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L} \quad (2.3)$$

a pro výpočet indukčnosti L

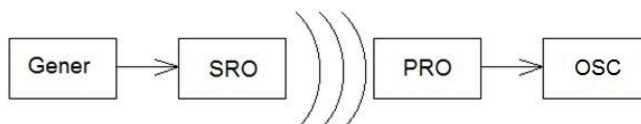
$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \quad (2.4)$$

Pro výpočet parametrů cívek byl využit také program mini Ring Core Calculator 1.2. Možnosti výpočtů programem jsou zřejmé z Obr. 2.1, kde jsou vidět hodnoty některých konkrétních navinutých cívek.



Obr. 2.1 Program mini Ring Core Calculator 1.2

Pro měření rezonanční frekvence a experimenty s vysílacími a přijímacími LC obvody je vhodné využít generátor a osciloskop. Blokové schéma měřící soustavy je na Obr. 2.2. Postup měření je snadný. Generátorem nastavíme přibližně požadovanou rezonanční frekvenci vysílacího sériového LC obvodu vypočítanou pomocí Thomsonova vztahu. Jemným laděním generátoru se snažíme docílit největší amplitudy napětí zobrazené na osciloskopu. Při tomto měření musíme ale počítat s parazitní kapacitou přívodních kabelů.

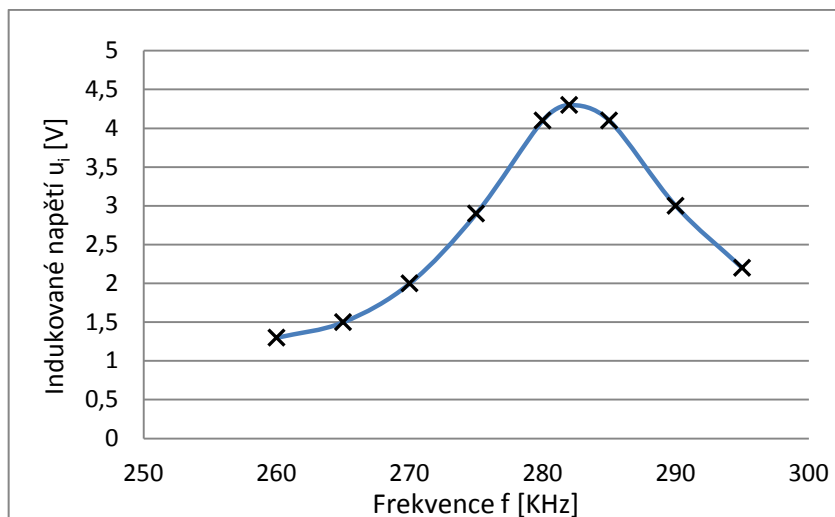


Obr. 2.2: Laboratorní zkoušení navržených antén

Změřené hodnoty indukovaného napětí pro konkrétní vázané LC obvody v okolí rezonanční frekvence jsou v Tab. 2 a vyjádřeny graficky na Obr. 2.3, kde $F_0 = 282\text{ KHz}$. Pro každý měřený vázaný obvod vychází tato charakteristika odlišně. To je dáno různým činitelem jakosti Q .

Tab. 2 Hodnoty rezonanční křivky

f [kHz]	260	265	270	275	280	282	285	290	295
U [V]	1,3	1,5	2,0	2,9	4,1	4,3	4,1	3,0	2,2

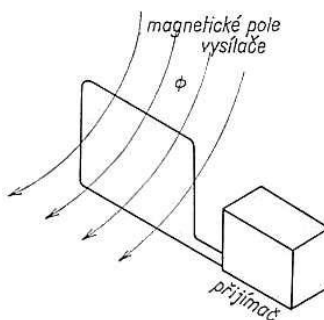


Obr. 2.3 Rezonanční křivka vázaných LC obvodů

Jak na přijímací straně tak na vysílací se experimentovalo s dvěma druhy antén. Obě uplatňují velkou měrou magnetickou složku elektromagnetického pole.

- **Rámová anténa**

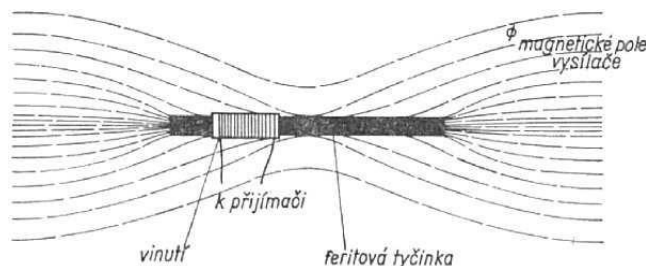
Tento druh antény využívá magnetické složky elektromagnetického záření, které se indukuje v závitech cívky. Smyčka (cívka) se obvykle namotá na obdélníkový rám a její konce se propojí se vstupními svorkami přijímače. Rámová anténa má osmičkovou charakteristiku s širokým neostrým maximem, takže největší napětí přijímá při nasměrování plochy smyčky k vysílači. Napětí je tím větší, čím má rám větší účinnou plochu a počet závitů. Velikost rámu má však své omezení dané vstupním laděným obvodem [8].



Obr. 2.4 Přijímací rámová anténa [8]

- **Feritová anténa**

Je založena na stejném principu jako rámová anténa. Rám (cívka) má miniaturní rozměry a do jeho dutiny je vložena feritová tyčinka. Velká magnetická vodivost feritové tyčinky způsobuje deformaci magnetického pole, které se v ní soustřeďuje a vinutím prochází velký magnetický tok. Velikost indukovaného napětí závisí na parametrech jako u rámové a navíc na permeabilitě feritu a na poměru délky feritu k průřezu. Problémy s příjmem může způsobit nf nebo stejnosměrné magnetické pole [8].

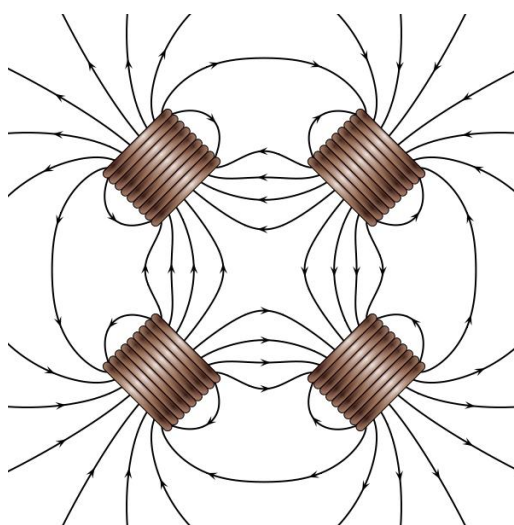


Obr. 2.5 Feritová přijímací anténa a její vliv na magnetické pole [8]

Nutné je dodat, že každá přijímací anténa má jiné výsledky pro odlišnou vysílací anténu. Bylo tedy třeba provést množství měření. Dále jsou uvedeny pouze zajímavější proměřené antény a anténní soustavy.

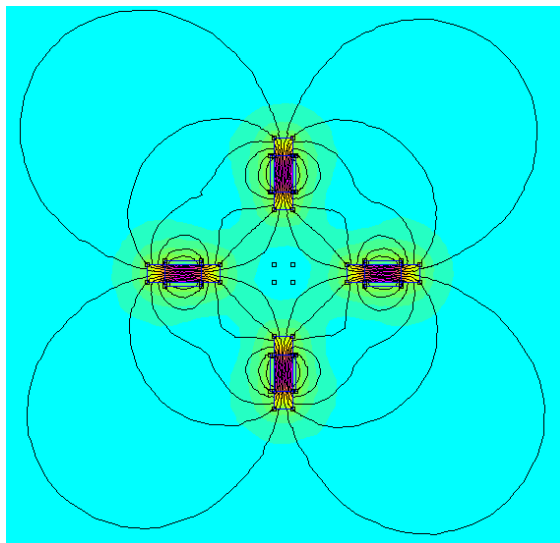
2.1 Vysílací a přijímací antény

Pro vysílací část byla navržena kvadrupólová feritová anténa. Jedná se o soustavu čtyř malých solenoidů s feritovým jádrem v sériovém zapojení. Rozmístění cívek je do kříže a od středu jedné cívky do středu druhé jsou vzdáleny 70mm. Každá cívka má navinutých 110 závitů a jejich indukčnost $L = 105\mu\text{H}$. Je důležité, aby všechny cívky byly co nejvíce podobné, a to kvůli souměrnosti vyzařujícího pole. Celková indukčnost sériového zapojení je $405\mu\text{H}$, to je způsobeno jejich vzájemnou indukčností. Anténa vysílá elektromagnetické pole s frekvencí $F_0 = 280\text{KHz}$ a je do této frekvence rezonančně naladěna. Kondenzátor antény má podle Thomsonova vztahu kapacitu $C = 80\text{pF}$. Velmi důležitý je smysl vinutí cívek, tedy správné uspořádání magnetických polí solenoidů. Tato vysílací anténa se osvědčila velice dobře, proto byla umístěna do vysílače, jak je vidět na Obr. 3.1 vlevo. Obr. 2.6 kvadrupólové pole objasňuje. Magnetické indukční čáry směřují od severního pólu k jižnímu. Uprostřed soustavy je pole teoreticky nulové, protože se póly navzájem odpuzují.



Obr. 2.6 soustava vysílacích cívek vyzařující kvadrupólové pole

Tato soustava byla také simulována v programu FEMM.4.2. Jde o simulátor dvourozměrného zobrazení magnetických polí a dalších jevů. Výpočty jsou založeny na metodě konečných prvků. Pole simulované vysílací antény je na Obr. 2.7.



Obr. 2.7 Simulace kvadrupólové antény

Parametry vysílací antény byly uznány za vyhovující. Proto se práce zaměřila na najít ideální přijímací antény pro vysílač. Testována byla řada cívek vzduchových i s feritovým jádrem Na

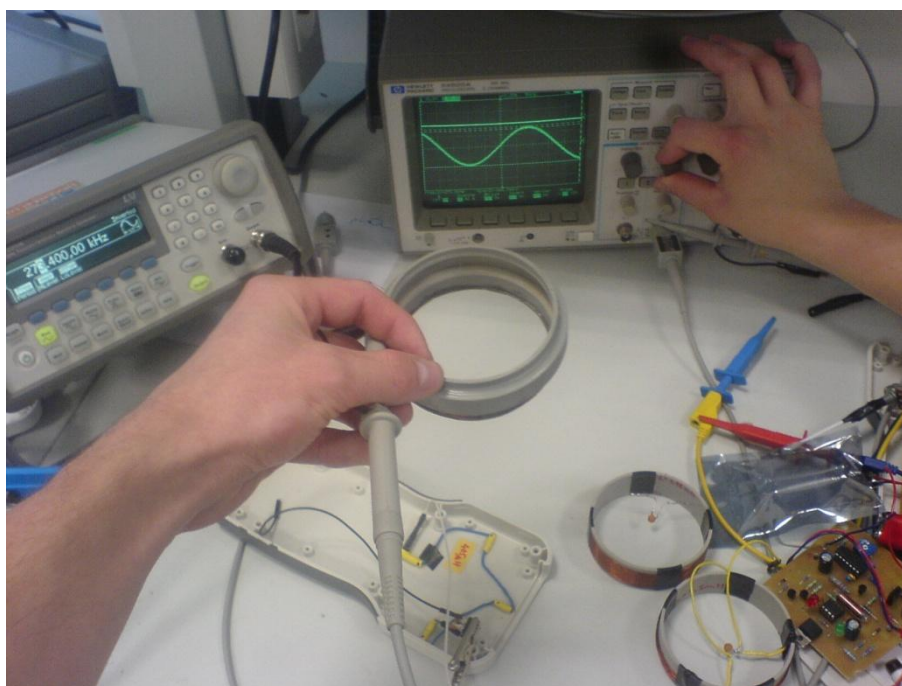
Obr. 2.8 jsou vidět popisované a některé další vysílací a přijímací cívky.



Obr. 2.8 Různé konstrukce testovaných antén

Jednoduchým řešením bylo navinout cívky s průměrem 75mm a 80mm, což je velikostní limit vzhledem k umístění cívky do krabičky přístroje. Vyrobeny byly čtyři podobné vzduchové cívky lišící se indukčností L , tím byl sledován odlišný činitel jakosti Q . Detekování těmito cívkami ve větších vzdálenostech (30-50cm) nebylo špatné, napětí se v nich indukuje dobře, ale pro detekování v blízkosti pole nejsou příliš vhodné. Největší příjem totiž mají na okrajích „ramen“ kvadrupólové antény. Vycentrováním vysílače a přijímače na střed indukuje kruhová cívka poloviční napětí oproti maximálním hodnotám. Tyto antény nedetekují tedy zcela správně. Měření s těmito cívkami je na

Obr. 2.9. Lze si všimnout kvadrupólového vysílače, do něhož pouští generátor signál s $f=278,4\text{kHz}$. Na osciloskopu je vidět sinusový průběh indukovaného signálu v přijímací anténě. Na stole jsou připraveny další přijímací vzduchové cívky.

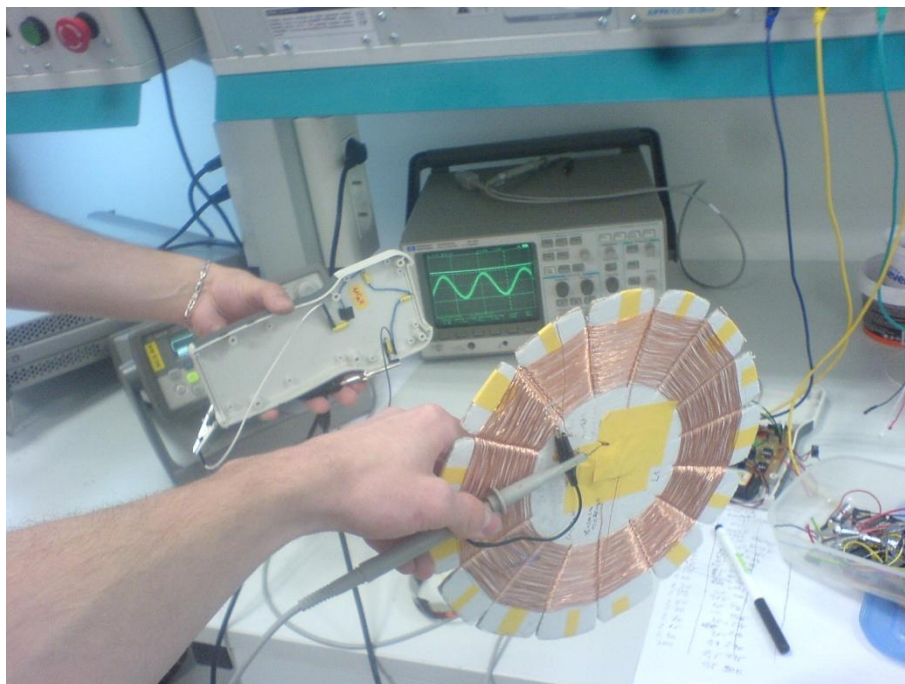


Obr. 2.9 Testování vzduchové cívky

Další zkonstruovanou a testovanou cívkou byla tzv. pavučinová. (možné také najít pod heslem spider coil) Jedná se v podstatě o spirálovou cívku proplétanou do tvrdé ploché kostry. Tato konstrukce se nečekaně osvědčila. Díky své ploše, tvořené spirálovitě navinutým vodičem, prochází cívkou velký magnetický tok od vysílače. Velká účinná plocha cívky také velice dobře určuje přesnou polohu již od několika málo centimetrů až po vzdálenosti 1,5 až 2 metrů při buzení vysílače frekvencí 280kHz a $V_{PP}=10\text{V}$. Z pohledu dosahu je tato cívka rozhodně nejlepší navrženou konstrukcí. Parametry cívky: $L=2,82\text{mH}$, $N=120$, $d_{vnější}=200\text{mm}$, $d_{vnitřní}=80$. Na

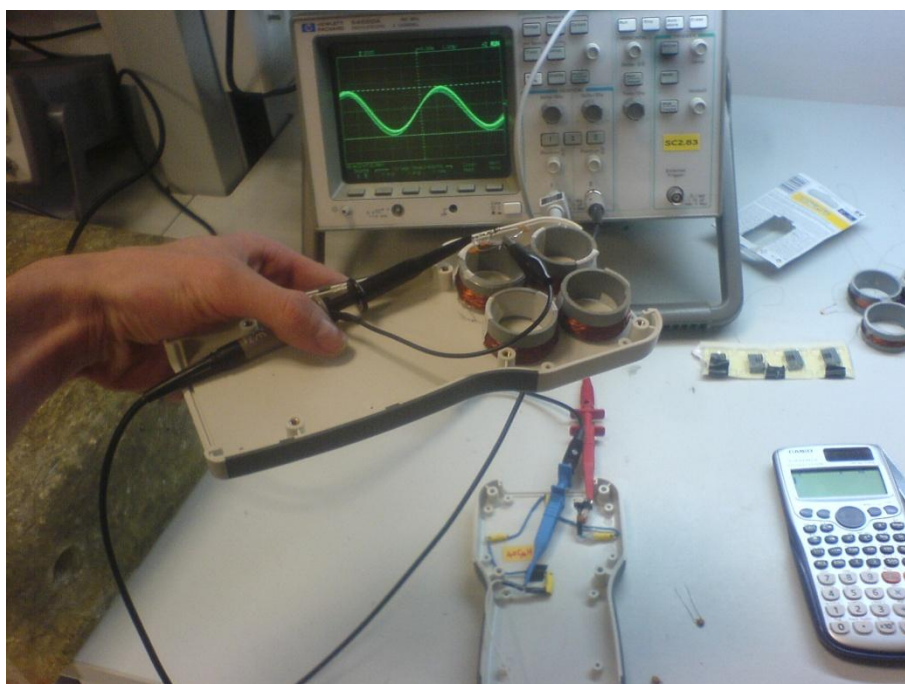
Obr. 2.10 je anténa zobrazena při měření. Protože se cívka osvědčila, byla vyrobena další menší verze, která se vejde do přístrojové krabičky. Její průměr je 80mm a je vyladěna na $F_0=250\text{kHz}$. Další výhodou je, že zabírá velice málo prostoru a je lehká. Na

Obr. 2.8 je to cívka s modrou konstrukční kóstrou.



Obr. 2.10 Pavučinová cívka při detekci

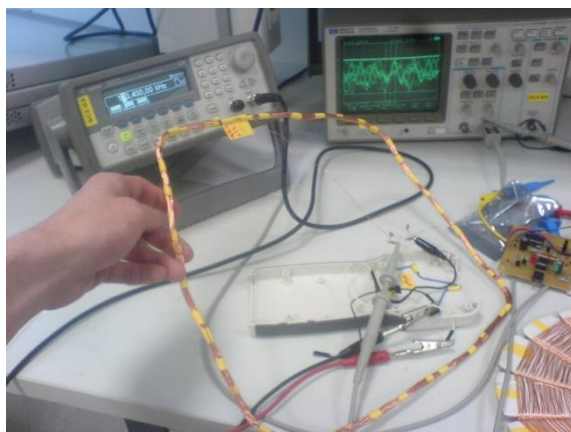
Velice kvalitní se ukázala také soustava čtyř přijímacích antén. Vzduchové cívky jsou navinuty na plastové obroučky a stejně jako u kvadrupólového vysílače spojeny do série. Pro správnou funkci musí být dodržena opět tečková konvence cívek. Hlavní výhodou této antény je možnost měření přesné polohy již od samotného vysílače, což dělalo jiným anténám potíže. Dosah antény je také velmi dobrý, ne však jako u pavučinové. Při detekci je zobrazena na Obr. 2.11.



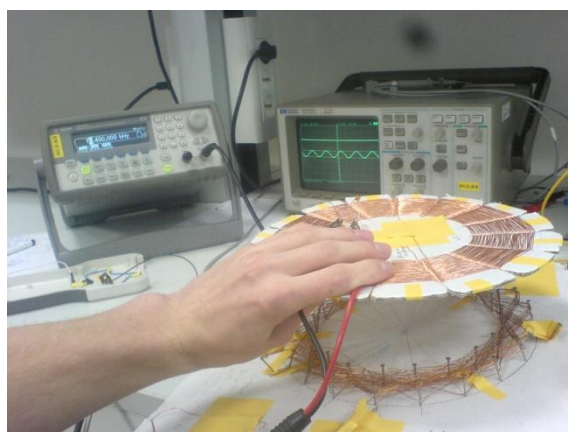
Obr. 2.11 Přijímací anténní soustava

Výsledky z testování velké rámové cívky potvrzují teorii o tom čím větší je obsah cívky, tím je příjem silnější. Zde to platí alespoň pro příjem rušivých signálů. Pro detektor polohuje tato velká rámová anténa nevhodná.

Již od pohledu je zajímavá Lorenzova cívka. Vyrábí se proplétáním na hřebíkové kostře, ze kterých je po dokončení vinutí sundána a vhodně zafixována. Je to cívka hojně využívaná pro pulzní detektory kovů a vyznačuje se nízkou parazitní kapacitou vinutí. Měřením však nebyly zaznamenány přesvědčivé hodnoty o kvalitách této cívky pro detekci polohy.

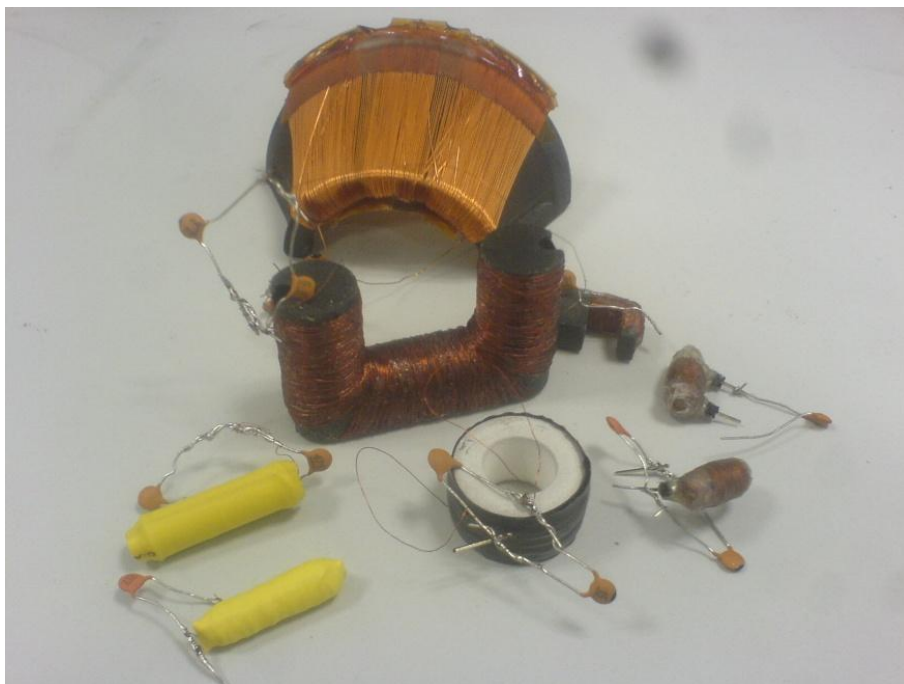


Obr. 2.12 Rámová anténa



Obr. 2.13 Lorenzova cívka

Z teorie je známo, že materiály s vysokou permeabilitou silně přitahují magnetické pole. Tento efekt využívají feritové antény. Pokusy s přijímacími cívkami navinutými na feritová jádra zaznamenaly menší úspěch než rámové antény. Je to ale nejspíše dáno konstrukcí vysílací antény. Byly odzkoušeny různé tvary a druhy materiálů jader. Na snímku Obr. 2.14 jsou některé testované antény vyobrazené. Experimenty probíhaly s jednoduchými solenoidy, E jádry, U jádry, toroidy navinutými po obvodu. Za zmínku stojí pokusy s velkými feritovými jádry z vysokonapěťových transformátorů z CRT televize a vychylovací cívky obrazovek. Při pokusech s nimi se potvrdil fakt, že jsou tyto antény velice silně rušeny stejnosměrnými magnetickými poli a nízkofrekvenčními signály. I na rezonančním kmitočtu byla amplituda indukovaného napětí velice nezřetelná kvůli stálému rušení.



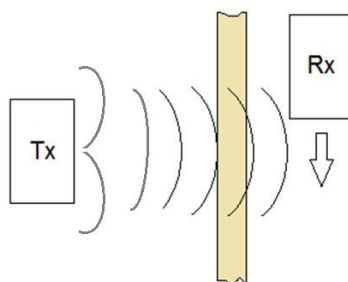
Obr. 2.14 Antény s feritovými jádry

2.2 Pozorování a měření

Měřením přijatého signálu v přijímacích anténách bylo zjištěno několik závislostí a vlastností zkonstruovaných antén. Ty jsou ovšem specifické pro konkrétní dvojici vysílací a přijímací antény. Záleží na geometrii antén, poloze, vzdálenosti a dalších faktorech. Zajímavá zjištění jsou zde popsána.

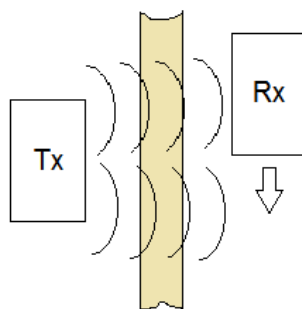
Pro detekování přesné polohy požadujeme, aby citlivost přijímače byla největší v ose vysílací antény. Tedy nejen, aby charakteristika vyzařovací antény byla souměrná. Ale také aby přijímač měl takové geometrické parametry, a mohl detekovat osu vysílače. Záleží na velikosti vysílací a přijímací antény, jejich tvarech a vzdálenosti.

Zajímavý jev je pozorován u antén s kvadrupólovým, vyzařovacím polem. Jak ale bylo řečeno, pro každou dvojici antén jsou výsledky odlišné. V blízkosti vysílače bylo zaznamenáno vzduchovou smyčkovou anténou ($d=75\text{mm}$) nejsilnější pole u okrajů vysílací antény. Čím dál je přijímač oddalován od vysílače detekce nejsilnějšího pole se blíží středu vysílací antény. Dále byla použita pro příjem pavučinová anténa, detekovala střed vysílací antény daleko blíže. Napětí se indukuje v široké cívce daleko lépe a střed vysílače lze daleko snáz určit. Nejlepší detekce středu byla zaznamenána soustavou čtyř smyčkových vzduchových antén. Pro lepší pochopení a znázornění situace je Obr. 2.15 (každá křivka vyjadřuje hodnotu intenzity v určité poloze). Samozřejmostí je že u všech přijímacích antén indukované napětí se vzdáleností zmenšovalo.



Obr. 2.15 Měření protilehlé polohy

Vlastnost kvadrupólové antény, tedy to že v jejím středu je pole slabé vzájemným rušením shodných magnetických pólů, lze v její blízkosti využít a detekovat polohu nejmenším indukovaným napětím. Tato metoda je na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Lze ovšem využít pouze v blízkosti vysílacího kvadrupólu a opět vhodnou anténou.



Obr. 2.16: Hledání minimální intenzity pole

Cílem jednoho z měření bylo zjistit vliv materiálu překážky, na pronikání elektromagnetické pole. K měření byly použity dvě stejné antény konstruované válcovou cívku s feritovým jádrem a 370-ti závitů, $L=1,37\text{mH}$ a kondenzátorem $C=220\text{pF}$, rezonanční frekvence tedy 290kHz . Poloha při měření byla stejná. Cívky byly od sebe vzdáleny 5cm . Naměřené hodnoty jsou v Tab. 3

Tab. 3 Útlum elektromagnetického pole v různých materiálech

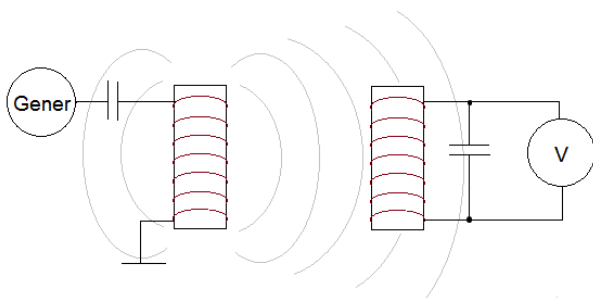
	Vzduch	Karton 10mm	Dřevo 15mm	Mokrá houba 20mm	Fe plech 1mm
f [kHz]	U_2 [V]	U_2 [V]	U_2 [V]	U_2 [V]	U_2 [V]
290	0,54	0,54	0,51	0,43	0,22

Pro pochopení vyzařování solenoidové cívky s jádrem byl proveden další při $f_0=280\text{kHz}$. Indukované napětí v sekundárním obvodu bylo měřeno v závislosti na poloze a oddalování cívek od sebe. Experiment je zaznamenán v Tab. 4 pro dvě polohy. V prvním případě pro polohu „vedle sebe“ zobrazenou na Obr. 2.17 a v druhém pro polohu „za sebou“ zobrazenou na Obr. 2.18. Na generátoru bylo nastaveno napětí

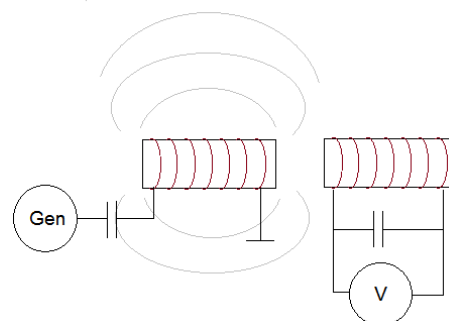
$$V_{pp}=4V.$$

Tab. 4 Změřené hodnoty naindukovaného napětí v závislosti na poloze a vzdálenosti

	l [cm]	0	0,5	1	2	3
Vedle sebe	U [V]	3	1,5	0,7	0,4	0,1
Za sebou	U [V]	2,2	0,8	0,36	0,06	0,03



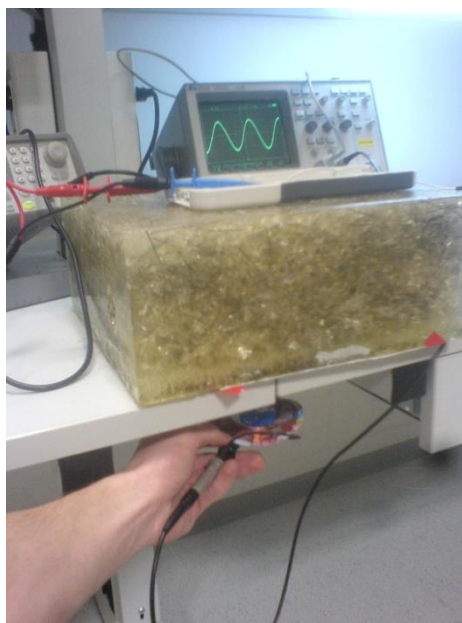
Obr. 2.17: Poloha cívek „vedle sebe“



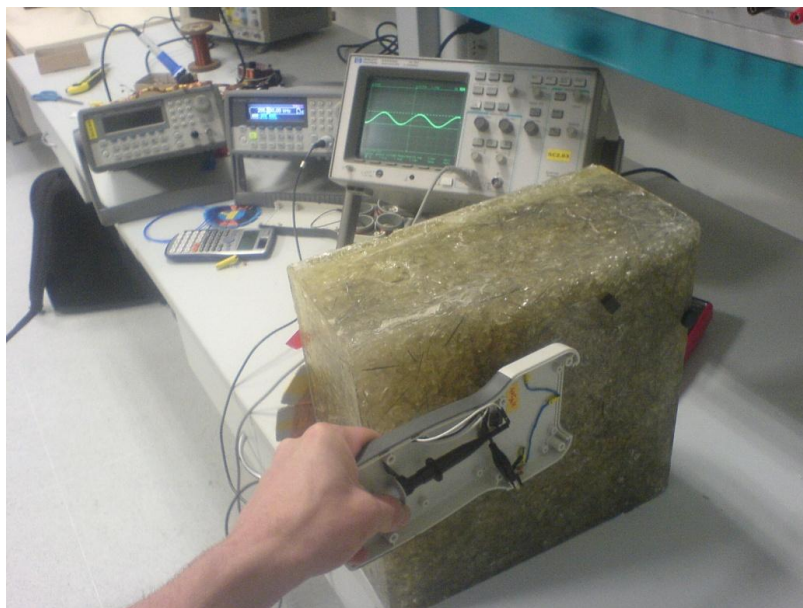
Obr. 2.18: Poloha cívek při měření „za sebou“

Po porovnání výsledků tohoto měření a je zřejmé, že poloha cívky je velice důležitá a nevyzařuje na všechny strany stejně.

Podobný pokus jako se solenoidy v Tab. 3 proběhl i s jinými vysílacími a přijímacími cívkami. Na Obr. 2.19 a Obr. 2.20 je vidět měřící pracoviště s překážkou demonstrující stěnu. Na odvrácené straně přijímá pavučinová cívka signál, který je zobrazen na osciloskopu.



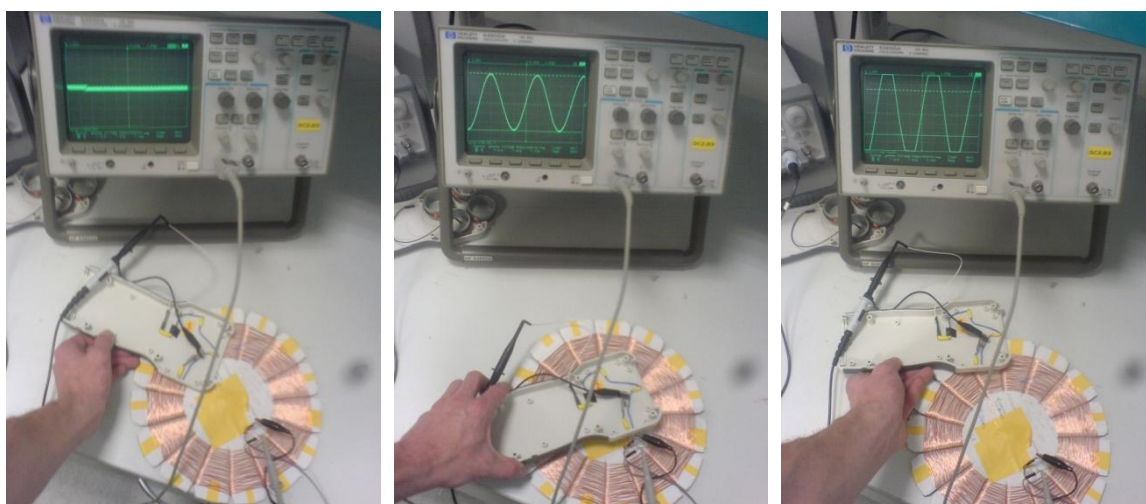
Obr. 2.19 Detekování polohy vysílače za překážkou



Obr. 2.20 Detekce polohy přes fantom stěny

Zajímavé skutečnost je vyobrazena na Obr. 2.21 Velké rozdíly indukovaného napětí Obr. 2.21. Test je prováděn s velkou pavučinovou anténou a kvadrupólem. V některých vzájemných polohách antén dochází k minimálním nebo žádným příjmům signálu, a to i přes to, že antény jsou v naprosté blízkosti. Dochází zřejmě k vzájemnému odečítání magnetických složek pole a neindukuje se tedy žádné napětí. Tento jev je vyobrazen na obrázku vlevo.

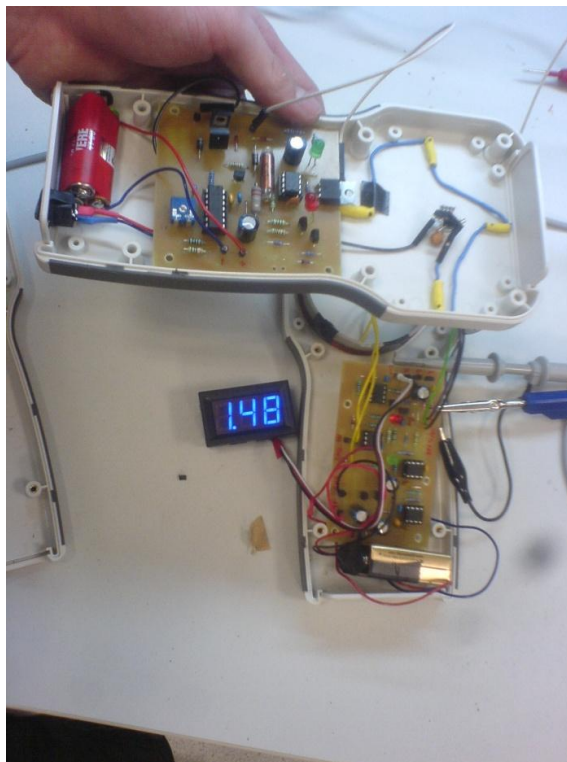
Nalezení protilehlé polohy, znamená vycentrovat osy přijímače a vysílače do jedné. To je učiněno na prostředním obrázku, ale indukované napětí, které má určovat protilehlost není v této poloze největší. Daleko větší amplituda se zobrazí při testování na osciloskopu v polohách u ramen vysílače (vpravo). Osciloskop nebyl přepínán. Pro správné určování polohy lze tyto cívky použít přibližně od 5cm.



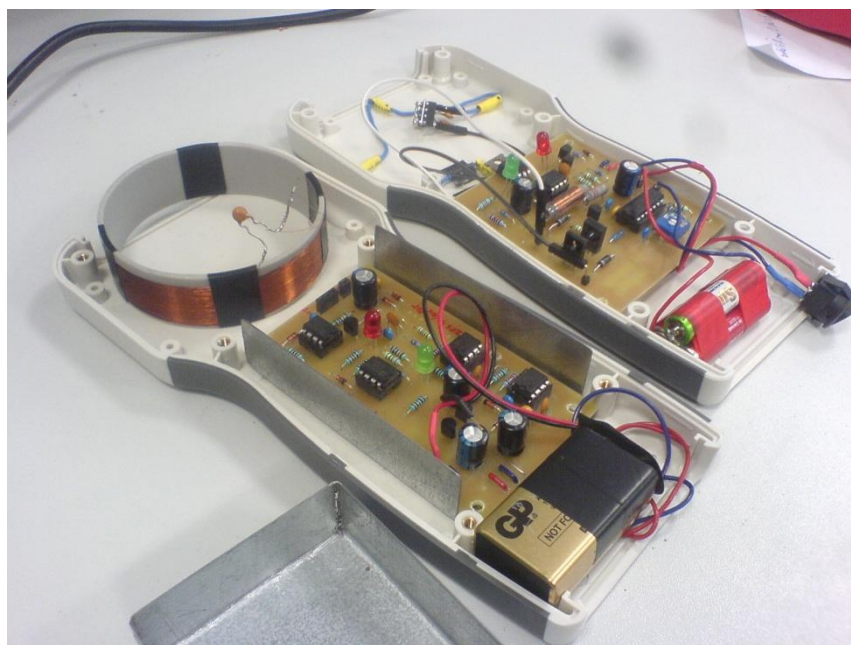
Obr. 2.21 Velké rozdíly indukovaného napětí

Mimo laboratorní měření a pokusy s vysílacími a přijímacími antény probíhal

vývoj celkového přístroje a i ten musel být testován. Dokumentuje to Obr. 2.22.



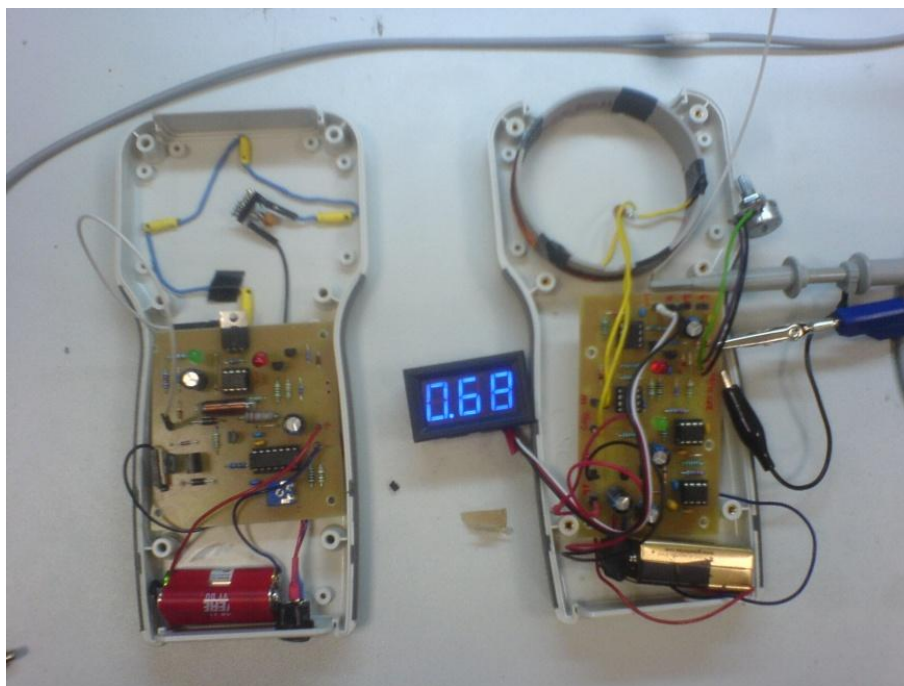
Obr. 2.22 Testování detektoru polohy



Obr. 2.23 Vnitřní uspořádání přístroje

3. REALIZACE

Navrhovaný přístroj pro hledání protilehlé polohy se skládá z aktivní vysílací a pasivní přijímací části. Vysílač je napájen čtyřmi tužkovými AAA bateriemi o celkovém napětí 6V. Integrovaný klopný obvod s RC článkem generuje signál s možností ladění frekvence. Signál pokračuje na tranzistor T1, který řídí výkonový zesilovač. Vhodně upravený signál pak vstupuje do vysílací antény. Ta se skládá z vyzařovací cívky a kondenzátoru zapojených jako sériový rezonanční LC článek. Anténa vyzařuje elektromagnetické pole, které má za následek indukci napětí v přijímacím anténním obvodu. Ten se opět skládá z cívky a kondenzátoru zapojených paralelně. Indukované napětí je v přijímači nejprve upraveno předzesilovačem s možností zesílení 1x nebo 10x. Dále je filtrován laděnou dolní propustí a zesilovačem v invertujícím zapojení 100x zesílen. Nakonec je signál usměrněn. Operační zesilovače jsou napájeny symetrickým napětím 5V. Zesílený a usměrněný signál vstupuje do stejnosměrného digitálního voltmetru, který je integrován v zobrazovacím panelu. Ten je napájen odděleným zdrojem napětí 9V. Uživatel detektoru sleduje hodnoty na displeji, a je tak navigován k místu s největší intenzitou elektromagnetického pole. Zapnutý stav na obou částech zařízení indikují zelené LED diody. Vybití baterií pak LED diody červené. Vysílací a přijímací zařízení s odejmutými kryty jsou na obrázku Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Vysílač a přijímač detektoru protilehlosti

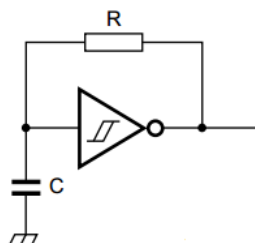
3.1 Vysílač

3.1.1 Generátor signálu

Pro generování signálu byl použit integrovaný obvod 40106. Perioda generovaného signálu je dána časovou konstantou τ , určená RC článkem (Obr. 3.2). Ten je navržen tak, aby výstupní signál kmital na frekvenci 280kHz. Pomocí trimru 2,5k Ω je možné frekvenci ladit přibližně o +/- 50kHz. Hodnoty součástek RC článku určuje vztah

$$\tau = RC. \quad (3.1)$$

Časová konstanta je doba, za kterou se napětí na kondenzátoru sníží e – krát. Kmitočet výstupního signálu je závislý i na napájecím napětí obvodu. Charakteristiky lze najít v katalogovém listu součástky [20].



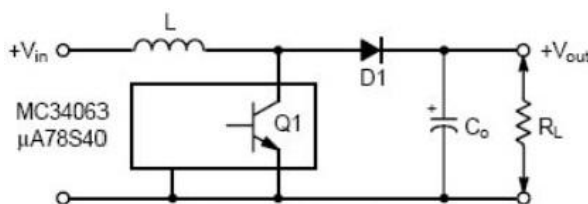
Obr. 3.2: Zapojení IO 40106 s RC členem [20]

Obvod obsahuje šestkrát schmittův klopný obvod. Pro potřebu vysílače jsou využity pouze dva.

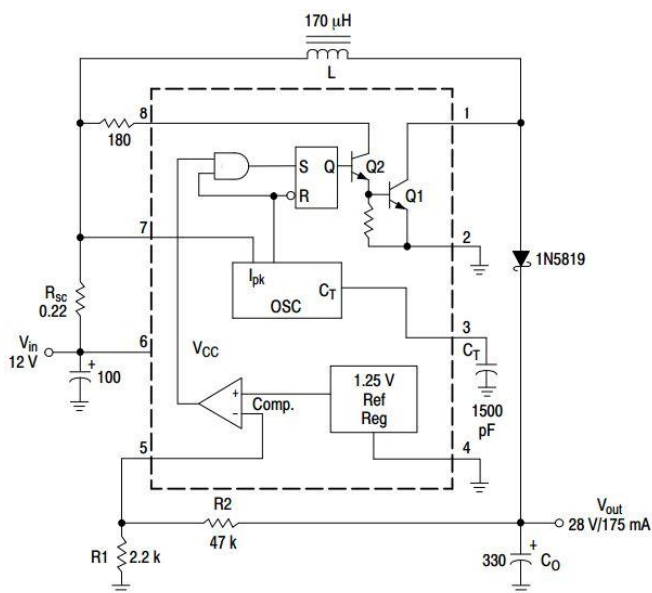
Generovaný signál pokračuje přes bázevý odpor R12 k tranzistoru T1, který řídí výkonový zesilovač ve třídě B s komplementárními tranzistory Q1 a Q2 se společným kolektorem. Dioda D2 je shottkyho desaturační dioda, která nedovolí pokles napětí pod 0,25V, jde o paralelní omezovač napětí. Přechod B – C se nedostane do propustného směru. Napětí $U_{CC} = 24V$ je zajištěno zvyšujícím DC–DC měničem. Výstupní upravený signál je přiváděn na vysílací anténu.

3.1.2 DC-DC měnič

Anglicky je označován jako Boost nebo Step-Up. Jeho výstupní napětí je vyšší než napětí na vstupu. Princip je založen na indukovaném napětí v cívce. Po rozpojení elektronického spínače se z cívky stává zdroj. Proud tedy nezaniká, ale teče nadále stejným směrem, dokud neskončí přechodový děj a energie, uložená v cívce, se nevyžáří do okolí. Zjednodušené schéma zapojení je uvedené na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Zvyšující DC – DC měnič [11]



Obr. 3.4 Typické zapojení DC-DC měniče 41[19]

Pro výpočet součástek musíme znát požadované parametry. V navrženém zapojení jsou následující. Vstupní napětí $U_1 = 4\text{--}6\text{V}$ (pro výpočet uvažujeme 5.5V), výstupní napětí $U_2 = 24\text{V}$, jmenovitý proud na výstupu $I_2 = 150\text{mA}$. Pro zjednodušení výpočtu uvažujeme účinnost zdroje 100%.

Výkon zdroje je

$$P = U_2 \cdot I_2 = 24 \cdot 0,15 = 3,6W. \quad (3.2)$$

Střední hodnota proudu před tlumivkou je

$$I = \frac{P}{U_1} = \frac{3,6}{5,5} = 0,655A. \quad (3.3)$$

Střední hodnota proudu I souvisí s maximální hodnotou $I_{\max}$ a činitelem plnění δ následovně:

$$I = \frac{\delta \cdot I_{max}}{2}. \quad (3.4)$$

Odkud lze vyjádřit následující vztah a pokud při jmenovitém proudu uvažujeme činitel plnění $\delta = 0,5$, potom

$$I_{max} = \frac{2 \cdot I}{\delta} = \frac{2 \cdot 0,655}{0,5} = 2,62A. \quad (3.5)$$

Nyní určíme indukčnost tlumivky pro zvolenou frekvenci spínání $f = 60\text{kHz}$. Podmínkou musí být, že frekvence spínání je mnohonásobně vyšší než časová konstanta tlumivky. Potom platí

$$I_{max} = \left(\frac{U_1}{L}\right) \cdot \frac{T}{2}. \quad (3.6)$$

kde $T = 1/f$ je perioda spínání. Úpravou dostaneme

$$L = \frac{U_1}{(2 \cdot I_{max} \cdot f)} = \frac{5,5}{(2 \cdot 2,62 \cdot 60\,000)} = 17,5\mu H. \quad (3.7)$$

Výkon, který přeneše tlumivka s indukčností $L=17\mu H$ při frekvenci spínání a maximálním proudem $I_{max} = 2,62A$ se určí vztahem

$$P = L \cdot I_{max}^2 \cdot \frac{f}{2} = 17 \cdot 2,6^2 \cdot \frac{60\,000}{2} = 3,5W. \quad (3.8)$$

Odpor $R3$ stanovuje proud zátěží, při němž začne působit proudové omezení. Pro $R3 = 0,12\Omega$ bude

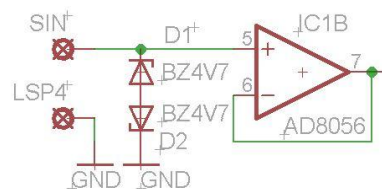
$$I_{max} = \frac{0,33}{R3} = 2,75A. \quad (3.9)$$

Typické hodnoty a požadavky pro další komponenty jsou následující. Pro $R1$ volíme hodnotu přibližně $33 \times U_1 \cong 180\Omega$. Rezistory $R8, R9$ určují poměr napěťového děliče pro napěťovou zpětnou vazbu. Kondenzátor $C2$ určuje frekvenci spínání a vypínání tranzistoru $Q3$. Frekvence spínání je běžně desítky kHz. Elektrolytický $C6$ musí být dostatečně napěťově dimenzován, $L1$ se nesmí přesytit, $Q3$ potřebuje chladit. Závěrné napětí diody $D1$ musí být větší než výstupní napětí.

3.2 Přijímač

3.2.1 Ochrana vstupu

Do přijímacího paralelního LC obvodu se vlivem okolního elektromagnetického pole indukuje napětí. Pro případ, že by bylo toto napětí větší než přibližně 5,5V je na vstupu přijímače zařazena ochrana vstupu operačního zesilovače. Ochrana je řešena sériovým zapojením dvou zenerových diod $D1$ a $D2$ v propustném a závěrném směru (Obr. 3.5).

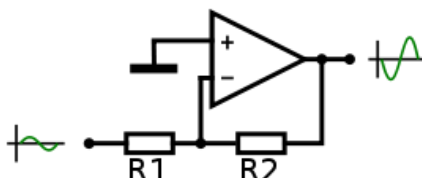


Obr. 3.5 Ochrana vstupu operačního zesilovače

3.2.2 Zesílení přijatého signálu

Přijaté napětí na LC obvodu se zesiluje operačním zesilovačem AD8056, který je zapojen jako invertující. Toto zapojení je na Obr. 3.6. Velikost zesílení je dána poměrem odporů R_2 a R_1 . Výstupní napětí invertujícího operačního zesilovače je

$$U_{výst} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{vst}. \quad (3.10)$$



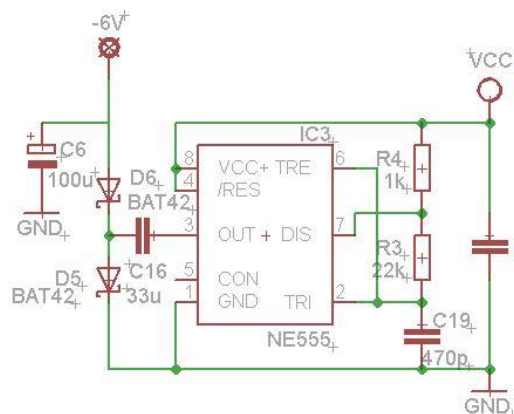
Obr. 3.6 invertující zapojení OZ

3.2.3 Číslicový přístroj pro měření napětí

O vyhodnocení přijatého signálu se stará digitální voltmetr, do kterého vstupuje usměrněné zesílené napětí. Změřené napětí se zobrazuje na tří-digitovém displeji panelového měřidla. Napájení musí být zajištěno galvanicky odděleným napětím 5-30V. Maximální pracovní proud $I_{max} > 13\text{mA}$. Rozsah měřeného napětí 0-30V. Zobrazené hodnoty napětí odpovídají intenzitě elektromagnetického pole v těsném okolí přijímače. Uživatel tak může metodickým postupem proměřit plochu stěny za níž je umístěn vysílač a sledovat zvyšující a snižující se detekované hodnoty. Indikace nejsilnějšího pole tak uživatel navádí k nalezení protilehlé polohy.

3.3 Napájecí obvody přijímače

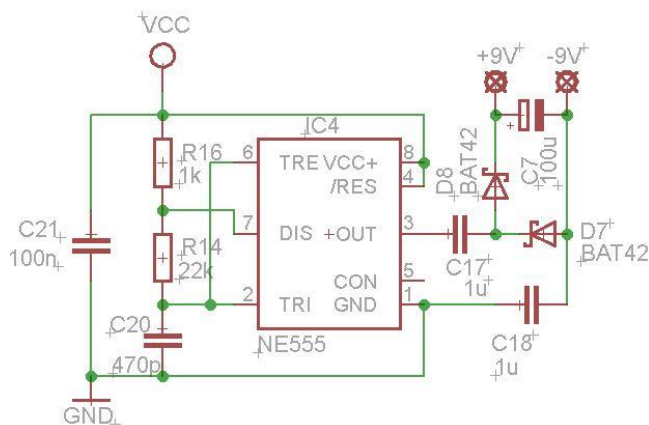
Zdroj napětí v přijímači zajišťuje 9V baterie. Samotná baterie ovšem nestačí a proto je třeba napájecích obvodů. Operační zesilovače vyžadují symetrické napětí 5V. Kladnou část získáme na výstupu obvodu 78L05. Stejně jako u napětí -5V, které se stabilizuje na výstupu 79L05. Na to, aby se napětí stabilizovalo na požadované hodnotě, musíme přivádět na vstupní svorku záporného stabilizátoru větší, záporné napětí než je na výstupu. Tento problém řeší zapojení na Obr. 3.7. Jde o klasické zapojení obvodu 555 jako oscilátoru s tím, že na jeho výstupu (pin č. 3) je zapojen kapacitní měnič napětí. Na tomto pinu je obdélníkové napětí s frekvencí jednotek až desítek kHz a amplitudou téměř rovnou napájecímu napětí. V první polovině jeho periody, kdy je na pinu č. 3 kladné napětí je jím nabíjen první kondenzátor C16 a to téměř až na hodnotu napájecího napětí. V druhé půlperiodě, kdy je na výstupním pinu nulové napětí je od tohoto nulového napětí odečteno napětí nabitého kondenzátoru z první půlperiody a tím vznikne napětí záporné. To projde diodou a nabije druhý kondenzátor C6.



Obr. 3.7 Zdroj malého záporného napětí

Na výstupu, označeném -6V, je tedy záporné napětí, které je o něco menší, než je napájecí napětí. To může být libovolné v rozmezí 5 - 16V, případně při použití CMOS verze obvodu 555 může být už asi od 3V. Výstupní proud měniče je až 150mA [12].

Dalším obvodem, který je třeba napájet je číslicový voltmetr. Ke své bezchybné funkci potřebuje galvanicky oddělený napájecí zdroj. Tedy zdroj, který není vodivě spojen se zbytkem zařízení. Řešením může být použití již zmíněného DC/DC měniče v kapitole 3.1.2. Samozřejmě s jinými parametry a hodnotami součástek. Je však také možné použít jednodušší, zde popisovaný měnič, s integrovaným obvodem 555. Jeho pořizovací náklady jsou minimální. Na následujícím obrázku Obr. 3.8 Napájecí zdroj digitálního voltmetru Obr. 3.8 je schéma zapojení DC - DC měniče pro digitální panelové měřidlo.



Obr. 3.8 Napájecí zdroj digitálního voltmetru

Požadované galvanické oddělení výstupu generátoru zajišťují kondenzátory C17 a C18. Ty musí být dimenzovány na napětí minimálně podle požadovaného rozdílu potenciálů. Čím je jejich kapacita větší, tím měnič dokáže dodat větší proud. Maximální proud je možné dosáhnout použitím keramických kondenzátorů s vyšší kapacitou [21]. Usměrnění výstupního napětí zajišťují shottkyho diody D7 a D8. Výstup poté filtruje kondenzátor C7. Bez stabilizace je na výstupních svorkách +9V -9V napětí rovnající se vstupnímu napětí zmenšenému zhruba o 0,5V. Označení svorek může být tedy

zavádějící, nejedná se o celkovém napětí 18V, ale přibližně 8,5V. Toto napětí je přivedeno na digitální měřidlo.

V obou předchozích zapojení pracuje časovací obvod 555 jako AKO (střídá se nízká (0V) a vysoká (+V_{cc}) úroveň napětí). Frekvence kmitání obvodů je stanovena podle následujícího vztahu.

$$f = \frac{1,4}{(R_1 + 2R_2)C_1} = \frac{1,4}{(1000 + 2 \cdot 22000) \cdot 470 \cdot 10^{-12}} = 66\,193\text{Hz} \quad (3.11)$$

4. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prostudovat rezonanční obvody, měření síly pole a navrhnout zařízení, které bude indikovat polohu místa za zdí.

Pro pochopení principu funkce indikátoru polohy je nutné nastudovat některé fyzikální zákony. V první kapitole jsou proto vysvětleny principy elektromagnetického pole. Podrobněji se práce zabývá magnetickou složkou a vysvětluje princip elektromagnetické indukce. Další teorie vysvětluje rezonanční jev v RLC obvodech.

Nejdůležitější části indikátoru jsou vysílací a přijímací LC obvody. Jejich konstrukční řešení má zásadní vliv na funkci přístroje. Řadou měření byly zjišťovány vhodné a nevhodné vysílací a přijímací antény. Pokusným zkoušením a měřením se přišlo na několik neočekávaných funkčních konstrukcí. Jako velice vhodná se jeví vysílací kvadrupólová soustava, která vytváří silné a souměrné elektromagnetické pole. Antény pro přijímací stranu byly testovány a vyvíjeny především pro vysílací kvadrupól. Byly zjištěny a v práci popsány nejvýhodnější přijímací antény vhodné pro detekci protilehlé polohy. Jsou to především pavučinová cívka vyznačující se detekováním na velké vzdálenosti a soustava čtyřech vzduchových menších cívek vhodná pro detekování přesné polohy. Byly tedy objeveny a vhodné vysílací i přijímací antény. Další návrhy antén by mohly vzejít z testování a konstruování cívek používaných u detektorů kovu. Za pokus by stálo také vylepšení už nyní dobře fungujících přijímacích antén. Například zkusit navinout další spirálovitou vrstvu u pavučinové cívky, doplnit soustavu čtyř antén o další vzduchové cívky nebo zkombinovat obě navržené antény.

Elektronické obvody jsou navrženy tak, aby byly jednoduché, tedy bezporuchové, levné a přesto dobře funkční. Obvody byly popsány a vysvětleny. U DC-DC měniče byl uveden i výpočet konkrétních parametrů. Na přijímací straně obvodu by bylo možné navrhnout lepší řešení indikace než číslcovým displejem, ale i ten má svoje výhody.

Pro elektronické obvody byly navrženy desky plošných spojů, které jsou i s osazovacími plány součástí práce.

LITERATURA

- [1] *Elektronické učebnice matematiky a fyziky* [online]. (c)2010 [cit. 2013-12-19]. Dostupné z: <http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika%20S%C5%A0/04%20Elekt%C5%99ina%20a%20magnetismus/07%20Elekt%C5%99ina%20a%20magnetismus%20v%20praxi/04%20Elektromagnetick%C3%A9%20kmit%C3%A1n%C3%AD,%20oscila%C4%8Dn%C3%AD%20obvod.pdf>
- [2] FERROXCUBE. *Soft ferrites and accessories: Data handbook* [online]. 2013, 1108 s. [cit. 2015-05-25].
- [3] Magnetický indukční tok. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Fyzika :: MEF* [online]. 2015 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/303-magneticky-indukcni-tok>
- [4] VÁGNER, Petr. *Vysokofrekvenční technika*. Brno, 2013. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] HÁJEK, Jan a Zdeněk JARCHOVSKÝ. *Detektory kovů - 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.
- [6] Rázy (zázněje). REICHL, J a M VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2013 [cit. 2013-12-16]. Dostupné z: [http://fyzika.jreichl.com/data_multimedia/\[+\]MECHANICKE_KMITANI_A_VLNE_NI/razy/zazneje.pdf](http://fyzika.jreichl.com/data_multimedia/[+]MECHANICKE_KMITANI_A_VLNE_NI/razy/zazneje.pdf)
- [7] Elektromagnetická indukce. SPSEaIT Moodle [online]. [2015] [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/7453/mod_resource/content/1/Elektromagnetick%C3%A1%20indukce.pdf
- [8] Příjem elektromagnetického vlnění. SLEZÁK, Pavel. *ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ PRO PŘENOS RÁDIOVÝCH A TV SIGNÁLŮ* [online]. © 2002 - [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://elmag.sps.sweb.cz/2.htm>
- [9] HAYT, William H, Jack E KEMMERLY a Steven M DURBIN. *Engineering circuit analysis*. 6th ed. Boston: McGraw-Hill, 2002, xviii, 781 s. ISBN 00-722-8364-5.
- [10] FAKTOR, Z, Jack E KEMMERLY a Steven M DURBIN. *Transformátory a cívky*. 6th ed. Praha: McGraw-Hill, 1999, 392 s. ISBN 80-860-5649-X.
- [11] KOPECKÝ, Ladislav. Zvyšující DC-DC měnič. *Free-energy: Stránky věnované potlačované vědě a zatajovaným vynálezům* [online]. 2007 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://free-energy.xf.cz/simulace/boost-conv.pdf>
- [12] Pandatron. *Měnič pro záporné napětí: Zdroj pro malé záporné napětí s obvodem 555* [online]. 1994 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?311&menic_pro_zaporne_napeti

- [13] BARTUŠEK, Karel, Eva GESCHEIDTOVÁ, Radek KUBÁSEK, Jan MIKULKA, Jiří REZ a Miloslav STEINBAUER. *Měření v elektrotechnice*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [14] VOJTĚCH, L. RFID - technologie pro internet věcí. *Pandatron* [online]. 2008 [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?733&rfid_-_technologie_pro_internet_veci
- [15] Vázané rezonanční obvody. *Elektronika - Dlabos* [online]. [2008] [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: http://dlabos.wz.cz/en/Vazane_rezonancni_obvody.html
- [16] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku*. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, 2001, 343 s. ISBN 80-723-2114-5.
- [17] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení: přednášky*. vyd. 1. Brno: VUT FEKT, ústav radioelektroniky, 2006, 133 s. ISBN 8021433019.
- [18] DREXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. *Magnetické prvky měření*. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01909-8.
- [19] ON SEMICONDUCTOR. *MC34063A* [online]. 2010 [cit. 2015-05-25]. Dostupné také z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC34063A-D.PDF
- [20] HEF40106B. *NXP* [online]. 21.11.2011 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/HEF40106B.pdf
- [21] Izolovaný DC/DC měnič. *Pandatron.cz - Elektrotechnický magazín* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?545&izolovany_dc/dc_menic

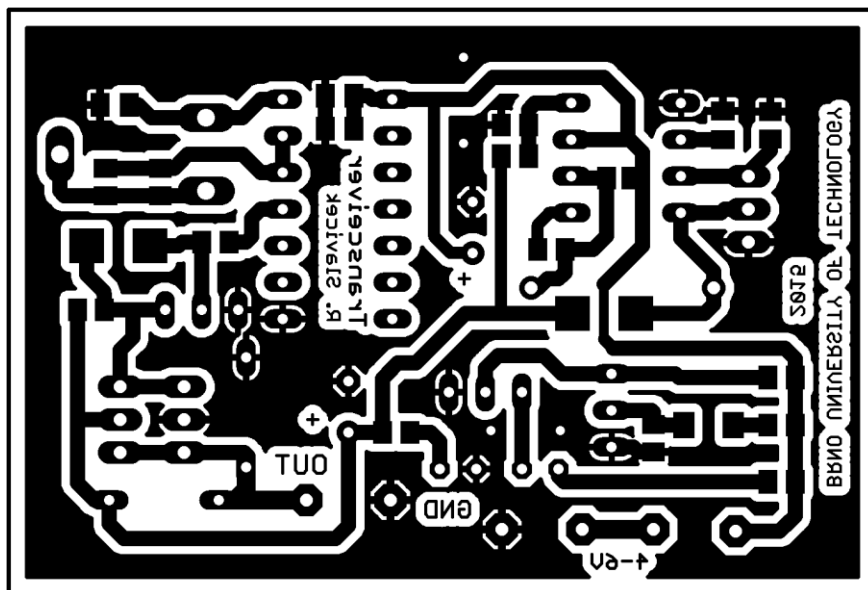
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

B	$[T]$	magnetická indukce
H	$[A \cdot m^{-1}]$	intenzita magnetického pole
ϕ	$[Wb]$	magnetický tok
ϕ_r	$[Wb]$	rozptylový magnetický tok
μ	$[H \cdot m^{-1}]$	permeabilita
μ_r	$[-]$	relativní permeabilita
μ_0	$[H \cdot m^{-1}]$	permeabilita vakua
σ	$[S \cdot m^{-1}]$	měrná elektrická vodivost – konduktivita
d	$[m]$	hloubka vniku
e	$[-]$	Eulerovo číslo
R_m	$[H^{-1}]$	magnetický odpor - reluktance
G_m	$[H]$	magnetická vodivost - permeance
N	$[-]$	počet závitů cívky
A_L	$[nH]$	součinitel indukčnosti
S	$[m^2]$	obsah, průřez
l	$[m]$	délka
r	$[m]$	poloměr smyčky
a	$[m]$	poloměr průřezu vodiče
P	$[W]$	výkon
U	$[V]$	napětí
I	$[A]$	proud
R	$[\Omega]$	odpor
G	$[S]$	vodivost
L	$[H]$	indukčnost
C	$[F]$	kapacita
Z	$[\Omega]$	impedance
Y	$[S]$	admitance
ω	$[s^{-1}]$	úhlová frekvence
ω_0	$[s^{-1}]$	rezonanční frekvence

f	[Hz]	frekvence
f_{c1}, f_{c2}	[Hz]	mezí frekvence
F_0	[Hz]	rezonanční úhlová frekvence
B	[Hz]	šířka pásma
Q	[-]	činitel jakosti
T	[s]	perioda

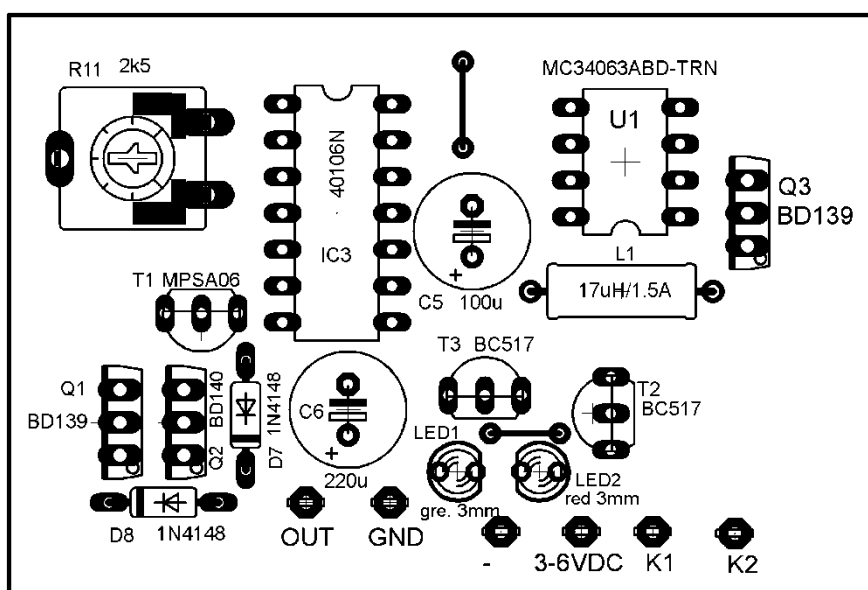
S	Jižní pól
N	Severní pól
DC-DC	Stejnoseměrný měnič
V_{CC}	Napájecí napětí
SRO	Sériový rezonanční obvod
PRO	Paralelní rezonanční obvod
AKO	Astabilní klopný obvod
nf	Nízké frekvence
Tx Transceiver	Vysílač
Rx Receiver	Přijímač

A.2 Deska plošného spoje vysílače – bottom (strana spojů)



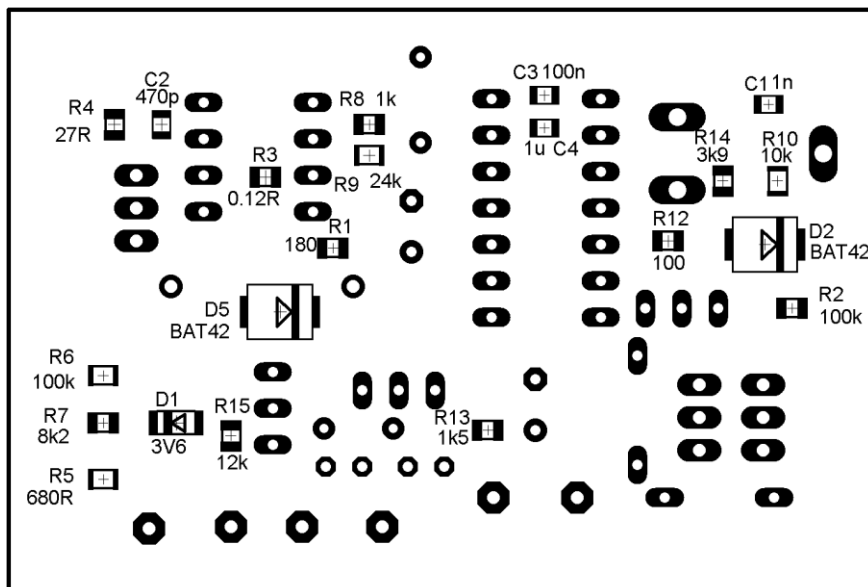
Rozměr desky 39 x 59 [mm], měřítko M 2:1

A.3 Osazovací schéma vysílače – top



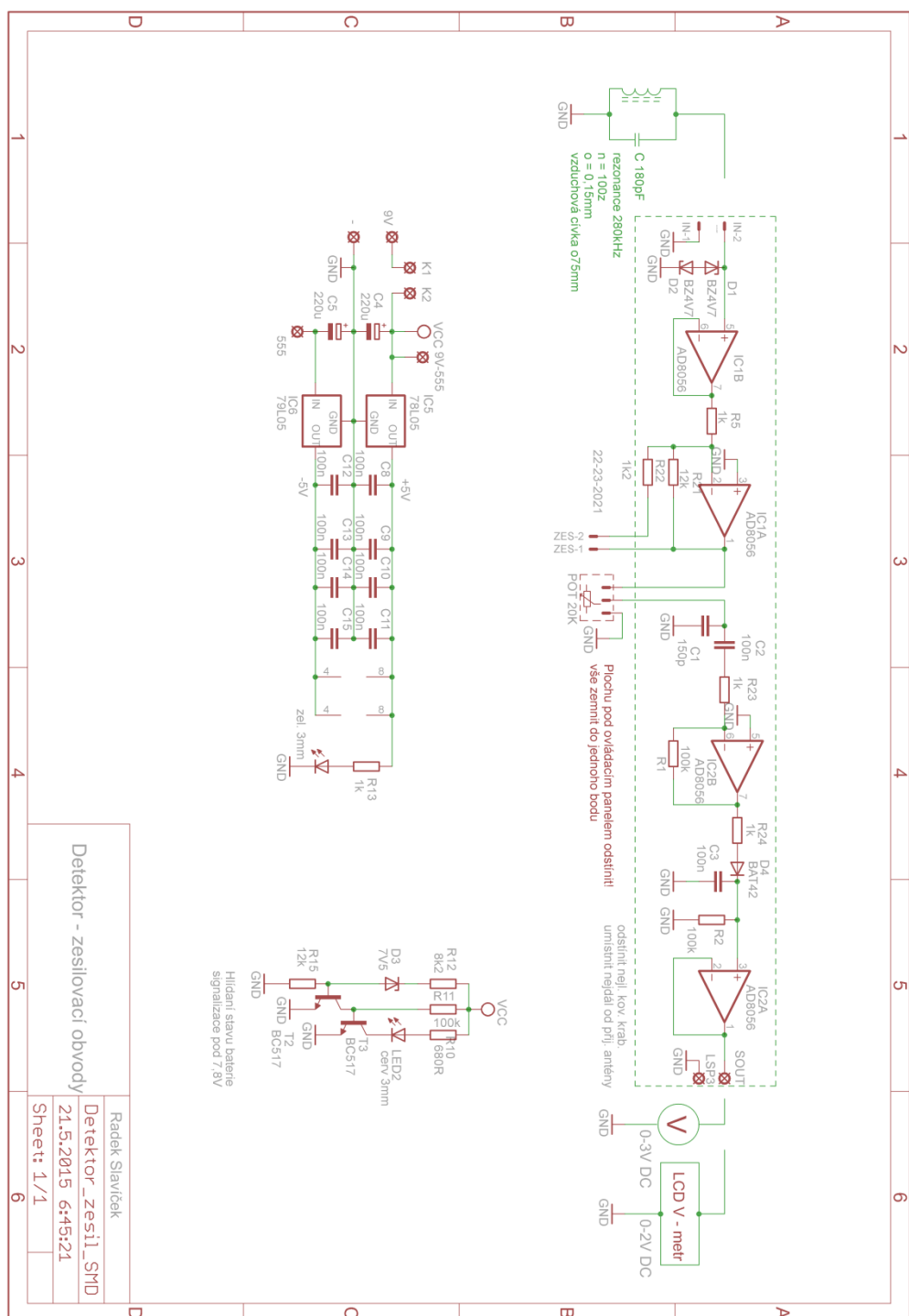
Měřítko M 2:1

A.4 Osazovací schéma vysílače - bottom

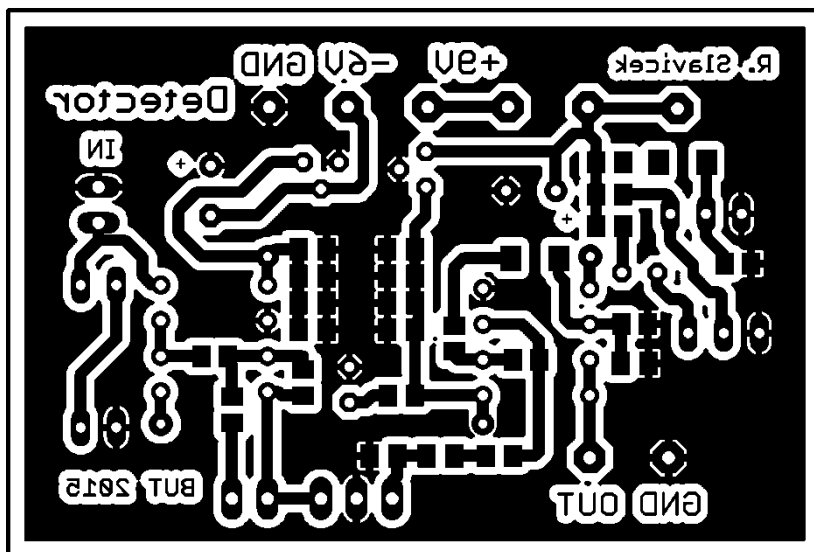


Měřítko M 2:1

A.5 Obvodové zapojení přijímače

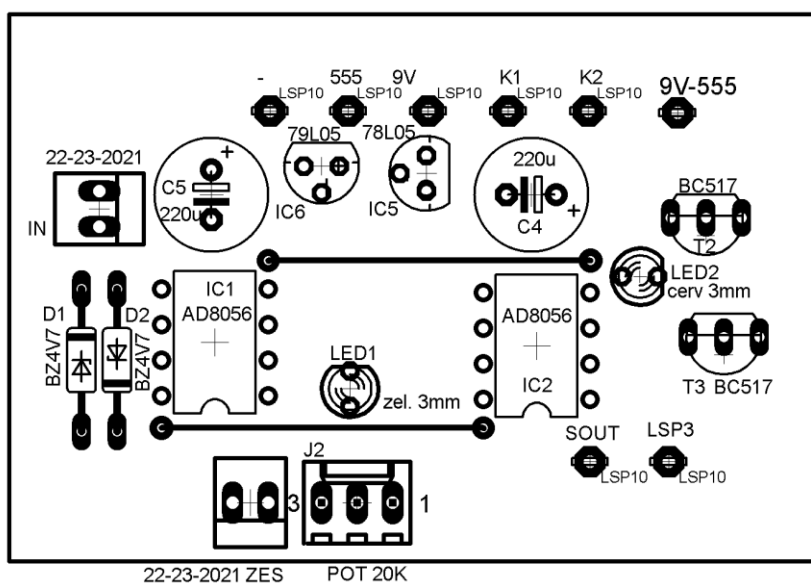


A.6 Deska plošného spoje přijímače – bottom



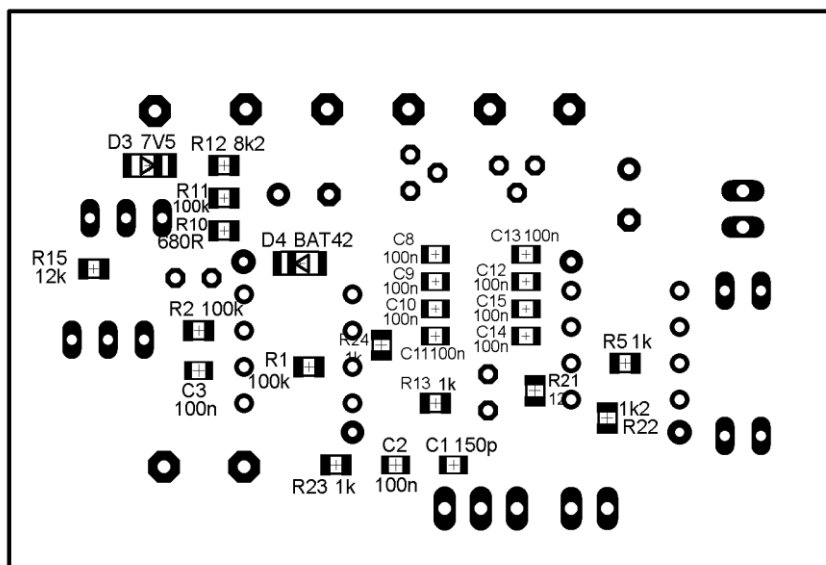
Rozměr desky 39 x 56 [mm], měřítko M 2:1

A.7 Osazovací schéma přijímače - top



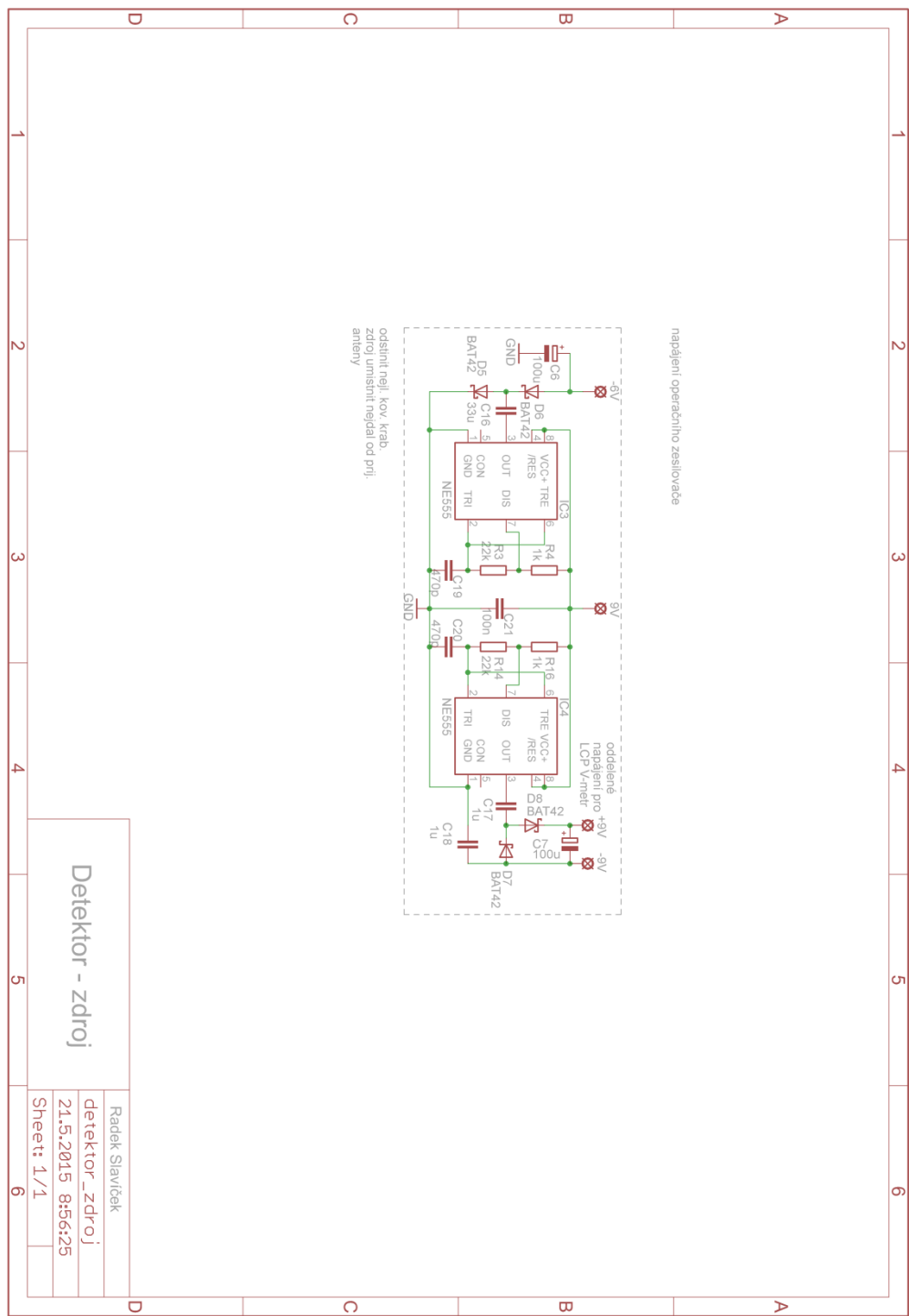
Měřítko M 2:1

A.8 Osazovací schéma přijímače - bottom

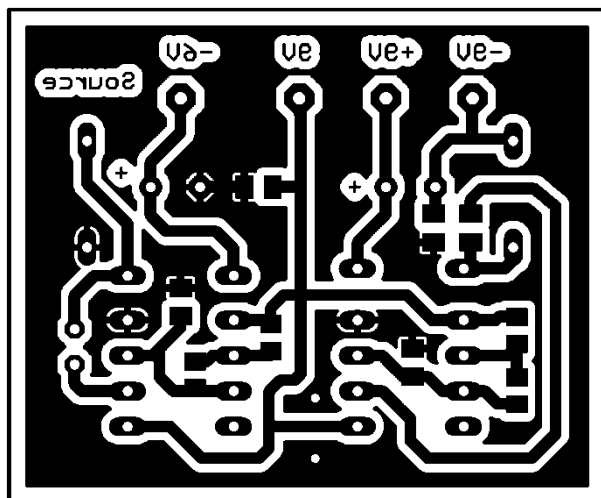


Měřítko M 2:1

A.9 Obvodové zapojení zdroje přijímače

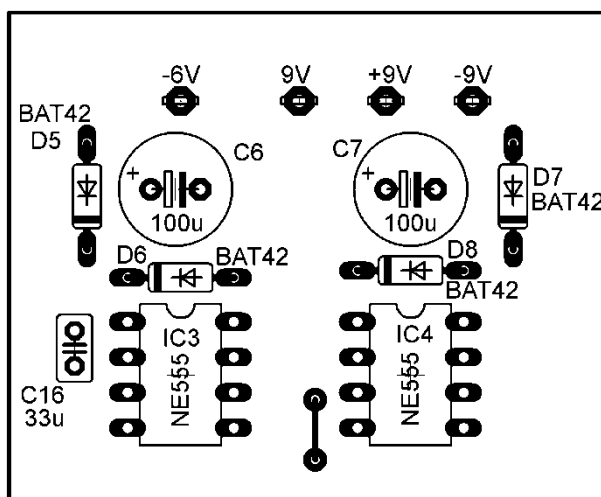


A.10 Deska plošného spoje zdroje přijímače – bottom



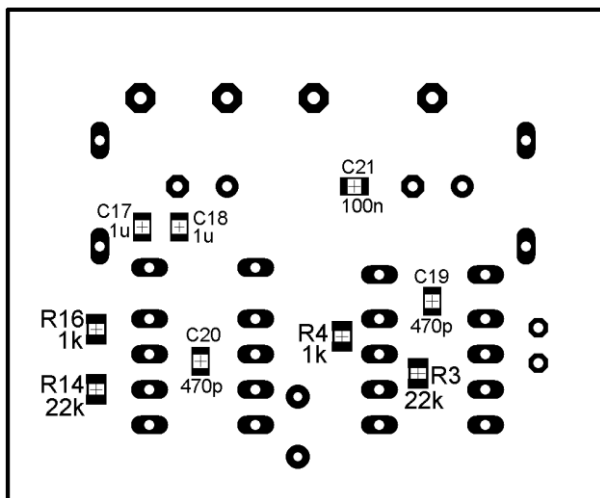
Rozměr desky 33 x 40 [mm], měřítko M 2:1

A.11 Osazovací schéma zdroje přijímače - top



Měřítko M 2:1

A.12 Osazovací schéma zdroje přijímače - bottom



Měřítko M 2:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Vysílač

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	1n	C0805K	keramický kondenzátor
C2	470p	C0805K	keramický kondenzátor
C3	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C4	1u	C0805K	keramický kondenzátor
C5	100u	E3,5-8	elektrolytický kondenzátor
C6	220u	E3,5-8	elektrolytický kondenzátor
D1	3V6	SOD80C	zenerova dioda
D2	BAT42	SMB	schottkyho dioda
D5	BAT42	SMB	schottkyho dioda
D7	1N4148	DO35-7	usměrňovací dioda
D8	1N4148	DO35-7	usměrňovací dioda
IC3	40106N	DIL14	schmittův klopný obvod
L1	17uH/1.5A	TFI0410	cívka
LED1	gre. 3mm	LED3MM	LED dioda
LED2	red 3mm	LED3MM	LED dioda
Q1	BD139	TO126AV	bipolární tranzistor NPN
Q2	BD140	TO126AV	bipolární tranzistor PNP
Q3	BD139	TO126AV	bipolární tranzistor NPN
R1	180	R0805	rezistor
R2	100k	R0805	rezistor
R3	0.12R	R0805	rezistor
R4	27R	R0805	rezistor
R5	680R	M0805	rezistor
R6	100k	M0805	rezistor
R7	8k2	R0805	rezistor
R8	1k	R0805	rezistor
R9	24k	M0805	rezistor
R10	10k	M0805	rezistor
R11	2k5	CA9V	trimer
R12	100	R0805	rezistor
R13	1k5	R0805	rezistor
R14	3k9	R0805	rezistor
R15	12k	R0805	rezistor
T1	MPSA06	TO92-EBC	NPN tranzistor
T2	BC517	TO92-EBC	NPN tranzistor
T3	BC517	TO92-EBC	NPN tranzistor
U1	MC34063ABD-TRN	DIL-08	napěťová pumpa

B.2 Přijímač

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	150p	C0805K	keramický kondenzátor
C2	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C3	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C4	220u	E3,5-8	elektrolytický kondenzátor
C5	220u	E3,5-8	elektrolytický kondenzátor
C8	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C9	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C10	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C11	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C12	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C13	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C14	100n	C0805K	keramický kondenzátor
C15	100n	C0805K	keramický kondenzátor
D1	BZ4V7	C0805K	keramický kondenzátor
D2	BZ4V7	C0805K	keramický kondenzátor
D3	7V5	SOD80C	zenerova dioda
D4	BAT42	SOD80C	usměrňovací dioda
IC1	AD8056	DIL-08	operační zesilovač
IC2	AD8056	DIL-08	operační zesilovač
IC5	5V	78LXX	stabilizátor napětí
IC6	-5V	79LXX	stabilizátor napětí
J2	POT 20K	6410-03	potenciometr
LED1	zelená. 3mm	LED3MM	LED dioda
LED2	červená 3mm	LED3MM	LED dioda
R1	100k	R0805	rezistor
R2	100k	R0805	rezistor
R5	1k	R0805	rezistor
R10	680R	R0805	rezistor
R11	100k	R0805	rezistor
R12	8k2	R0805	rezistor
13	1k	R0805	rezistor
R15	12k	R0805	rezistor
R21	12k	R0805	rezistor
R22	1k2	R0805	rezistor
R23	1k	R0805	rezistor
R24	1k	R0805	rezistor
T2	BC517	TO92-EBC	NPN tranzistor
T3	BC517	TO92-EBC	NPN tranzistor

B.3 Zdroj přijímače

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C6	100u	E3.5-8	elektrolytický kondenzátor
C7	100u	E3.5-8	elektrolytický kondenzátor
C16	33u	C025-025X050	tantalový kondenzátor
C17	1u	C0805K	keramický kondenzátor
C18	1u	C0805K	keramický kondenzátor
C19	470p	C0805K	keramický kondenzátor
C20	470p	C0805K	keramický kondenzátor
C21	100n	C0805K	keramický kondenzátor
D5	BAT42	DO35-7	schottkyho dioda
D6	BAT42	DO35-7	schottkyho dioda
D7	BAT42	DO35-7	schottkyho dioda
D8	BAT42	DO35-7	schottkyho dioda
IC3	NE555	DIL-08	555
IC4	NE555	DIL-08	555
R3	22k	R0805	rezistor
R4	1k	R0805	rezistor
R14	22k	R0805	rezistor
R16	1k	R0805	rezistor