

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

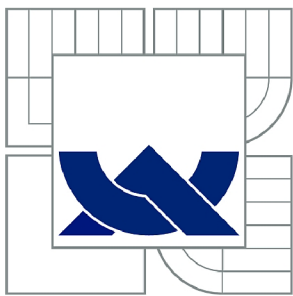
ELEKTRONICKY LADĚNÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA PRO KMITOČTY DO
30 MHz

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

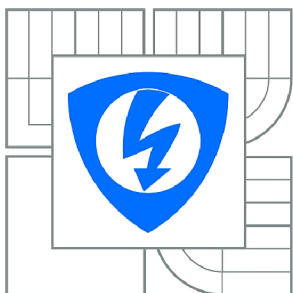
MIROSLAV BURDA

BRNO 2014



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

ELEKTRONICKY LADĚNÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA PRO KMITOČTY DO 30 MHz

MAGNETIC LOOP ANTENNA WITH ELECTRONIC TUNING FOR FREQUENCIES BELOW 30MHz

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

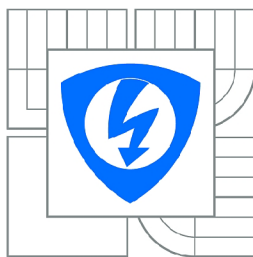
MIROSLAV BURDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ URBANEC, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Miroslav Burda

ID: 136506

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Elektronicky laděná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vlastnostmi smyčkových antén. Navrhněte schéma antény s elektronickým laděním a jeho automatickým řízením. Navrhněte desku plošných spojů.

Realizujte navržený ladicí systém s potřebným základním softwarovým vybavením řídicího mikroprocesoru. Ověřte základní funkčnost a parametry antény. Vytvořte kompletní softwarové vybavení pro elektronické ladění smyčkové antény tak, aby ji bylo možné řídit z PC pomocí USB portu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MEYER, F. HB9ABX: Magnetic Loop Antenna [online], 2006 - [cit. 11.5. 2011]. Dostupné na WWW: <http://home.datacomm.ch/hb9abx/loop1-e.htm>

[2] NOVÁČEK, Z. et.al. Generování a snímání elektromagnetického pole při měření útlumu stínění. Závěrečná výzkumná zpráva. Brno: UREL, FEKT, VUT v Brně, 2004.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, 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.

ABSTRAKT

Tento projekt se zabývá návrhem elektronického ladění a automatizovaného přizpůsobení magnetických, smyčkových antén, pracujících v oblasti krátkých vln. Celá práce je rozdělena do tří částí (ladící, přizpůsobovací a řídicí). Ladící část je realizovaná změnou kapacity pomocí kaskády kondenzátorů a přizpůsobování je provedeno různými změnami bodů napájení. Celý systém je řízen mikroprocesorem ATmega16. Dle požadavků obslužného programu, spíná mikroprocesor příslušné kapacity, čímž ladí anténu na potřebný kmitočet, zpracovává informace o výkonovém přizpůsobení a doladuje anténu změnou polohy napájení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Paralelní rezonanční obvod, skin efekt, impedance, SWR, smyčkové antény, mikroprocesor

ABSTRACT

This project deals with electronic tuning and automated adjustment of magnetic loop antennas, working in the High Frequencies. The whole work is divided into three parts (tuning, adjustment and control). The tuning part is realized by changing the capacity of the array capacitors and adjustment is done by different changes of power points. The whole system is controlled by a microprocessor ATmega16. According to utility switches the microprocessor capacity, which tunes the antenna to the required frequency, processes information about power adjustment and fine-tuning the antenna by changing the position of charging.

KEYWORDS

Parallel resonance circuit, skin effect, impedance, SWR, loop antenna, microprocessor

BURDA, Miroslav *Elektronicky laděná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. 56 s. Vedoucí práce byl Ing. Tomáš Urbanec, Ph.d.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Elektronicky laděná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrální práce panu Ing. Tomášovi Urbancovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	10
1 Teorie antén	11
1.1 Rozdělení antén	12
1.2 Magnetická smyčková anténa – MLA	12
1.2.1 Popis MLA antény	12
1.2.2 Paralelní rezonanční obvod	15
1.2.3 Vliv skin efektu	19
2 Návrh ladícího systému	20
2.1 Anténní parametry MLA pro návrh ladění	20
2.2 Ladící část	21
2.3 Přizpůsobovací část	22
2.3.1 Princip přizpůsobení	22
2.3.2 Rozbor přizpůsobovací části	23
2.3.3 Návrh přizpůsobovací části	26
2.4 Řídící část	29
2.4.1 Řídící mikroprocesor ATmega16	29
2.4.2 Asynchronní komunikace UART	30
2.4.3 Návrh řídicího obvodu	32
3 Softwarové vybavení	34
3.1 Program mikroprocesoru	34
3.1.1 Nastavení mikroprocesoru	34
3.1.2 Funkce programu	37
3.2 Obslužný program	38
3.2.1 Funkce programu	38
4 Měření a výsledky	40
4.1 Příprava	40
4.2 Měření parametrů antény	40
5 Shrnutí výsledků	45
6 Závěr	46
Seznam použité literatury	47
Seznam symbolů, veličin a zkratk	48

Seznam příloh	49
A Šablony DPS	50
A.1 Deska ladící části	50
A.2 Deska Přizpůsobovací části	51
A.3 Deska řídicí části	52
B Seznam součástí	53
B.1 Řídicí část	53
B.2 Přizpůsobovací část	54
C Osazovací plány	55
C.1 Osazení řídicí části	55
C.2 Osazení přizpůsobovací části	55
C.3 Osazení napájecí jednotky	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Magnetická anténa – konstrukce (vlevo), náhradní obvod (vpravo) [6]	12
1.2	Různé typy budicích obvodů [6]	14
1.3	Detail: „gama napájení“ [6]	14
1.4	Směrová charakteristika MLA (<i>výstup z programu MMANA</i>) [6]	15
1.5	Paralelní rezonanční obvod	15
1.6	Rezonanční křivka a fázová charakteristika paralel. RLC obvodu [1]	16
1.7	Šířka pásma (selektivita) paralelního rezonančního obvodu [1]	19
2.1	Blokové schéma principu ladění [7]	22
2.2	Schématické a principiální zobrazení směrové odbočnice [5]	23
2.3	Závislost chyby výkonu na vstupní úrovni výkonu [10]	24
2.4	Převodní charakteristika obvodu AD8307 [10]	24
2.5	Náhradní obvod <i>PIN</i> diody (vpravo propustně, vlevo závěrně) [1]	26
2.6	Napájecí jednotka přizpůsobovací části	26
2.7	Schéma zapojení přizpůsobovací části systému	27
2.8	Doporučené zapojení funkce „ <i>1μW to 1kW 50Ω power meter</i> “ [10]	28
2.9	ATmega16 – Rozmístění pinů (vlevo), blokové schéma (vpravo) [9]	30
2.10	Struktura asynchronního rámce, bitové slovo <i>0b1001011</i> [4]	30
2.11	Schéma zapojení řídicí části systému	32
3.1	Vývojový diagram řídicího programu	37
3.2	Vzhled obslužného programu	39
4.1	Rozmístění napájecích vazeb	40
A.1	Šablona desky ladící části [7]	50
A.2	Šablona desky přizpůsobovací části – horní strana	51
A.3	Šablona desky přizpůsobovací části – dolní strana	51
A.4	Šablona desky řídicí části – horní strana	52
A.5	Šablona desky řídicí části – dolní strana	52
C.1	Osazovací plán ladící části	55
C.2	Osazovací plán přizpůsobovací části	55
C.3	Osazovací plán ladící části	56
C.4	Šablona desky napájecí jednotky	56

SEZNAM TABULEK

1.1	Hodnoty povrchového jevu v mědi	19
2.1	Parametry pro návrh ladění	21
2.2	Tabulka hodnot binární řady kapacit	21
2.3	Názvy, čísla a popis vývodů obvodu <i>FT232RL</i>	31
3.1	Nastavení stavového registru B – <i>UCSRB</i>	34
3.2	Nastavení stavového registru C – <i>UCSRC</i>	35
3.3	Nastavení výběrového registru – <i>ADMUX</i>	35
3.4	Nastavení ovládacího a stavového registru A – <i>ADCSRA</i>	36

ÚVOD

Tato práce se věnuje návrhu automatického ladění a přizpůsobování smyčkové antény pracující v pásmu HF (krátké vlny – High Frequency).

Celá práce se dá rozdělit do tří hlavních větví. Tou první větví je ladění antény s využitím kaskády kondenzátorů, kterou je realizováno přepínání kapacity, čímž v principu i samotné ladění. Tato část však není vyložene předmětem této práce a přípravek pro realizaci samotného ladění byl přejat z předcházející bakalářské práce [7]. Všechny následující úpravy jsou s tímto přípravkem plně kompatibilní.

Co je ale hlavní podstatou tohoto projektu je část druhá, což je návrh obvodu „přizpůsobovacího“. Jeho úkolem je zjistit úroveň postupného a odraženého výkonu pomocí směrové odbočnice a na základě vyhodnocení naměřených údajů zajistit přizpůsobení antény na maximální uplatnění vysílaného výkonu. Přizpůsobení je realizováno změnou bodu napájení antény tzv. „gama napájení“.

Třetí částí je návrh řídicího systému s mikroprocesorem a patřičným softwareovým vybavením, jenž přijímá pokyny ze sériové linky, dle obslužného programu, ladí anténu a vyhodnocuje úroveň postupného a odraženého výkonu. Na základě zjištěných údajů je obvod schopen anténu přizpůsobit. Mikroprocesor poté obratem odešle zpět do obslužného programu informace o postupné a odražené vlně a ten pak uživateli spočítá výsledné SWR ((PSV) poměr stojatých vln – Standing Wave Ratio).

1 TEORIE ANTÉN

Anténa je zařízení, které převádí vysokofrekvenční energii do volného prostoru, nebo naopak. V podstatě jde o určitý druh transformátoru elektromagnetických vln. Pokud je anténa vysílací, přijímá energii z napájecího vedení a vysílá ji do prostoru. V opačném případě sbírá energii z přicházející vlny a předává ji po vedení dále. V zásadě může být každá anténa použita jako přijímací, i jako vysílací (platí zde princip reciprocity¹).

Vezmeme-li v úvahu samotné slovo *anténa*, jeho vznik lze nalézt daleko v minulosti, ve starořeckých dobách. Slovo *anténa* údajně pochází od řeckého slova $\tau\epsilon\iota\nu\omega$ (rozpřáhnutí). Toto slovo znamenalo příčnou část námořní lodi spojenou se stožárem. Ve významu takovém, jakém ho známe dnes, bylo slovo *anténa* poprvé použito G. Marconim² v roce 1902.

Základní parametry antén:

- Směrová charakteristika – je to grafické vyjádření směrových vlastností antény. Tyto směrové vlastnosti vyjadřujeme v absolutní hodnotě podílem elektrické intenzity vyzařovaného vlnění v daném směru a nejvyšší hodnoty intenzity vyzařovaného vlnění (vše počítáme pro velkou vzdálenost od antény).
- Vstupní impedance – je impedance na vstupních svorkách antény. Skládá se z odporu záření R_{Σ} , ze ztrátového odporu R_{ztr} a z reaktance záření X_{Σ} .
- Zisk – je to decibelové vyjádření maximální hodnoty činitele směrovosti

$$G_{abs} = 10\log(D_{max}). \quad (1.1)$$

Činitel směrovosti $D(\varphi, \vartheta)$ popisuje směrovost vyzařování antény. Je větší než jedna v těch směrech, do nichž je zdroj záření soustředěn, a menší než jedna v těch směrech, v nichž je záření potlačováno.

- Šířka pásma – udává šířku přenášeného frekvenčního pásma.

Tyto parametry významně ovlivňují výsledné vlastnosti rádiového spojení . . .

¹Reciprocita (z lat. *reciprocus*, vzájemný) – Umožňuje převod oběma směry.

²Guglielmo Marconi – V roce 1895 realizoval přenos na cca $2 \div 3\text{km}$.

1.1 Rozdělení antén

Antény se dělí dle různých hledisek. Nejzákladnějším rozdělením je na přijímací a vysílací. Podle typu směrové charakteristiky se antény dělí na směrové, vícesměrové a všesměrové. Podle délky vlny ($\lambda = mm, cm, dm, m, km$) se antény liší zejména velikostí a svým tvarem.

Antény mohou být drátové, plošné, reflektorové, rámové, feritové, smyčkové, mikropáskové (flíčkové), štěrbinové, apod.

1.2 Magnetická smyčková anténa – MLA

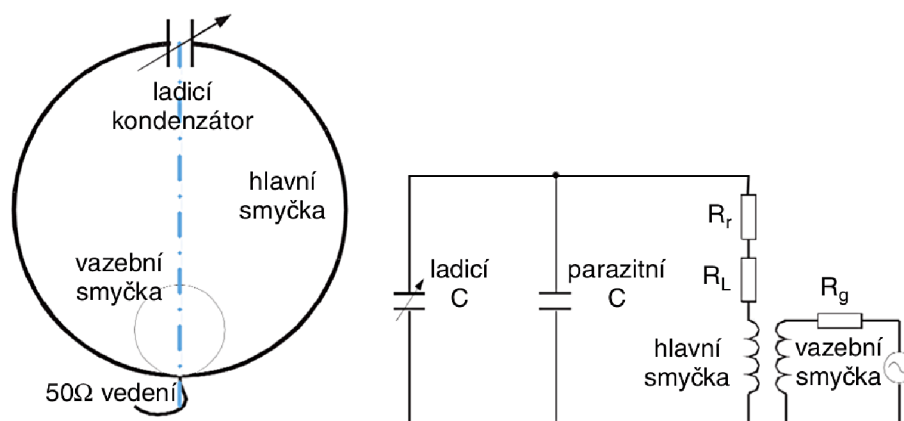
Jednou ze zásadních předností MLA (smyčková anténa – Magnetic Loop Antenna) je to, že její obvod je v porovnání s délkou vlny podstatně kratší. Zatímco obvod většiny antén se pohybuje kolem vlnové délky pro kterou byly navrženy, MLA používá obvod zpravidla $0,1 \div 0,2\lambda$.

Další výhodou MLA je schopnost generovat a zpracovávat pouze magnetickou složku H elektromagnetického pole. Díky této vlastnosti je MLA necitlivá vůči jakémukoliv elektrickému rušení.

1.2.1 Popis MLA antény

Tato anténa je tvořena třemi základními bloky:

- Jedním, nebo více závitů kovového vodiče svinutého do uzavřené křivky (kruh, čtverec, kosočtverec apod.) s mezerou, jenž tvoří napájecí svorky antény,
- ladícím kondenzátorem
- a vazební (budící) smyčkou.



Obr. 1.1: Magnetická anténa – konstrukce (vlevo), náhradní obvod (vpravo) [6]

Svojí koncepcí tvoří tato anténa de-facto paralelní rezonanční obvod. Uvnitř tohoto LC obvodu mizí při rezonanci jalová složka impedance a poměrně velký reálný proud, tekoucí touto „cívkou“, budí v okolí silné magnetické pole.

Konstrukce magnetické smyčkové antény a její náhradní obvod jsou vyobrazeny na obrázku 1.1.

Hlavní smyčka

Obvod hlavní smyčky je odvozen z vlnové délky λ (zpravidla $0,1 \div 0,2\lambda$), pro kterou byla MLA navržena. Hlavní smyčka má obvykle jeden závit tvořen stíněním koaxiálního kabelu, nebo obecně jakoukoliv měděnou trubkou. Snahou je minimalizovat ztráty R_L , které nezanedbatelnou mírou tvoří skin-efekt. Vliv skin-efektu se dá snížit zvýšením vodivosti povrchu (hliníková, měděná/postříbřená trubka), nebo zvětšením plochy povrchu tím, že se zvětší průměr d trubky hlavní smyčky.

Indukčnost jednoho závitu vzduchové cívky pak spočítáme následovně:

$$L[nH] = 0,2 \cdot l \cdot \left(2,303 \cdot \log \frac{4l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4} + \frac{d}{2l} \right), \quad (1.2)$$

kde l je délka vodiče cívky [mm], d je průměr vodiče cívky [mm] a μ permeabilita materiálu vodiče.

Pokud navrhujeme MLA pro pásma s velkou vlnovou délkou (např. dlouhé nebo střední vlny), je lepší použít více závitů hlavní smyčky, jinak by byly rozměry antény velké. Tím se sice anténa stane méně prostorově náročná, ale klesne tím i „energetická výtěžnost“ elektromagnetického pole při příjmu. Indukčnost pak roste s kvadrátem závitů

$$L' = L \cdot N^2, \quad (1.3)$$

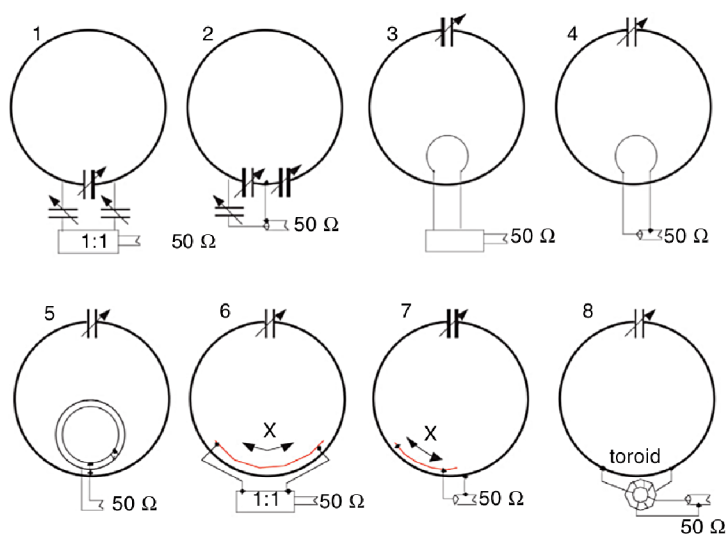
kde L' je indukčnost vícezávitové smyčky.

Ladící kondenzátor

Ladící (přesněji řečeno doladovací) kondenzátor umožňuje změnu pracovního kmitočtu MLA a to do značné míry. Úroveň přeladění je dána délkou hlavní smyčky l a hodnotou tohoto kondenzátoru. Na přijímací anténu nejsou kladeny až takové nároky, avšak pokud se MLA používá jako vysílací, je třeba si uvědomit, že smyčka představuje otevřený závit na prázdno, tudíž se na koncích smyčky může objevit vysoké napětí. Proto je kladen značný důraz na dielektrické vlastnosti použitého kondenzátoru, respektive na elektrickou pevnost vzduchové mezery mezi deskami (elektrodami) kondenzátoru. Takže je třeba použít kondenzátor s dostatečně velkou mezerou mezi deskami.

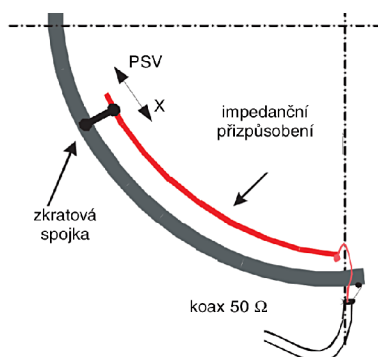
Budicí obvod (vazební smyčka)

Vazební smyčka je menší smyčka umístěná uvnitř smyčky hlavní, naproti ladícímu kondenzátoru. Průměr indukční smyčky je obvykle $\frac{1}{5}$ průměru hlavní smyčky. Doporučená vzdálenost mezi hlavní a vazební smyčkou je $0 \div 6 \text{ cm}$. Právě tato vzdálenost společně s přesností doladění kondenzátoru na rezonanční kmitočet určuje pracovní kmitočet f_0 a tím i ovlivňuje výslednou hodnotu SWR((PSV) poměr stojatých vln – Standing Wave Ratio). Existuje několik způsobů jak vazební smyčku navázat na 50Ω vedení, viz Obr. 1.2.



Obr. 1.2: Různé typy budících obvodů [6]

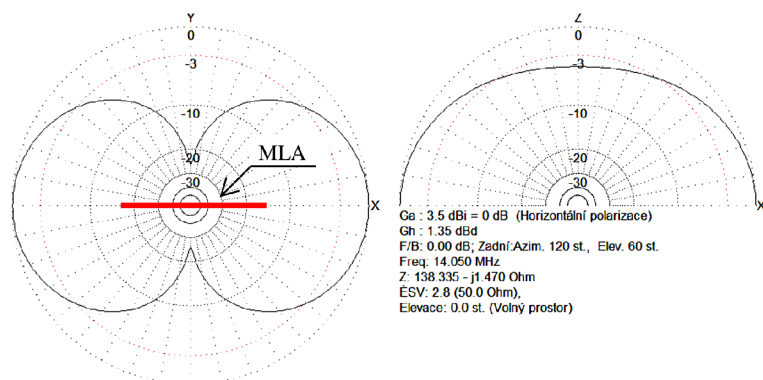
Zvláštní pozornost si zaslouží typ č. 7 tzv. „gama napájení“, jenž umožňuje jednoduchým způsobem přizpůsobit anténu k napájecímu vedení (pomocí změny délky pahýlu X). Tento způsob je využitý i v této práci. Detail je na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Detail: „gama napájení“ [6]

Činitel jakosti cívky Q je rozhodující faktor udávající selektivitu v rezonanci. Pokud je smyčka zatížena, klesající Q zapříčiní snížení selektivity.

MLA se vyznačuje „osmičkovou“ směrovou charakteristikou, viz Obr. 1.4.



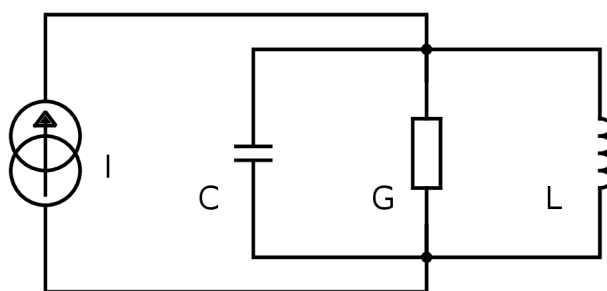
Obr. 1.4: Směrová charakteristika MLA (výstup z programu MMANA) [6]

Tato charakteristika umožňuje zaručený příjem zepředu a zezadu. Boční směry jsou ale značně potlačeny.

1.2.2 Paralelní rezonanční obvod

Paralelní RLC obvod je tvořen paralelní kombinací kapacitoru (C), induktoru (L) a vodivosti ($G = \frac{1}{R}$), která představuje ztráty v obvodu. Hodnotu ztrát určuje tzv. činitel tlumení (δ), který pak určuje charakter volných kmitů. V případě, že je $\delta > 0$ (což je běžná situace u reálného RLC obvodu), tak v obvodu určitou dobu trvají tlumené kmity. Pro $\delta = 0$ je obvod bezztrátový a je schopen kmitat s konstantní amplitudou. Pro $\delta < 0$ amplituda kmitů narůstá.

Schéma paralelního rezonančního obvodu je nakresleno na obrázku 1.5.



Obr. 1.5: Paralelní rezonanční obvod

Pro admitanci tohoto obvodu platí vztah

$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = G + j(\omega C - \frac{1}{\omega L}) = G + jB = Y e^{j\varphi}, \quad (1.4)$$

kde B je susceptance obvodu, Z je impedance, jejíž převrácená hodnota G je vodivost. C je kapacita, L indukčnost, ω je úhlový kmitočet a φ je posuv fáze.

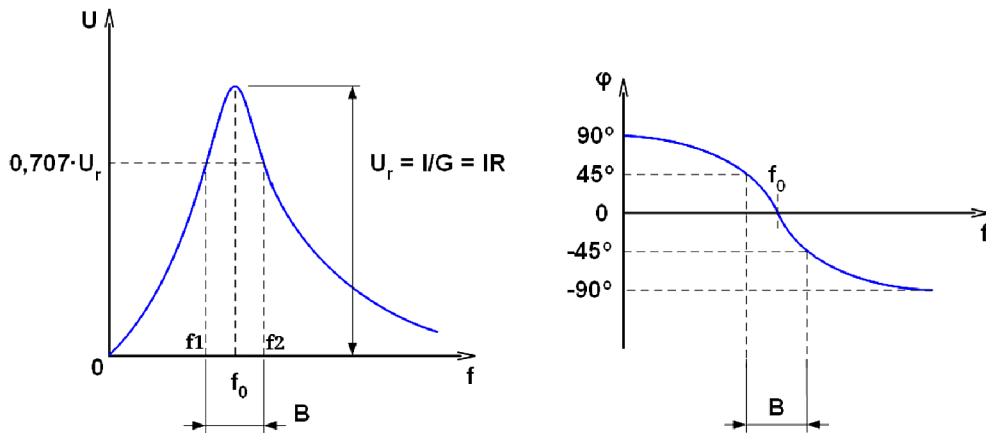
Budíme-li obvod harmonicky ze zdroje proudu s amplitudou I , závisí napětí rezonančního obvodu na modulu admitance Y a tedy na kmitočtu signálu zdroje ω .

$$U = \frac{I}{|Y|} = \frac{I}{\sqrt{G^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}} = Z \cdot I. \quad (1.5)$$

Závislost napětí U na kmitočtu f (nebo ω) se nazývá **rezonanční křivka** (viz Obr. 1.6 vlevo). Na stejném obrázku v pravé části je kmitočtová závislost argumentu (fáze) impedance $Z = \frac{1}{Y}$ paralelního rezonančního obvodu.

Pro charakteristickou impedanci obvodu Z_0 platí vztah

$$Z_0 = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1.6)$$



Obr. 1.6: Rezonanční křivka a fázová charakteristika paralel. RLC obvodu [1]

Paralelní rezonance

Při použitím obvodového modelu podle Obr. 1.5 bude vycházet rezonanční křivka z nuly, neboť stejnosměrná složka je zkratována ideálním induktorem L^3 .

³V reálném případě není možné, aby rezonanční křivka vycházela z nuly, protože na reálné cívice vždy vzniká nějaký úbytek napětí. Jestliže bychom chtěli model, který lépe odpovídá skutečnosti v oblasti blízké nulovému kmitočtu, museli bychom zvolit jiné náhradní schéma obvodu.

Rezonanční křivka nabývá svého maxima v případě, kdy jsou si reaktance rovny $X_C = X_L$, neboli když výsledná susceptance obvodu je $B = 0$. Stav, ve kterém se obvod za těchto podmínek nachází se nazývá „paralelní rezonance“. Při rezonanci obvod vykazuje pouze reálnou vodivost G . Dále křivka klesá a blíží se limitně k nule. Kmitočtová závislost fáze impedance paralelního rezonančního obvodu (fázová charakteristika) naznačuje, že na kmitočtech nižších vůči rezonanční frekvenci má obvod induktivní charakter. Je tomu tak proto, že impedance induktivní větve je na nízkých frekvencích menší než impedance kapacitní větve a při jejich paralelním spojení se výrazněji podílí na výsledné impedanci obvodu. Na kmitočtech vyšších, než je rezonanční kmitočet má obvod charakter kapacitní.

Z podmínky rezonance $B = 0$ lze stanovit vztah pro výpočet rezonančního kmitočtu – „Thomsonův vztah“

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}. \quad (1.7)$$

Pro paralelní rezonanční obvod lze dále odvodit vztahy pro admitanci obvodu

$$Y(\omega) = G \cdot (1 + j\alpha) \quad (1.8)$$

a

$$Y = G \cdot \sqrt{1 + \alpha^2}. \quad (1.9)$$

Při rezonanci, kdy $\alpha = 0$, nabývá modul admitance obvodu své minimální hodnoty a obvod vykazuje pouze reálnou vodivost $Y = G$, přičemž napětí na obvodu nabývá naopak své maximální hodnoty

$$U_r = \frac{I}{G} = I \cdot R, \quad (1.10)$$

kde $R = \frac{1}{G}$ je tzv. „rezonanční odpor“.

Mezní kmitočty a šířka pásma

Po stranách rezonančního kmitočtu jsou definovány dva mezní kmitočty f_{c1} a f_{c2} (viz. 1.6). Napětí na mezním kmitočtu poklesne na hodnotu $0,707 \cdot U_r$, tedy o $3dB$. Tyto mezní kmitočty definují šířku propustného pásma $B = f_{c2} - f_{c1}$. Stejně tak platí, že rezonanční kmitočet f_0 je geometrickým průměrem mezních kmitočtů.

Činitel jakosti

V případě paralelního rezonančního obvodu má vztah pro činitele jakosti tvar

$$Q = \frac{R}{X_L} = \frac{1}{GX_L} = \frac{R}{X_C} = \frac{1}{GX_C} \quad (1.11)$$

Činitel jakosti určuje kvalitu rezonančního obvodu. Sám o sobě je dán vztahem

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot A}{P}, \quad (1.12)$$

kde A je energie, která přechází z elektrického pole do magnetického pole (kmitá) a P je činný výkon, jenž se ztrácí v odporu R (ztrátový odpor). Součin $\omega_0 \cdot A$ představuje jalový výkon induktoru nebo kapacitoru při rezonanci.

Jelikož pro energii A a činný výkon P platí

$$A = \frac{1}{2} C \cdot U^2, \quad (1.13)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{R}, \quad (1.14)$$

lze po dosazení (4.1) a (1.14) do (1.12) psát

$$Q = \omega_0 C R = \frac{R}{\omega_0 L} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{R}{Z_0} = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 L G}. \quad (1.15)$$

Ze vztahu (1.15) je vidět, že volbou velké kapacity (nebo malé indukčnosti) dostáváme velký výsledný činitel jakosti. Vysoký činitel jakosti Q je tedy dosažen při malém poměru $\frac{L}{C}$ (viz obr. 1.7).

Budíme-li paralelní rezonanční obvod zdrojem harmonického signálu s amplitudou proudu I , je za rezonance na obvodu rezonanční napětí U_r . Protože admitance obvodu je za rezonance reálná, je napětí U_r ve fázi s proudem I . Proud tekoucí vodivostí G je stejný, jako proud tekoucí z napájecího zdroje. Pro proudy I_{Lr} tekoucí induktorem a I_{Cr} tekoucí kapacitorem při rezonanci platí:

$$I_{Lr} = \frac{U_r}{j\omega_0 L} = -j \frac{1}{\omega_0 L} \cdot \frac{I}{G} = -jQ \cdot I \quad (1.16)$$

a

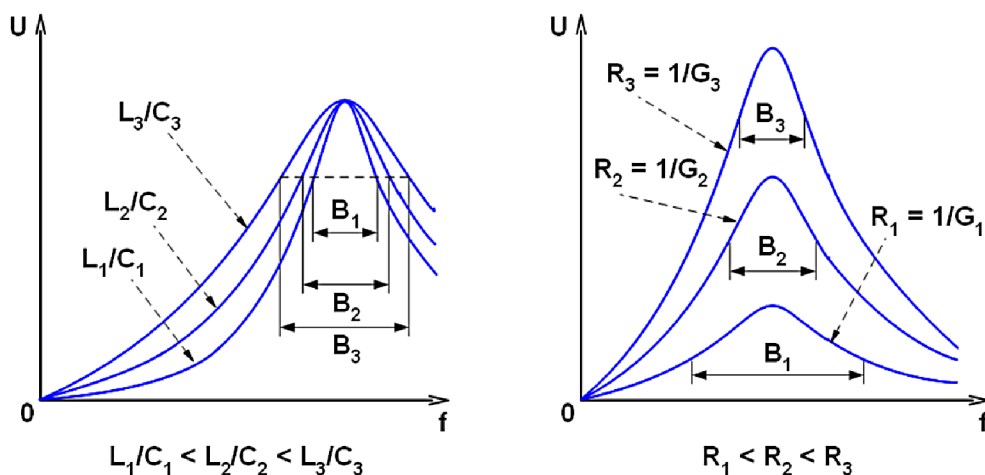
$$I_{Cr} = \frac{U_r}{-\frac{1}{j\omega_0 C}} = j\omega_0 C \frac{I}{G} = jQ \cdot I. \quad (1.17)$$

Z toho plyne, že ve srovnání s výstupním proudem zdroje, jsou proudy tekoucí cívku a kondenzátorem v paralelním rezonančním obvodu Q -krát větší. Takže například jestliže budíme paralelní rezonanční obvod např. z generátoru s výstupním proudem $I = 50 \text{ mA}$ a činitel jakosti obvodu je řekněme $Q = 100$, je proud tekoucí cívku $I_{Lr} = 5 \text{ A}$! Proto je zapotřebí pro konstrukci cívky použít vodič dostatečného průřezu a nezapomenout zohlednit vliv povrchového jevu (skin efektu).

Činitel jakosti má v závislosti na rezonančním kmitočtu a šířce pásma tvar

$$Q = \frac{f_0}{B}. \quad (1.18)$$

Ze vztahů (1.15) a (1.18) lze vidět souvislost mezi šířkou pásma a rezonančním odporem R . Zmenšování odporu R (tedy nárůst vodivosti G) má za následek pokles činitele jakosti Q a následné zvětšování šířky pásma obvodu B . Rezonanční obvod tím ztrácí svoji selektivitu (viz Obr. 1.7).



Obr. 1.7: Šířka pásma (selektivita) paralelního rezonančního obvodu [1]

1.2.3 Vliv skin efektu

Skin efekt (povrchový jev) je nežádoucí jev, který způsobuje „vytlačování“ tekoucího proudu ze středu vodiče na jeho povrch. Tím se při vedení vysokofrekvenční energie vodičem soustřeďuje proudová hustota do tenké vrstvy při povrchu vodiče. Prakticky tak dochází ke zmenšení průřezu vodiče, kterým protéká proud a tím tedy ke zvětšení jeho odporu.

Jednoduše řečeno, s rostoucí frekvencí klesá schopnost vysokofrekvenčního proudu pronikat do hloubky vodiče – klesá tzv. „hloubka vniku“, která je určena

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f}}. \quad (1.19)$$

Hloubka vniku se v mědi pohybuje v desítkách μm na jednotkách MHz a klesá k jednotkám μm na jednotkách GHz , jak je uvedeno v tabulce níže.

Tab. 1.1: Hodnoty povrchového jevu v mědi

$f [MHz]$	1	10	100	1 000	10 000
$\delta [\mu m]$	66	20,9	6,6	2,1	0,7

2 NÁVRH LADÍČÍHO SYSTÉMU

Celý ladící systém je rozdělen do tří hlavních částí (ladící, přizpůsobovací a řídicí).

V první, ladící části (2.2), je k naladění antény využita již dříve zhotovená DPS (deska plošných spojů), s kaskádou spínaných kondenzátorů [7].

Ve druhé části (přizpůsobovací 2.3) je přizpůsobování realizováno tzv. „gama napájením“, jenž umožňuje jednoduchým způsobem přizpůsobit anténu (pomocí změny délky pahýlu X).

Úkolem třetí části (řídicí 2.4) je spínat ladící část, vyhodnocovat výsledky o přizpůsobení a následně doladovat anténu kombinovaným spínáním různých bodů gama napájení.

2.1 Anténní parametry MLA pro návrh ladění

Základní parametry popisující anténu:

- Plocha kruhové smyčky:

$$A[m^2] = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (2.1)$$

- Odpor záření:

$$R_{\Sigma}[\Omega] = 3,38 \cdot 10^{-8} \cdot (f_0^2 \cdot A) \quad (2.2)$$

- Ztrátový odpor:

$$R_{ztr}[\Omega] = 9,96 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{f} \cdot \frac{U}{D} \quad (2.3)$$

- Účinnost:

$$\eta = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_{ztr}} \quad (2.4)$$

- Činitel jakosti:

$$Q = \frac{X_L}{2 \cdot (R_{\Sigma} + R_{ztr})} \equiv \frac{f_0}{\Delta f} \equiv \frac{f_0}{B} \quad (2.5)$$

- Směrová funkce:

$$F = \sin^2\theta, \quad (2.6)$$

kde D je průměr hlavní smyčky, f_0 pracovní kmitočet, B (Δf) je šířka pásma antény a θ je úhel vyzařování v rovině XY .

Parametry pro návrh ladění

K ověření navrhovaného ladícího systému byla využita smyčková anténa tvořená měděným vodičem, jehož materiálové konstanty, tedy relativní permeabilita mědi $\mu_r = 0,99999$ a konduktivita $\sigma = 56 MS \cdot m^{-1}$. Průměr vodiče je $d_v = 4mm$ a délka $l_v = 1,48m$, což činí průměr hlavní smyčky $D = 0,47m$.

Pro přehlednost jsou všechny parametry shrnuty v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Parametry pro návrh ladění

Parametr	Hodnota
Průměr cívky (smyčky) D	$0,47m$
Délka vodiče cívky l_v	$1,48m$
Průměr vodiče cívky D	$4mm$
Počet závitů cívky N	1
Materiál vodiče cívky	Cu (měď)
Permeabilita mědi μ_r	0,99999
Konduktivita mědi σ	$56MS \cdot m^{-1}$
Permeabilita vakua μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cong 1,257 \cdot 10^{-6}H \cdot m^{-1}$

2.2 Ladící část

Přípravek pro realizaci základního ladění byl přejat z předcházející bakalářské práce [7]. Veškeré další práce v rámci tohoto projektu bylo třeba přizpůsobit k plné kompatibilitě s touto přejatou ladící částí.

Během návrhu ladění antény bez pohyblivých částí se vycházelo z teorie smyčkových antén (1.2) a paralelního rezonančního obvodu (1.2.2).

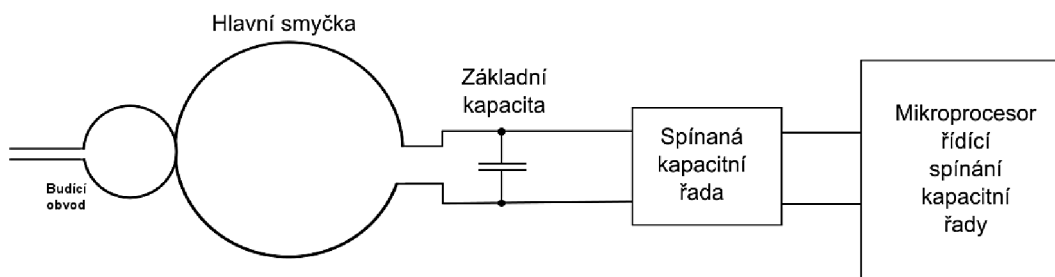
Princip ladění spočívá ve změně kapacity paralelního rezonančního obvodu. V radioamatérské praxi bývá tato změna realizována laditelným vzduchovým kondenzátorem, jehož použití bylo při realizaci ladění vyloučeno. Problematika změny kapacity byla vyřešena využitím kaskády kondenzátorů různých hodnot, jenž jsou kombinovaně spínány, což zapříčinilo v principu poměrně jednoduché ladění různých (rezonančních) kmitočtů.

Pro realizaci ladící části byla využita řada kapacit ve smyslu „binárních hodnot“, viz tabulka 2.2, což umožňuje ladění antény v rozsahu cca $4MHz \div 30MHz$ s krokem $4pF$ (respektive $3,9pF$).

Tab. 2.2: Tabulka hodnot binární řady kapacit

Teoretická C [pF]	512	265	128	64	32	16	8	4
Dostupná C [pF]	560	270	120	68	33	15	8,2	3,9

Blokové schéma principu ladění je na následujícím obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma principu ladění [7]

2.3 Přizpůsobovací část

Přizpůsobovací částí se rozumí elektronický obvod, který je umístěn mezi generátorem a anténou. Tento obvod by měl být schopen zjistit úroveň částí výkonů postupné a odražené vlny a po vyhodnocení naměřených údajů vhodným způsobem nastavit anténu do stavu nejlepšího přizpůsobení.

2.3.1 Princip přizpůsobení

Způsobů přizpůsobení smyčkové antény je několik, viz obrázek 1.2. Pro tuhle práci byl zvolen způsob buzení antény, vystižený na daném obrázku číslem 7. Jedná se o tzv. „gama napájení“, a jeho detail je na obrázku 1.3. Podstata přizpůsobení spočívá ve změně délky napájecího pahýlu. V různých délkách pahýlu by v závislosti na frekvenci měla být i různá míra přizpůsobení. Z praktického hlediska je dostačující, aby porytí napájení tvořilo jen půlkruh antény. Díky symetrii by nemělo smysl půlkruh překračovat, charakter by se zbytečně opakoval.

Existují dva základní způsoby, jak délku napájecího pahýlu měnit:

1. Prvním z nich je vytvoření **posuvné vazby**. Tuhle vazbu by představovala volná svorka, jež by se podél kružnice antény pohybovala systémem motorků a táhel. Výhoda této vazby je plynulost ladění, nevýhodou je však relativní složitost systému.
2. Druhým způsobem je **spínaná vazba**. V tomto způsobu je zvoleno několik pevných pozic, ve kterých jsou vazby umístěny nepohyblivě. Anténa je potom napájena spínaně, individuálními vodiči zavedených do každé vazby. Napájecí systém vyžaduje zařízení s výstupy pro každou vazbu. Výhodou této vazby je její jednoduchost. Nevýhodou je skokové ladění.

Pro tuto práci byl zvolen způsob napájení antény spínanou vazbou s dostatečným množstvím vazeb.

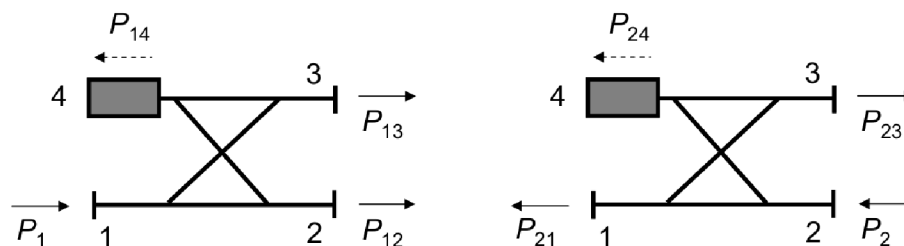
2.3.2 Rozbor přizpůsobovací části

Obvod přizpůsobovací části lze rozdělit dvou bloků a to měřicího a ladícího.

Měřící blok

Úkolem měřicího bloku je prostřednictvím směrové odbočnice $ADC - 26 - 52+$ odklonit přesně definovanou část výkonu vlny postupné a část vlny odražené. Tyto dva zlomky výkonů pak putují k jednotlivým detekčním obvodům $AD8307$, které dle charakteristiky (viz Obr. 2.4) převedou detekovanou část výkonu na napěťovou úroveň, jenž se následně pomocí A/D převodníku mikroprocesoru zpracuje. Pomocí získaných informací o postupné a odražené vlně se poté dá snadno vypočítat dané SWR ((PSV) poměr stojatých vln – Standing Wave Ratio), jehož známost je pro celou přizpůsobovací část nezbytná.

Na obrázku 2.2 je zobrazena schématicky i principiálně směrová odbočnice.



Obr. 2.2: Schématické a principiální zobrazení směrové odbočnice [5]

Mezi důležité parametry směrové odbočnice, charakterizující dělení vstupního signálu mezi obě výstupní brány patří tzv. **vazební útlum** (*coupling*) C a **průchozí (vložený) útlum** (*insertion loss*) IL [dB], jenž jsou dány vztahy

$$C = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_{13}}, \quad (2.7)$$

a

$$IL = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_{12}}, \quad (2.8)$$

Oddělení čtvrté brány od ostatních bran určuje tzv. **izolace** (*isolation*) I [dB]:

$$I = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_{14}} = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_{23}}, \quad (2.9)$$

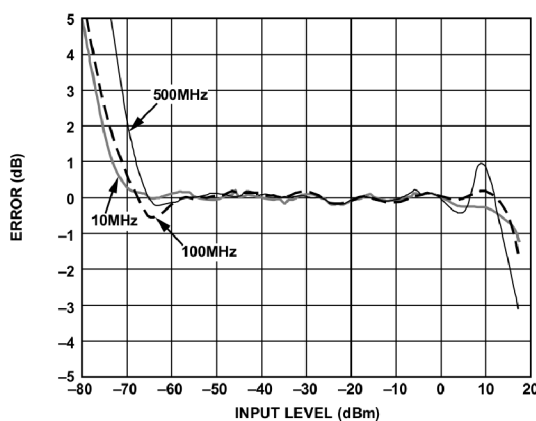
Důležitým parametrem každé směrové odbočnice je dále **směrnost** (*directivity*) D [dB], která vyjadřuje dokonalost oddělení vlny přímé a vlny odražené:

$$D = 10 \cdot \log \frac{P_{13}}{P_{14}} = 10 \cdot \log \frac{P_{13}}{P_{23}}, \quad (2.10)$$

Ze vztahu (2.7) lze při znalosti vstupního výkonu P_1 odvodit výkon oddělený (P_{13}), který je potom v systému dále zpracováván.

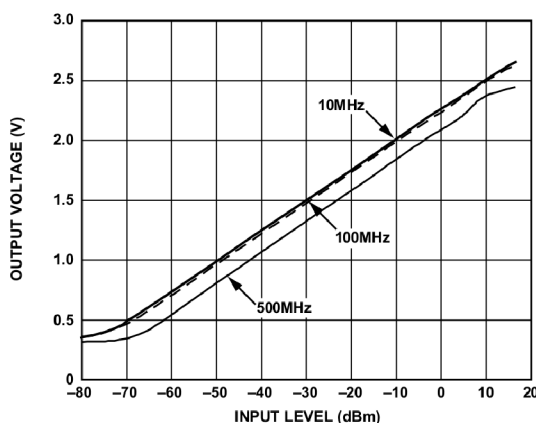
Směrová odbočnice je více-méně reciprokový člen, takže v případě odražené vlny bude fungovat úplně stejně, akorát naopak.

Na obrázku 2.3 je zobrazena závislost chyby výkonu na vstupní úrovni výkonu, převodníku *AD8307*, z níž je zvolen pracovní rozsah $-60 \div 10 \text{ dBm}$.



Obr. 2.3: Závislost chyby výkonu na vstupní úrovni výkonu [10]

Podle navrženého rozsahu lze z převodní charakteristiky (viz obr. 2.4) určit výstupní napětí obvodu *AD8307*, které tedy činí $0,5 \div 2,5 \text{ V}$.



Obr. 2.4: Převodní charakteristika obvodu *AD8307* [10]

Výstupní napětí obvodu *AD8307* lze zjistit pomocí A/D převodníku a dále zpracovávat v PC.

Ladící blok

Ladící blok je schopen přepínat vysokofrekvenční signál mezi různými výstupy, čímž napájí anténu v různých bodech a snaží se tak anténu přizpůsobit.

Přepínače mohou být realizovány pomocí elektromechanických nebo polovodičových součástek. Z elektromechanických jsou to vysokofrekvenční relé, případně moderní součástky na bázi technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Polovodičové přepínače používají jako spínací prvek nejčastěji *PIN* diodu.

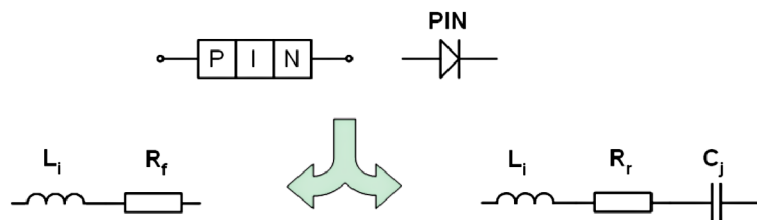
- **Elektromechanické přepínače**

- Vysokofrekvenční relé mají výhodu v tom, že mají schopnost přenášet i velké výkony bez zkreslení, mají nízkým vložný útlum a jsou širokopásmové. Jejich nevýhody jsou zejména velikost, hmotnost a nízká rychlost přepínání. Kvalitní vysokofrekvenční relé se dají použít až do kmitočtů cca 3GHz .
- Přepínače typu MEMS jsou rovněž, jako relé, založeny na mechanickém principu. Mají tedy i podobné parametry. Vyrábí se ve formě integrovaných obvodů a díky malým rozměrům mechanického přepínače (řádově μm) dosahuje jejich širokopásmovost až několika desítek GHz .

- **Polovodičové přepínače**

Ve vysokofrekvenční technice lze přepínače realizovat například za pomoci *PIN* diod, případně na bázi polem řízených *GaAs* tranzistorů v integrovaných obvodech, které mají o něco lepší parametry. *PIN* diody mají však jednu nevýhodu. Jsou omezeny z hlediska velikosti přenášeného výkonu.

U *PIN* diody jsou oblasti *P* a *N* izolována vrstvou *I*, jenž není dotována žádnou příměsí a vykazuje pouze vlastní (intrinziční) vodivost. Pokud *PIN* diodu polarizujeme napětím v přímém směru, dojde k injekci nosičů do obou konců oblasti *I* a její odpor se zmenší v závislosti na procházejícím proudu. Vzhledem ke značné časové konstantě rekombinace a velké době potřebné k odčerpání těchto nosičů z vrstvy *I* se nestačí při vyšších kmitočtech oblast *I* vyprázdnit v průběhu záporné půlperiody signálu. Proto se při přiloženém vysokofrekvenčním napětí ustálí střední hodnota nosičů v oblasti *I* a dioda pro signál představuje nízkou impedanci. Při závěrně polarizované *PIN* diodě dojde k odčerpání náboje z vrstvy *I* a vytvoří se oblast prostorového náboje. Dioda se tak chová jako kondenzátor. Přivedeme-li na závěrně polarizovanou *PIN* diodu vf. napětí, nestačí se vrstva *I* v průběhu kladné půlperiody zaplnit nosiči a dioda představuje pro signál vysokou impedanci. Náhradní obvodové schéma *PIN* diody polarizované v přímém a závěrném směru je nakresleno na Obr. 2.5.[1]



Obr. 2.5: Náhradní obvod *PIN* diody (vpravo propustně, vlevo závěrně) [1]

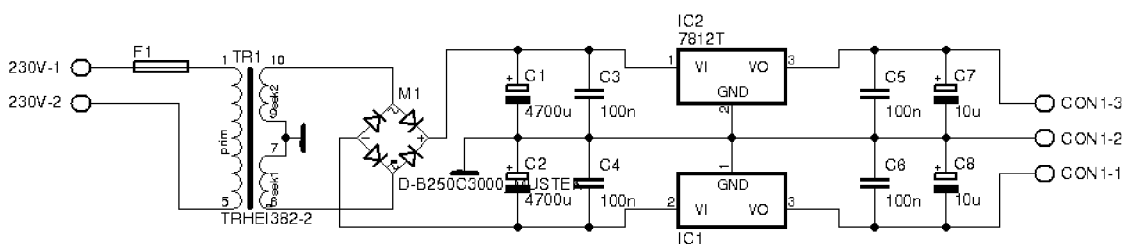
Pokud polarizujeme *PIN* diodu propustně, vykazuje nízký odpor R_f . Pokud je polarizována závěrně, vykazuje vysoký odpor R_r a zároveň kapacitu přechodu C_j . V obou případech vykazuje parazitní indukčnost L_i .

2.3.3 Návrh přizpůsobovací části

V této práci byl zvolen způsob přepínání signálu pomocí polovodičových přepínacích *PIN* diod. Bylo potřeba tedy vyřešit způsob polarizace *PIN* diod zvláště kladným a zvláště záporným napětím.

Dle pracovního rozsahu *PIN* diod *HSMP – 389x*, použitých v této práci, bylo zvoleno napájení $\pm 12V$. Dále je potřeba zajistit, aby diodami protékal alespoň proud $10mA$, kvůli hodnotě propustného odporu R_f , který v takovém případě dle data-sheetu činí 1Ω . Konstrukci napájecí jednotky s takovými požadavky zajistí symetrický transformátor na $\pm 15V$ (s pomalou pojistkou před), dvoucestný usměrňovací můstek, struktura filtračních kondenzátorů a napěťové regulátory pro $+12V$ a $-12V$.

Schéma zapojení napájecí jednotky je na obrázku 2.6.



Obr. 2.6: Napájecí jednotka přizpůsobovací části

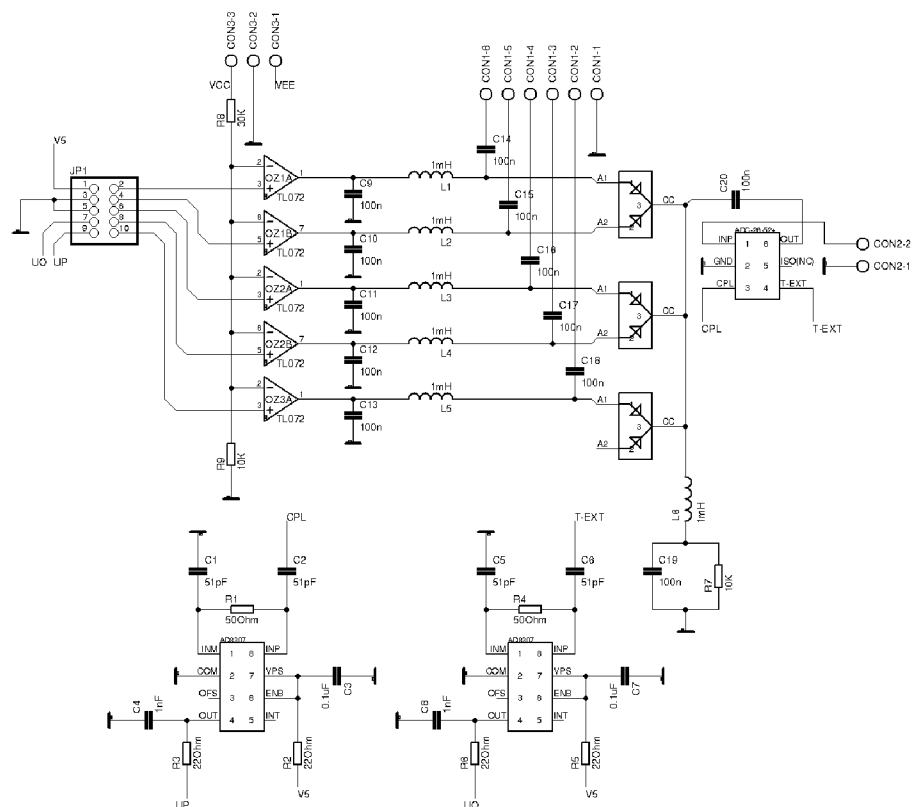
Přizpůsobovací část bude mít 5 výstupů pro 5 různých cest k napájení antény. Ladící blok se tedy bude skládat z 5-ti operačních zesilovačů v zapojení jako komparátor. Na invertující vstupy zesilovačů je přivedeno malé referenční napětí, které v základním sepnutí udržuje záporně pólované *PIN* diody. Přivedením řídicího

signálu na neinvertující vstup jednoho z operačních zesilovačů, určitá *PIN* dioda zpřístupní VF signál do konkrétního výstupu napájení antény.

Úkolem řídicí jednotky je kombinovaně spínat vždy jeden z 5-ti operačních zesilovačů v závislosti na obdržené informaci o PSV.

Realizace

Schéma zapojení celé přizpůsobovací části je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Schéma zapojení přizpůsobovací části systému

Směrová odbočnice a *PIN* diody jsou v technologii SMD, ostatní součástky v klasické technologii „Through-hole“. U rezistorů bylo použito klasické pouzdro s roztečí 10mm u kondenzátorů je rozteč pouzdra 0,5mm. Pro propojení s řídicí částí byl použit 10-ti pinový konektor. Pět pinů slouží pro spínání příslušných operačních zesilovačů. Jeden pin pro přivedení napětí +5V pro napájení převodníků AD8307. Dva piny slouží k vedení měřených výkonů do A/D převodníku v řídicí části a zbývající, poslední dva piny jsou spojeny se zemí.

Rezistory před operačními zesilovači tvoří napěťový dělič, napájen z kladné svorky napájecí jednotky (+12V). Hodnoty 30kΩ a 10kΩ jsou zvoleny k vytvoření malého referenčního napětí

$$U_{ref} = U_{CC} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 3V. \quad (2.11)$$

K oddělení stejnosměrné a výkonné části slouží tlumivky, jež představují pro vysokofrekvenční signál velkou impedanci a zabraňují tedy šíření VF signálu do řídicí části. Dále je systém doplněn o řadu blokovacích kondenzátorů. Hodnoty tlumivek a kondenzátorů bylo třeba volit rozumně s ohledem na to, že zde v podstatě vzniká rezonanční LC obvod. Je nutné zajistit, aby rezonanční kmitočet f_0 tohoto LC obvodu byl nižší, než minimální kmitočet celého projektu, jež je dán rozsahem přejaté ladící desky, což činí $f_{min} = 4MHz$.

Z tohoto důvodu byly zvoleny tlumivky s vyšší indukčností ($1mH$) a za použití Thompsonova vztahu (1.7) v podobě

$$f_{min} < \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}. \quad (2.12)$$

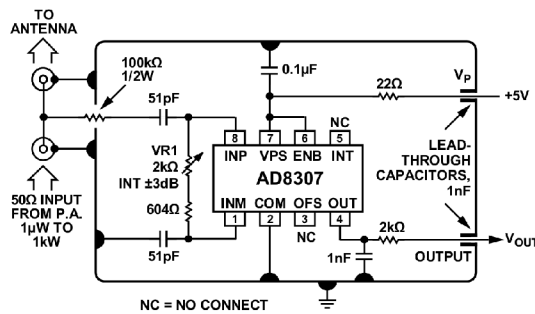
se při známé indukčnosti a úpravou (2.12) hodnota kapacity C vypočítá

$$C < \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{min}^2 \cdot L}. \quad (2.13)$$

Za dodržení podmínky $f < f_{min}$ a s ohledem na dostupné součástky byly zvoleny blokovací kondenzátory o hodnotě $100nF$.

Rezistorem R_7 se pak nastavuje proud PIN diodami $I_f = 12mA$.

Ostatní součástky byly dodány dle datasheetů použitých obvodů. U převodníku $AD8307$ odpovídá zapojení pro požadovanou funkci obrázku 2.8.



Obr. 2.8: Doporučené zapojení funkce „ $1\mu W$ to $1kW$ 50Ω power meter“ [10]

2.4 Řídící část

Úkolem řídicí části je na základě pokynů obslužného programu v PC kombinovaně spínat kapacitní řadu ladící části, čili anténu tak primárně ladit. Dalším úkolem je vyhodnocovat informace o PSV a spínáním příslušného operačního zesilovače přizpůsobovací části měnit bod napájení antény a tím ji přizpůsobovat.

Tyto procesy bude obsluhovat mikroprocesor *ATmega16*, jenž má více portů a pohodlněji se tak bude moct využít zvláště port pro ladění a zvláště pro přizpůsobování, což odlehčí požadavkům na software. K ladění je zapotřebí 8 pinů + 2 (napájení a zem), k přizpůsobování je potřeba 5 pinů + 2 piny (pro napájení a zem) + 2 (snímání postupné a odražené vlny), jenž nesou informaci o přizpůsobení. Tyto signály jsou přivedeny na piny pro zpracování A/D převodu.

Mikroprocesor bude s PC komunikovat pomocí sériové linky přes rozhraní USB. Pro správnou komunikaci byl použit převodník úrovně *FT232RL*.

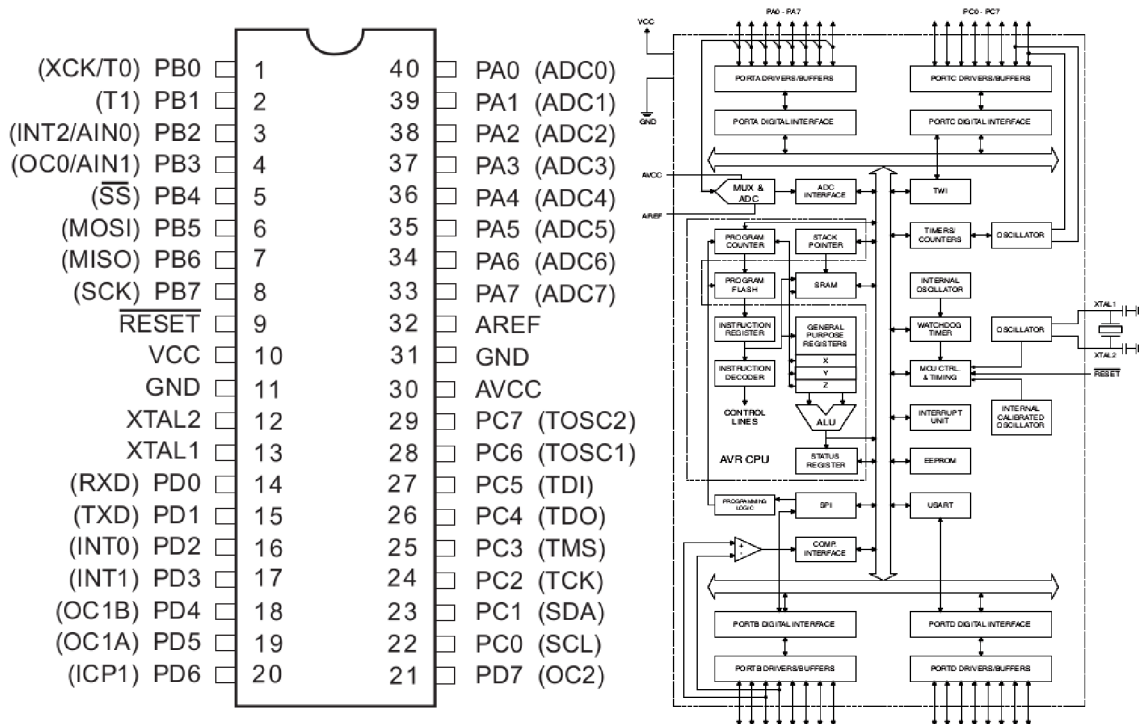
2.4.1 Řídící mikroprocesor ATmega16

Jak bylo psáno v úvodní části této kapitoly, použitý bude mikroprocesor ATmega16. Tento obvod nabízí pěkný poměr cena/výkon, je poměrně rozšířený a tedy dobře dostupný.

Rozmístění pinů a blokové schéma mikroprocesoru ATmega16 je na obrázku 2.9.

Základní parametry 8-bitového mikroprocesoru ATmega16

- Výkon – 16MIPS/16MHz (8MIPS/8MHz – verze *L*)
- Plně statická funkce
- 131 výkonných instrukcí, většinou jedno-cyklových
- 32 osmibitových registrů pro obecné použití.
- 16 KBytů programová Flash paměť, programovatelná přímo v aplikaci s možností uzamknutí, 10.000 zápisových cyklů
- 512 Bytová datová EEPROM paměť, 100.000 zápisových cyklů
- 1 KByte vnitřní SRAM paměť
- 8-kanálový 10-bitový A/D převodník, analogový komparátor
- 4 PWM výstupy
- Programovatelný USART
- Dva 8-bitové čítače, jeden 16-bitový, každý s vlastní předděličkou
- Tři režimy spánku: active (1, 1mA), idle (0, 35mA) a power-down (méně než 1μA) – na 1MHz a 3V
- 32 programovatelných I/O vývodů
- Napájecí napětí 4, 5 ÷ 5, 5V (2, 7 ÷ 5, 5V – verze *L*)

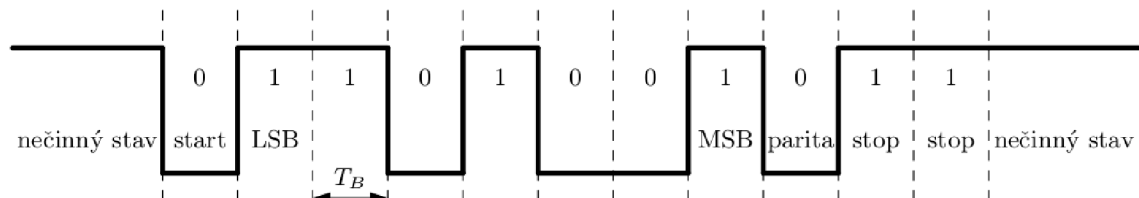


Obr. 2.9: ATmega16 – Rozmístění pinů (vlevo), blokové schéma (vpravo) [9]

2.4.2 Asynchronní komunikace UART

UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) je integrovaný hardware, který realizuje asynchronní sériovou komunikaci s okolím. U asynchronní komunikace se data mohou vysílat v jakémkoliv okamžiku. Na rozdíl od synchronní komunikace zde není pro přenos zapotřebí synchronizačního, hodinového signálu. Je zde využita předem zvolená struktura datového rámce, pomocí něhož dochází k přenosu dat. Tento datový rámec obsahuje jeden start-bit (vždy log. 0), poté 5 ÷ 9 datových bitů, jeden volitelný paritní bit (jednoduché zabezpečení – lichá „odd“, nebo sudá „even“ parita) a jeden nebo dva stop-bity.

Příklad jednoho datového rámce je na obrázku 2.10.



Obr. 2.10: Struktura asynchronního rámce, bitové slovo 0b1001011 [4]

T_B značí bitovou periodu.

Pro spolehlivý přenos je nutné, aby vysílač i přijímač používali stejné nastavení rámce, dále aby se symbolová rychlost vysílače shodovala se symbolovou rychlostí přijímače. Běžně používané symbolové rychlosti jsou: 9600, 19200, nebo 38400.

Převodník FT232RL

Obvod *FT232R* je převodník USB-USART, který má přenosovou rychlost $300Bd \div 3MBd$. Tento obvod obsahuje interní vyrovnávací paměť (384B pro směr „PC → zařízení“ a 128B pro směr „zařízení → PC“). Komunikace probíhá pomocí tří hlavních vodičů RXD (příjem), TXD (vysílání) a společné zemi GND. Obvod může pracovat jak v 5V tak ve 3,3V logice. Napájecí napětí je $4,35 \div 5,25V$ a lze jej napájet přímo z USB.

Vlastnosti převodníku *FT232L*:

- integrované hodiny (6, 12, 24 a 48MHz), které mohou být vyvedeny
- možnost připojení 5V; 3,3V; 2,8V; 1,8V logiky
- integrovaná 1024 Bytů interní EEPROM
- integrované USB rezistory
- napájecí napětí $3,3 \div 5,25V$

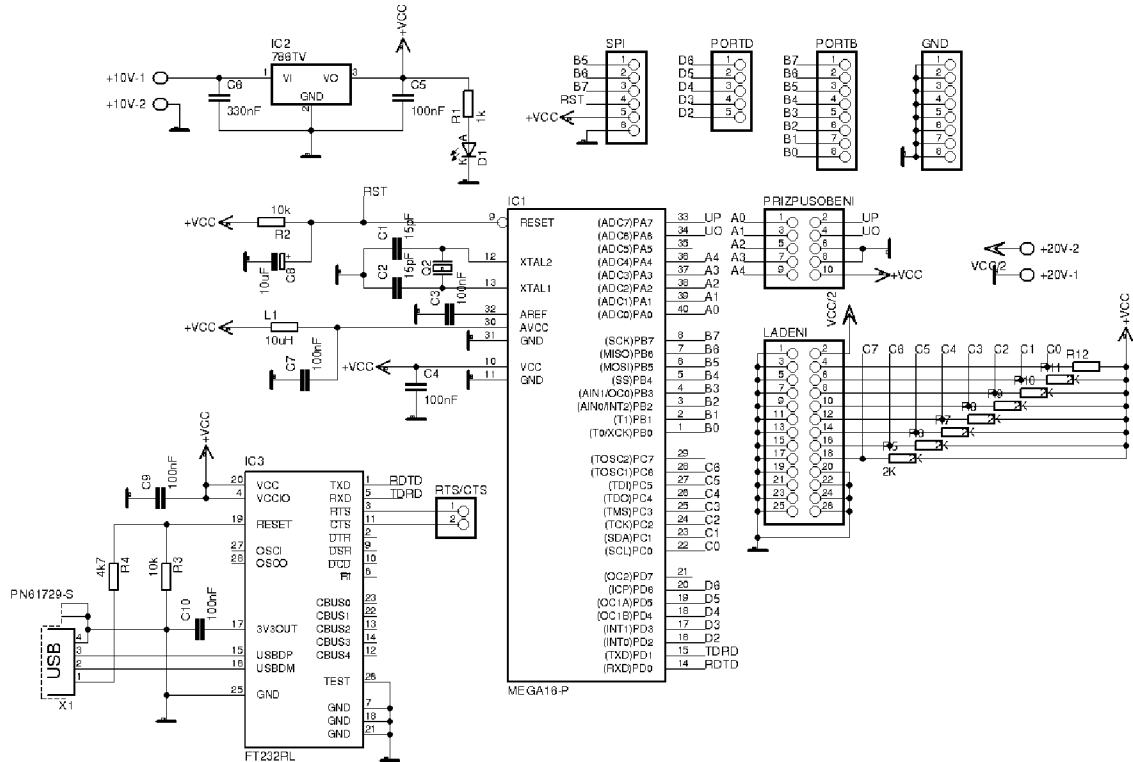
Názvy, čísla a popis vývodů obvodu *FT232RL* jsou shrnuty v tabulce 2.3.

Tab. 2.3: Názvy, čísla a popis vývodů obvodu *FT232RL*

Název	Pin	Popis
VCC	20	Napájení obvodu $3,3 \div 5,25V$
VCCIO	4	Napájení pro USART a CBUS výstupy, $1,8 \div 5,25V$
GND	7, 8, 21	Zemní piny
AGND	25	Analogová zem – pro interní oscilátor
3V3OUT	17	Výstup z interního stabilizátoru (připojuje se $C = 100nF$)
RESET#	19	Reset. Nemusí se využít (uvnitř připojen přes R na VCCIO)
TEST	26	Pro připojení I.C testovací mód – v provozu se zemní
OSCI, OSCO	27, 28	Pro připojení externího 12MHz krystalu (nemusí se využít)
USBDP, USBDM	15, 16	Data do USB rozhraní (P - plus, M - minus), úroveň 3,3V
TXD, RXD	1, 5	Vysílání (TXD) a příjem (RXD) dat po USART
DTR#, RTS#	2, 3	Výstupní signály pro RS232
RI# ,DSR#, DCD#, CTS#	6, 9, 10, 11	Vstupní signály pro RS232
CBUS[0 ÷ 4]	23, 22, 13, 14, 12	Port SBUS. Lze nakonfigurovat pro více funkcí (0 ÷ 4): TXLED#, RXLED#, PWREN#, TXDEN, SLEEP#

2.4.3 Návrh řídicího obvodu

Při návrhu řídicí části systému bylo vycházeno z doporučených zapojení mikroprocesoru ATmega16 a převodníku FT232RL. Celé schéma řízení je na obrázku 2.11.



Obr. 2.11: Schéma zapojení řídicí části systému

Jako řídicí jednotka je použitý mikroprocesor *ATmega16*. Jeho zdroj hodinového signálu představuje 16MHz-ový krystal s kondenzátory. Doporučenou hodnotu kondenzátorů je $15pF$. Hodnota krystalu je zvolena pro dosažení maximální přesnosti nastavení přenosové rychlosti. Rezistor R_2 a kondenzátor C_8 na resetu (RST vstup) mikroprocesoru společně tvoří dolně propustný filtr, který slouží jako tzv. nulovací obvod a zapříčiní reset při připojení napájecího napětí.

Pro spínání ladící části systému je využitý $PORT-C$ který má své piny vyvedeny na konektor 2×13 (LADENI). Všechny řídicí piny portu C jsou doplněny o rezistory $R_5 \div R_{12}$ s hodnotou $2k\Omega$, jenž jsou připojeny k napájecímu napětí $+5V$. Je to z toho důvodu, že mikroprocesor spíná logickou 0. Tento zákrok byl inspirován předcházející prací, které musí tento projekt korespondovat. [7]

K řízení přizpůsobovací části systému slouží $PORT-A$. Piny tohoto portu jsou vyvedeny na konektor 2×5 (PRIZPUSOBENI) mikroprocesor jej řídí logickou 1.

Pro sériovou komunikaci byly využity piny $PD0$ a $PD1$ portu D . Napěťový převodník $FT232RL$ je doplněn kondenzátory, podle doporučeného zapojení z datasheetu.

K výstupu stabilizátoru je připojena další LED pro indikaci vstupního napětí.

6 pinů ($MISO$, $MOSI$, SCK , V_{CC} , RST a GND) bylo vyvedeno kvůli externímu programování mikroprocesoru pomocí programátoru.

Ostatní piny mikroprocesoru byly vyvedeny k případnému budoucímu uplatnění a jsou tedy neobsazeny.

Realizace

Dle schématu na obrázku 2.11 byla vytvořena DPS. V SMD technologii je použitý obvod $FT232RL$ a rezistory $R_5 \div R_{12}$ ostatní součástky jsou klasicky v „Through-hole“ technologii. U rezistorů bylo použito pouzdro s roztečí vývodů $10mm$ u kondenzátorů je rozteč pouzdra $0,5mm$. Pro propojení s ladící částí byl použit 26-ti pinový konektor ve stejném obsazení pinů, jak tomu bylo v ladící částí. Pro propojení s přizpůsobovací částí byl použit 10-ti pinový konektor. Napájecí napětí činí $+10V$, jež je stabilizátorem sraženo na $+5V$. Napětí $+10V$ je však dále vedeno do ladící části, kde se tento potenciál uplácí.

3 SOFTWAREVÉ VYBAVENÍ

Softwarová výbava celého ladícího systému se skládá ze dvou programů – řídicího programu (3.1), který je nainstalován přímo na zařízení a obslužného programu (3.2), jenž je nainstalován v počítači a obsluhován uživatelem.

3.1 Program mikroprocesoru

Ladící, přejatá část systému se skládá celkem z osmi spínaných bloků, čehož se dá efektivně využít během vývoje programu, neboť každý z bloků může být reprezentován jedním bitem. Dohromady těchto osm bloků tvoří tedy byte, který je pak zastoupen celým portem mikroprocesoru, díky čemuž lze s celou ladící částí efektivněji pracovat. Ladící část je v řídicím systému zastoupena portem C . Přízpůsobovací část reprezentuje port A .

3.1.1 Nastavení mikroprocesoru

Ke správné funkci programu je potřeba nastavit mikroprocesor do správného režimu.

Nastavení sériového přenosu

Všechna UART zařízení obsahují následující základní části:

- Sériový přijímač (Rx) – (u ATmega16 pin $PD0$):
 - Přijímá sériová vstupní data.
 - Převádí je do paralelní reprezentace, která je uložena v přijímacím datovém registru $RxDR$ pro přenos do mikroprocesoru.
- Sériový vysílač (Tx) – (u ATmega16 pin $PD1$):
 - Přijímá paralelní datová slova z vysílacího datového registru $TxDR$.
 - Převádí tato slova do sériové podoby k následnému přenosu.
- Obousměrný buffer datové sběrnice
 - Zprostředkovává přenos paralelních dat z mikroprocesoru do $TxDR$ a z $RxDR$ do mikroprocesoru prostřednictvím datové sběrnice.
- Externí hodinové signály $RxCLK$ a $TxCLK$ pro přijímací a vysílací část.

Tab. 3.1: Nastavení stavového registru B – $UCSRB$

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8
Hodnota	0	0	0	1	1	0	0	0

Význam jednotlivých bitů:

- RXCIE – Povolení přerušení po příjmu rámce
- TXCIE – Povolení přerušení po odeslání rámce
- UDRIE – Povolení přerušení po vyprázdnění datového registru
- **RXEN** – Povolení příjmu
- **TXEN** – Povolení vysílání
- UCSZ2 – Nastavení počtu datových bitů (spolu s UCSZ1:0 v registru *UCSRC*)
- RXB8 – Poslední bit při příjmu devíti datových bitů
- TXB8 – Poslední bit při odeslání devíti datových bitů

Tab. 3.2: Nastavení stavového registru C – *UCSRC*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	URSEL	UMSEL	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL
Hodnota	1	0	0	0	1	1	1	0

Význam jednotlivých bitů:

- **URSEL** – Povolení zápisu do registru *UCSRC*
- **UMSEL** – Nastavení přenosu (synchronní / **asynchronní**)
- **UPM1** – Nastavení parity (vypnuto)
- **UPM0** – Nastavení parity (vypnuto)
- **USBS** – Nastavení počtu stopbitů (**2**)
- **UCSZ1:0** – Nastavení počtu datových bitů (**8**)
- **UCPOL** – Nastavení hodin (pro synchronní přenos)

Nastavení A/D převodníku

Mikroprocesor umožňuje zpracovávat analogové signály pomocí A/D převodníku. Mikroprocesor ATmega16 je vybaven 8-mi kanálovým, 10-ti bitovým převodníkem (piny *PA0* ÷ *PA7*). Minimální hodnota převodníku je $0V$, maximální je V_{ref} . Po skončení převodu se výsledek zapisuje do datových registrů *ADCH* : *L*.

Tab. 3.3: Nastavení výběrového registru – *ADMUX*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0
Hodnota	1	1	1	0	0	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>

Význam jednotlivých bitů:

- **REFS1:0** – Nastavení referenční hodnoty napětí (interní (2, 56V))
- **ADLAR** – Nastavení převodníku (**8-mi bitový režim**)
- **MUX4:0** – Nastavení kanálu (přepínáno během programu)

Tab. 3.4: Nastavení ovládacího a stavového registru A – *ADCSRA*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0
Hodnota	1	X	0	X	0	1	1	1

Význam jednotlivých bitů:

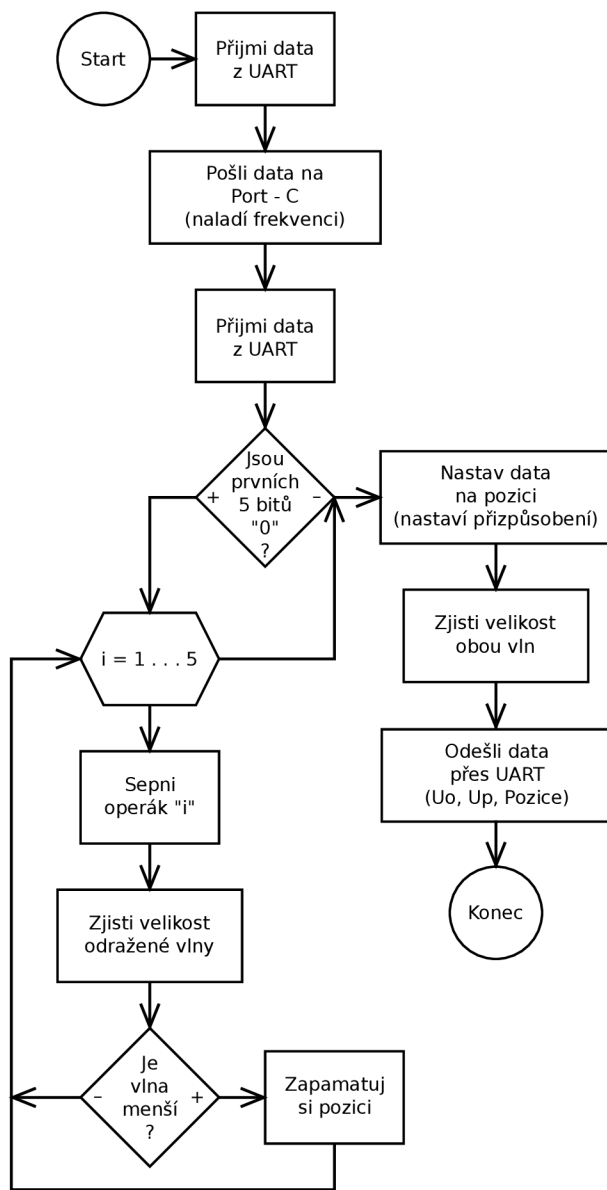
- **ADEN** – Zapnutí A/D převodníku
- **ADSC** – Spouštění měření (spínáno během programu)
- **ADATE** – Automatické spouštění A/D převodníku
- **ADIF** – Čištění registrů po výběru měření (spínáno během programu)
- **ADIE** – Povolení přerušení po skončení měření
- **ADPS2:0** – Nastavení předděličky (**128**)

Shrnutí

- V dosavadním nastavení nemá ani datový přenos, ani A/D převodník povoleno přerušení (v programu jsou jednotlivé požadavky pro přenos dat kontrolovány v potřebný okamžik pomocí cyklů a jednotlivá A/D měření jsou v patřičný okamžik volány pomocí funkcí)
- Symbolová rychlost přenosu je nastavena na hodnotu 9600 BAUD
- Struktura rámce je 1 start bit, 8 datových bitů, bez parity, 2 stopbity
- A/D převod je osmibitový (horní bity datového registru *ADCL* se vynechají z důvodu zbytečnosti zaznamenávání šumů a jednoduššího následného přenosu dat – zbývá 8 bitů, tedy přesně 1 byte)
- Předdělička A/D převodníku je nastavena na 128 (pomalejší, ale přesnější měření)

3.1.2 Funkce programu

Funkce řídicího programu je naznačena ve vývojovém diagramu na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Vývojový diagram řídicího programu

Program v nekonečném cyklu neustále kontroluje příchod bytu pro naladění frekvence antény. Po jeho obdržení je hodnota bytu přímo odeslána na port *C*, čímž se anténa naladí.

Dále se pak čeká na další byte, který určuje, který operační zesilovač pro přizpůsobení je třeba sepnout. Pokud je druhý byte nulový (nastane při volbě režimu „auto“ v obslužném programu), přejde program do automatického režimu.

Na portu A je sepnut první operační zesilovač v přizpůsobovací části. Pak se zavolá funkce A/D převodníku s přepnutím na kanál odražené vlny. Mikroprocesor po změření velikosti napětí převedené z převodníku AD8307 porovná hodnotu s předchozím vzorkem a v případě, že je menší (v případě prvního měření je naměřená hodnota VŽDY menší, než „předchozí“, neboť při vytváření proměnné pro odraženou vlnu jí byla přidělena nejhorší možná hodnota), nahradí jej a uloží pozici operačního zesilovače.

Program takto postupně prověří pozice všech pěti možností a potom opustí cyklus. V tento moment je známá velikost nejmenší odražené vlny a její pozice. Mikroprocesor sepne operační zesilovač příslušné adresy a zavolá funkci ke změření vlny postupně.

Program potom nakonec obslužnému programu postupně odešle zjištěná data shrnutá do třech bytů v pořadí: odražená vlna, postupná vlna, pozice. Po odeslání dat se opět zacyklí do nekonečné smyčky sledujíc příchod nových dat.

Řídící program vychází především z velikosti odražené vlny, neboť právě ta má zásadní vliv na výsledné PSV.

Zdrojový kód programu v jazyce C je vložen do příloh.

3.2 Obslužný program

Obslužný program byl vytvořen v jazyce $C\#$ v prostředí *Microsoft Visual Studio*. Prostřednictvím tohoto programu je uživatel schopen ladit anténu na příslušný kmitočet spínáním jednotlivých bloků ladící části systému. Dále je zde možnost zvolit si konkrétní pozici napájení antény, nebo volbu auto, kdy se pozice vybere automaticky na základě nejlepšího přizpůsobení. Obratem obdrží od řídicího programu informace o přizpůsobení antény, z nichž je schopen spočítat příslušné PSV a zároveň informaci o pozici, na které je toto PSV vykazováno.

3.2.1 Funkce programu

Nejdůležitější je, aby měl program identické nastavení přenosové rychlosti, jako řídicí program mikroprocesoru (9600 BAUD) a stejné nastavení datového rámce (1 start-bit, 8 datových bitů, 0 paritních a 2 stopbity).

Po nastavení přenosu přejde program do hlavní části. V ní má uživatel jedinou možnost a to připojit se k sériovému rozhraní. Po úspěšném připojení se uživateli zpřístupní editovatelné položky jako jsou: obvod smyčky a průměr vodiče smyčkové antény, z čehož program vypočítá indukčnost (materiál je nastaven na měď). Dále má uživatel možnost volby kapacity, kterou anténu naladí a pozice ze které se anténa

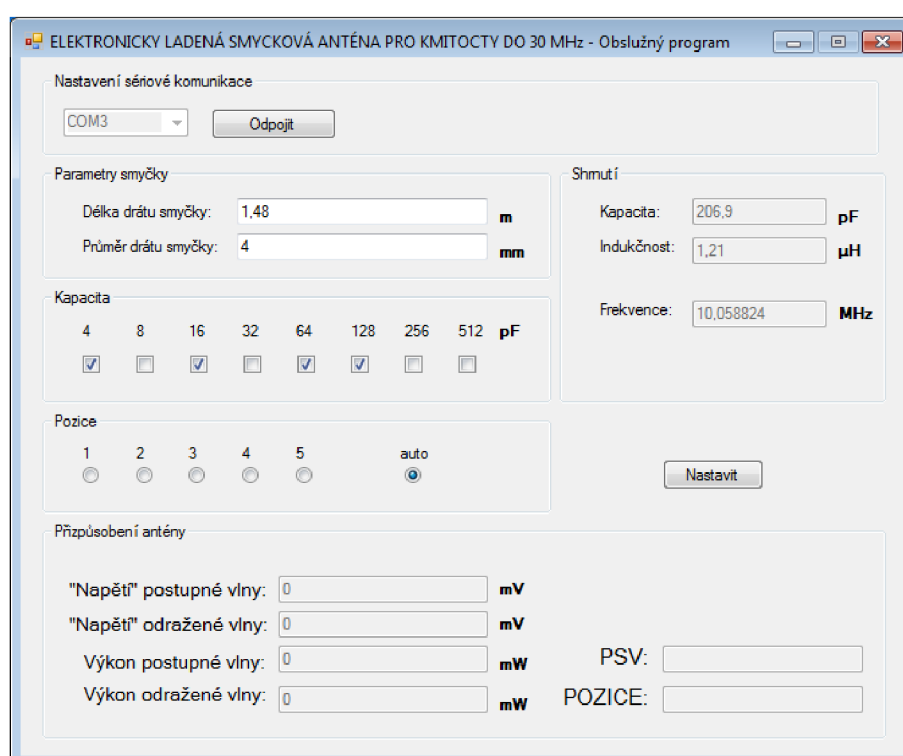
napájí. Z výsledné kapacity a spočítané indukčnosti program vypočítá frekvenci antény.

Po zadání všech hodnot má uživatel možnost odeslat příkaz ladění tlačítkem „Nastavit“. V ten okamžik se řídicímu programu odešlou byty s odpovídajícím požadavkem ladění a přizpůsobení.

Po chvíli obslužný program obdrží informace o nejlepší PSV a jeho pozici. Do té doby uživatel nemá možnost nic měnit. Po spočítání příslušných hodnot je povolena opět možnost odeslání nového nastavení.

Podoba obslužného programu je na obrázku 3.2.

Zdrojový kód tohoto programu je rovněž přidán do příloh na přiloženém *CD*.

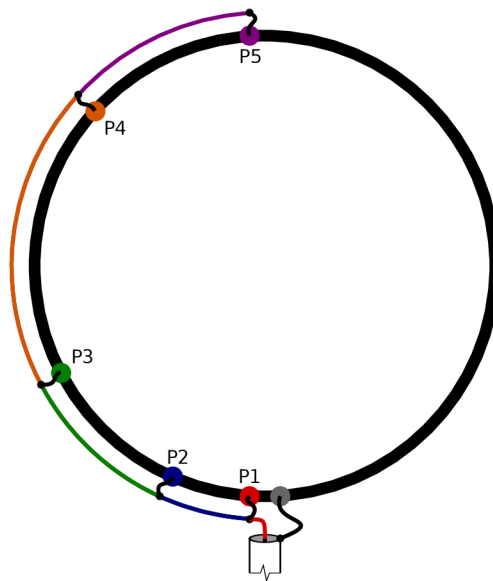


Obr. 3.2: Vzhled obslužného programu

4 MĚŘENÍ A VÝSLEDKY

4.1 Příprava

Jelikož byl v této práci zvolen způsob buzení antény pomocí „gama napájení“ se spínanou vazbou, bylo nejdříve potřeba rozumně rozmístit napájecí body po půlkruhu antény. Napájecích bodů je celkem 5, tudíž dva body obsadily pozice ve vzdálenosti 0π a π od země. Další tři body byly rozmístěny s logickou posloupností $\frac{1\cdot\pi}{12} = 15^\circ$, $\frac{(1+2)\cdot\pi}{12} = 45^\circ$ a $\frac{(1+2+4)\cdot\pi}{12} = 105^\circ$. Schématicky je volba napájecích vazeb zobrazena na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Rozmístění napájecích vazeb

Měření parametrů probíhalo na vektorovém obvodovém analyzátoru firmy Rohde&Schwarz. Napájení přípravků bylo $9V$ a $230 \sim \pm 12V$.

4.2 Měření parametrů antény

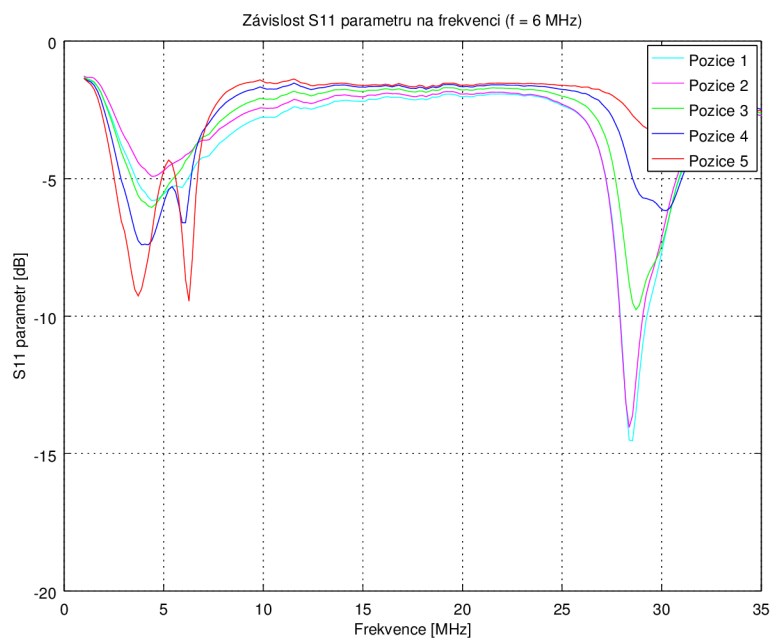
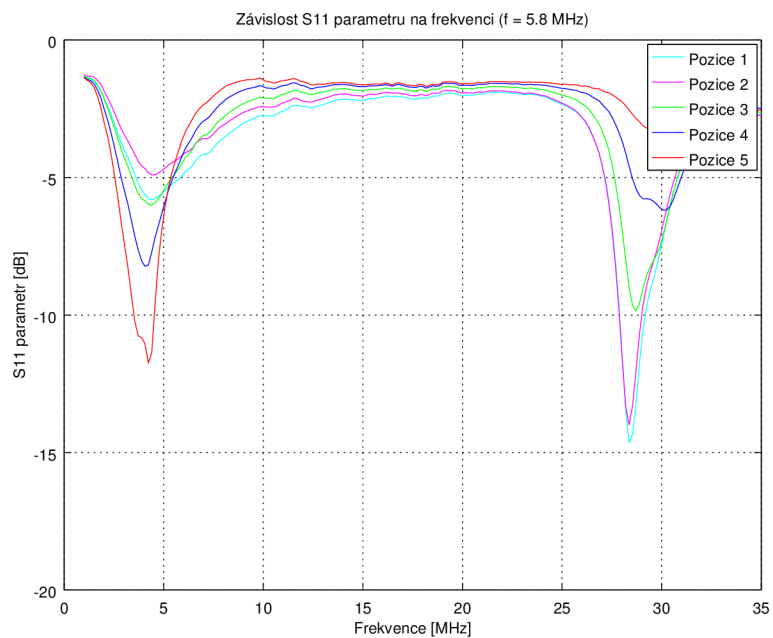
Z hlediska přizpůsobení antény má největší význam s_{11} parametr. Jedná se o rozptylový parametr, který je definován následující maticí

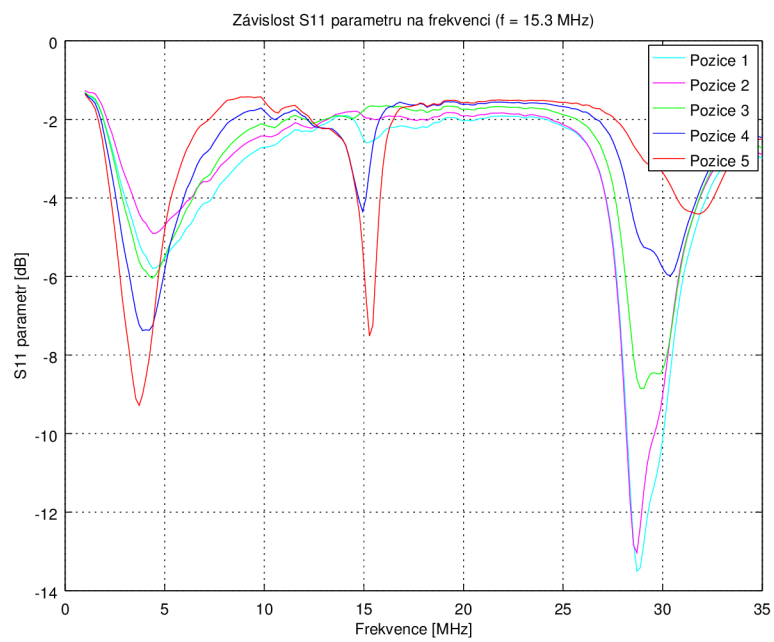
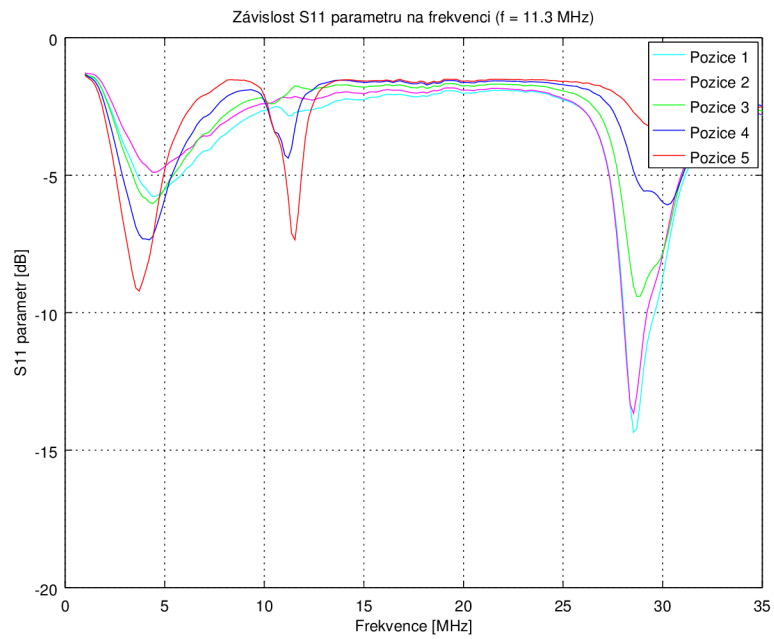
$$[b] = [s][a] \quad (4.1)$$

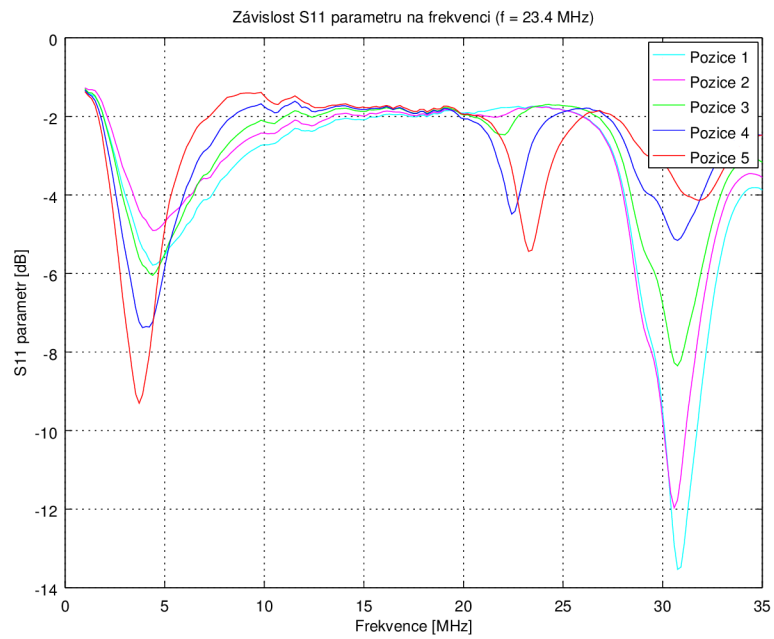
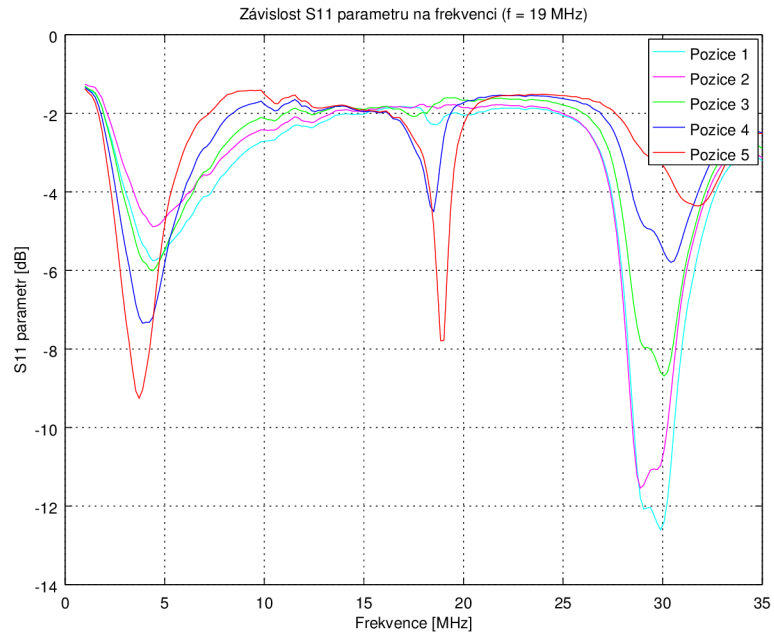
kde b je napěťová vlna vystupující z antény, a je napěťová vlna vstupující do antény. Z této matice vyplývá, že čím menší parametr s_{11} je, tím je anténa lépe přizpůsobená.

Během měření parametrů bylo zvoleno několik kmitočtů z oblastí nízkých, středních a vysokých kmitočtů daného rozsahu antény.

Grafy

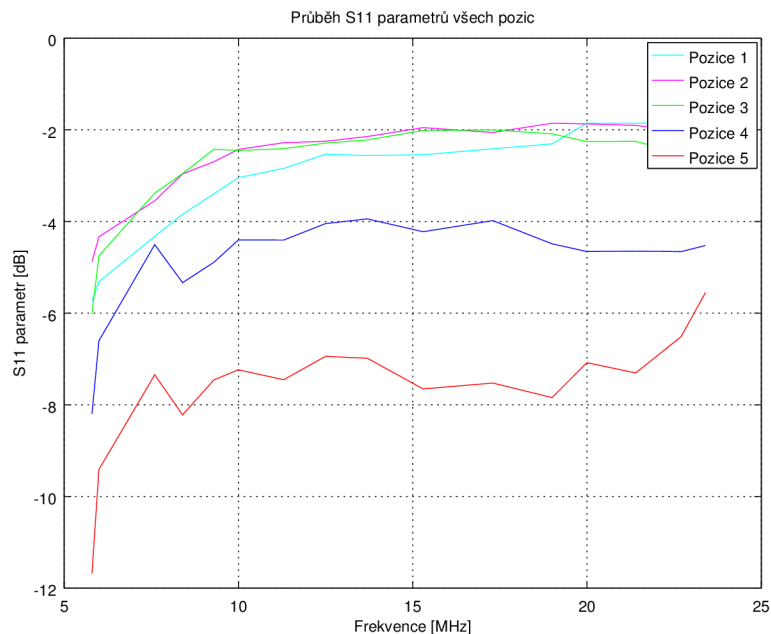




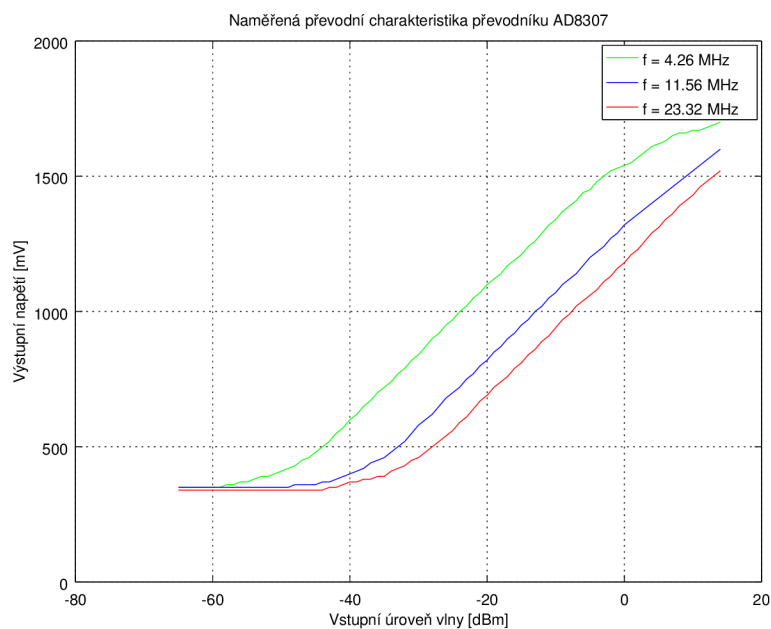


Z výsledků měření lze vyčíst, že anténa vykazovala nejlepší přizpůsobení v napájecí vazbě č. 5 a to v celém rozsahu. Jako další nasledovala vazba č. 4 a u zbylých třech pozic už přizpůsobení bylo minimální, nebo téměř žádné.

Celkovou závislost s_{11} parametru antény popisuje následující graf.



V dalším bodě byla proměřena převodní charakteristika převodníku AD8307, kde naměřená data byla odečítána přímo z obslužného programu.



Všechny záznamy o měření spolu se zpracovávajícím skriptem *MatLabu* jsou uloženy v příloze.

5 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

Na základě návrhu desek plošných spojů antény s elektronickým laděním byly sestaveny dva nové funkční celky (přizpůsobovací a řídicí). Během celého vývoje bylo zapotřebí dbát určitých pravidel, aby byla splněna kompatibilita systému s již dříve navrženou ladící částí [7].

Navržený ladící systém byl realizován s řídicím mikroprocesorem ATmega16. Byl vytvořen kompletní software pro elektronické ladění smyčkové antény tak, aby ji bylo možné řídit z PC pomocí USB portu.

Jako způsob přizpůsobování byl zvolen princip buzení antény změnou pozice jejího napájení, tzv. „gama napájením“. Bylo zvoleno 5 různých napájecí bodů, ve kterých bylo buzení navázáno.

Princip přizpůsobování byl ověřen měřením na vektorovém obvodovém analyzátoru, během kterého se ukázalo, že nejlepší přizpůsobení, a to v celém rozsahu, anténa vykazovala na 5 pozici – nejvzdálenější od země. Dva postranní laloky mohly být způsobeny parazitními rezoncencemi, vzniklých vlivem vytvořených přípravků.

Bohužel se během realizace podařilo poškodit jeden ze dvou převodníků AD8307, což znemožnilo funkci v režimu „auto“, kdy by bylo PSV zjišťováno automaticky a změna pozice napájení by probíhala taky automaticky. Nicméně naměřená převodní charakteristika druhého z převodníků, jejíž průběh odpovídá podkladu z technické dokumentace převodníku, víceméně potvrzuje funkčnost programu.

Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafů.

Všechny návrhy hardwaru a softwaru spolu se záznamy o měření byly uloženy do příloh na přiloženém CD.

6 ZÁVĚR

Cílem tohoto projektu byla realizace ladícího systému smyčkové antény. Celý systém se skládá ze tří základních funkčních celků (ladícího, přizpůsobovacího a řídicího).

V první, ladící části (2.2), je k naladění antény využita již dříve zhotovená deska s kaskádou spínaných kondenzátorů [7].

Ve druhé části (přizpůsobovací 2.3) je přizpůsobování realizováno tzv. „gama napájením“, jímž je umožněno jednoduchým způsobem přizpůsobovat anténu (pomocí změny délky napájecího pahýlu X).

Úkolem třetí části (řídicí 2.4) je spínat ladící část, vyhodnocovat výsledky o přizpůsobení a následně doladovat anténu spínáním různých pozic napájení antény.

Změna pozic napájení je realizována pomocí 5-ti operačních zesilovačů, jež jsou v zapojení jako komparátor. Na jejich invertující vstupy je přivedeno malé referenční napětí, které poté v základním sepnutí udržují záporně pólované PIN diody, přes které je anténa napájena do různých bodů a tím je blokován průchod VF signálu.

Přivedením řídicího signálu na neinvertující vstup jednoho z operačních zesilovačů, zpřístupní daná PIN VF signál do konkrétního bodu napájení antény.

Přizpůsobovací část obsahuje směrovou odbočnici $ADC - 26 - 52+$, jež odvádí část odražené a část postupné vlny, na vstupy detekčních obvodů $AD8307$, které jsou schopny převést výkonovou úroveň na napětí, s nímž se dá následně pracovat. Výsledky o přizpůsobení antény zpracovává mikroprocesor.

Ladění a přizpůsobování budícím obvodem je řízeno řídicí částí. Tato část obsahuje mikroprocesor $ATmega16$, který reaguje na požadavky obslužného programu v PC a ladí anténu na potřebný kmitočet. Dále vyhodnocuje informace o napěťových vlnách převedené převodníkem $AD8307$ a je schopen přizpůsobit anténu změnou pozice jejího napájení. Přenos dat mezi mikroprocesorem a PC probíhá po sériové lince pomocí rozhraní USB.

Ladění antény bylo úspěšně realizováno a parametry z oblasti přizpůsobování byly proměřeny a zaznamenány do grafů. Převodní charakteristika převodníku $AD8307$ byla rovněž ověřena měřením.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VÁGNER, PETR. *Vysokofrekvenční technika* [pdf]. Brno: VUT–FEKT, Ústav radioelektroniky, 2013. Dostupné z URL: www.vutbr.cz.
- [2] SVAČINA, JIŘÍ; HANUS, STANISLAV. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika – přednášky* [pdf]. Brno: VUT–FEKT, Ústav radioelektroniky, 01-11-2002. Dostupné z URL: www.vutbr.cz.
- [3] PROCHÁZKA, MIROSLAV. *Antény: Encyklopedická příručka. 1. vyd.* Praha: BEN – technická literatura, 2000, 287 s. ISBN: 80 – 860 – 5659 – 7. Dostupné z URL: www.anteny-info.cz.
- [4] FRÝZA, TOMÁŠ; ŠEBESTA, JIŘÍ. *Mikroprocesorová technika a embedded systémy – cvičení* [pdf]. Brno: VUT–FEKT, Ústav radioelektroniky, 12-10-2011. Dostupné z URL: www.urel.feec.vutbr.cz.
- [5] LÁČÍK, JAROSLAV. *Mikrovlnná technika (Výkonové děliče a směrové vazební členy) – přednášky* [pdf]. Brno: VUT–FEKT, Ústav radioelektroniky, 12-10-2011. Dostupné z URL: www.vutbr.cz.
- [6] DVORSKÝ, MAREK. *Laděná magnetická anténa – Elektrovue* [pdf]. Ostrava: VSB–FEI, Katedra telekomunikační techniky, 11-06-2008. Dostupné z URL: www.elektrovue.cz.
- [7] SVOBODA, LUDĚK. *Elektronicky laděná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz* [pdf]. Brno: VUT–FEKT, Ústav radioelektroniky, 06-06-2008. Dostupné z URL: www.vutbr.cz.
- [8] DUŠEK, MARTIN; MÜLLER, TOMÁŠ. *MMIA – FTDI FT235* [online]. Brno: VUT–FEKT, Ústav radioelektroniky. Dostupné z URL: www.urel.feec.vutbr.cz.
- [9] ATMEL. *8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash* [pdf]. Datasheet. Dostupné z URL: www.atmel.com.
- [10] ANALOG DEVICES. *AD8307: Low Cost, DC to 500 MHz, 92 dB Logarithmic Amplifier* [pdf]. Datasheet. Dostupné z URL: www.analog.com.
- [11] FTDI CHIP. *FT232R USB UART IC* [pdf]. Datasheet. Dostupné z URL: www.ftdichip.com.
- [12] MINI-CIRCUITS. *Surface Mount Directional Coupler ADC-26-52+; 50Ω, 10 ÷ 500MHz* [pdf]. Datasheet. Dostupné z URL: www.minicircuits.com.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

MLA smyčková anténa – Magnetic Loop Antenna

HF krátké vlny – High Frequency

RF (VF) vysoká frekvence – Radio frequency ($3kHz \div 300GHz$)

SWR (PSV) poměr stojatých vln – Standing Wave Ratio

RL útlum odrazů – Return Loss

RLC rezonanční obvod – složený z rezistoru R , induktoru L a kapacitoru C

DPS deska plošných spojů

SMD Součástka pro povrchovou montáž – Surface Mounted Device

f_0 rezonanční kmitočet

λ vlnová délka

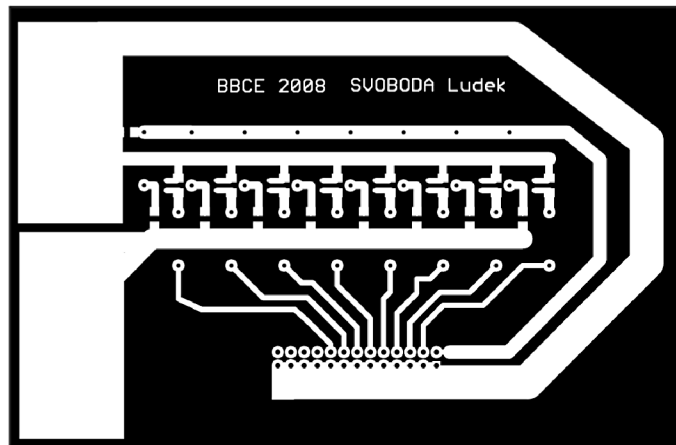
MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems

SEZNAM PŘÍLOH

A Šablony DPS	50
A.1 Deska ladící části	50
A.2 Deska Přizpůsobovací části	51
A.3 Deska řídicí části	52
B Seznam součástek	53
B.1 Řídicí část	53
B.2 Přizpůsobovací část	54
C Osazovací plány	55
C.1 Osazení řídicí části	55
C.2 Osazení přizpůsobovací části	55
C.3 Osazení napájecí jednotky	56

A ŠABLONY DPS

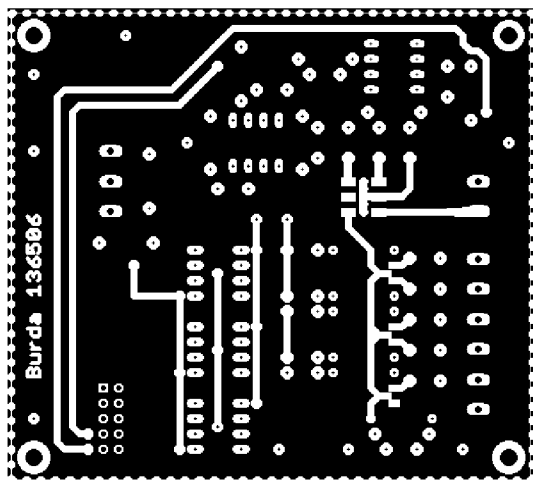
A.1 Deska ladící části



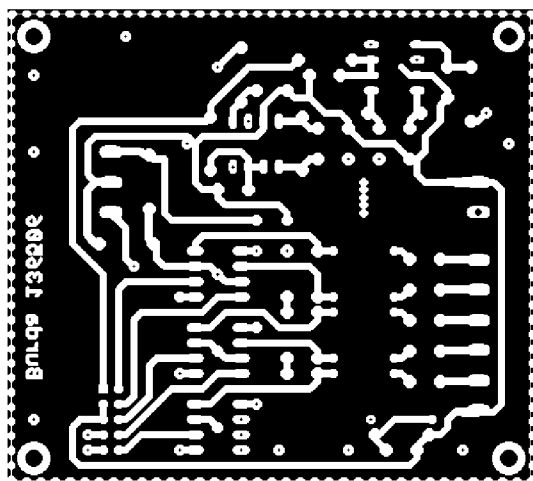
Obr. A.1: Šablona desky ladící části [7]

Deska ladící části byla přejata z předcházející projektu [7].

A.2 Deska Přizpůsobovací části



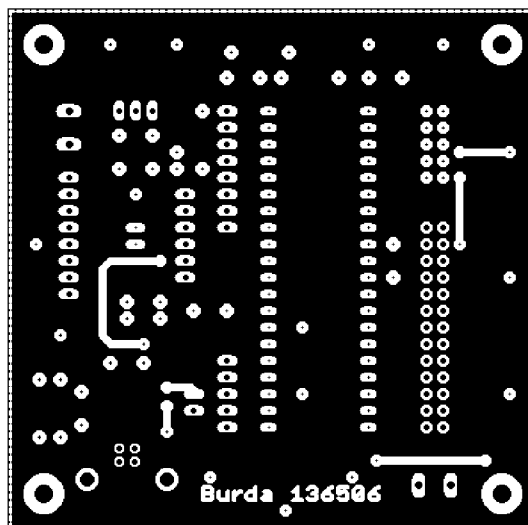
Obr. A.2: Šablona desky přizpůsobovací části – horní strana



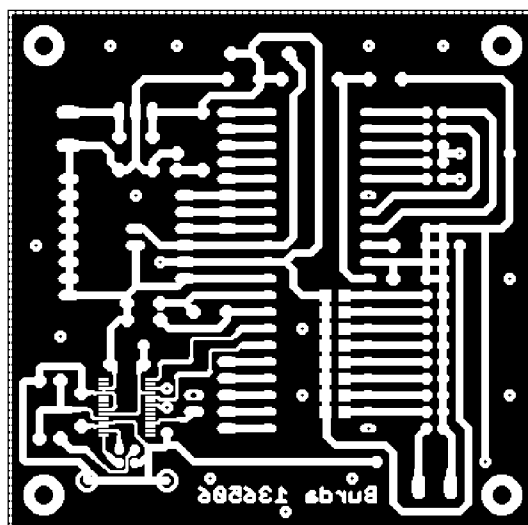
Obr. A.3: Šablona desky přizpůsobovací části – dolní strana

Deska byla navržena jako oboustranná za použití prokovení.

A.3 Deska řídicí části



Obr. A.4: Šablona desky řídicí části – horní strana



Obr. A.5: Šablona desky řídicí části – dolní strana

Deska byla navržena jako oboustranná za použití prokovení.

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Řídící část

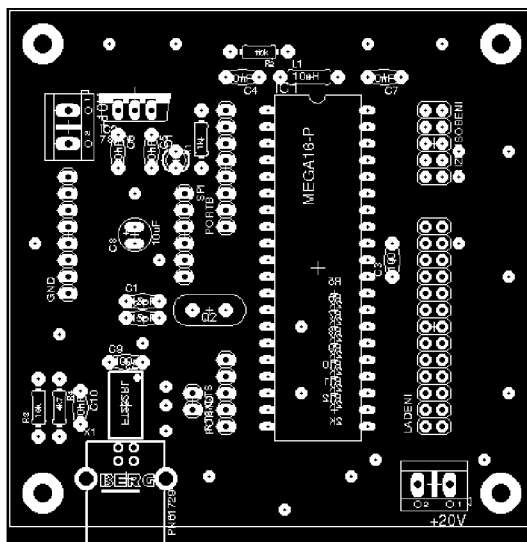
Počet	Hodnota	Typ	Označení	Název
1		FT232RL	FT232RL	USB převodník
1		ARK500/2	10V	Svorkovnice
1		PN61729-S	USB	USB konektor
4		1x8	SPI,PORTB,PORTD,GND	Oboustranný kolík
1		DIL40	IC1 MEGA16-P	Presizní patice
1		DIL40	IC1 ATmega16-16PU	Mikroprocesor
1		2x13	LADENI	Konektor ladění
1		2x5	PRIZPUSOBENI	Konektor přizpůsobení
1	10 μ H/0,37A	0207/7	L1	Tlumivka
1	5V/5A	TO220	IC2 786TV	Lineární regulátor napětí
1	16MHz	HC-49U	Q2	Krystal
1	330n/50V	RM5	C6	Keramický kondenzátor
5	100n/50V	RM5	C3,C4,C5,C9,C10	Keramický kondenzátor
2	15p/500V	RM5	C1,C2	Keramický kondenzátor
8	10K	R1206	R5÷R12	Rezistor
2	10K	0204/7	R2,R3	Rezistor
1	4K7	0204/7	R3	Rezistor
1	1K	0204/7	R1	Rezistor
1	10 μ /25V	RM2,5-5	C8	Elektrolytický kondenzátor
1	2,3V/15mA	LED5mm	D1	LED dioda

B.2 Přizpůsobovací část

Počet	Hodnota	Typ	Označení	Název
Napájecí jednotka				
1		ARK500/2	230V	Svorkovnice
1		ARK210/3	CON1	Svorkovnice
1		MSX	F1	Pojistkový držák
1	$T0, 5A/250V$	MSX	F1	Radiální pojistka
1	$2 \times 15V$	TRHEI382	TR1	Transformátor
1	$-12V/1A$	TO220	IC1	Regulátor napětí
1	$12V/0, 7A$	TO220	IC2	Regulátor napětí
1	$600V/3A$	DM BR-3	MUSTEK	Diodový můstek
2	$470\mu F/50V$	RM2,5-5	C1,C2	Elektrolytický kondenzátor
2	$10\mu F/50V$	RM2,5-5	C7,C8	Elektrolytický kondenzátor
4	$100nF/50V$	RM5	C3,C4,C5,C6	Keramický kondenzátor
Ladící deska				
3		ARK210/3	CON1,CON3	Svorkovnice
1		ARK500/2	CON,2	Svorkovnice
1		2x5	JP1	Konektor řízení
6		DIL08	TL072,AD8307	Precizní patice
4	2x JFET OZ	DIL08	TL072	Operační zesilovač
6	$1mH/0, 06A$	0207/10	L1÷L6	Tlumivka
2	$1n/50V$	RM5	C4,C8	Keramický kondenzátor
4	$56p/500V$	RM5	C1,C2,C5,C6	Keramický kondenzátor
14	$100n/50V$	RM5	C3,C7,C9÷C20	Keramický kondenzátor
2	$51R$	0207/7	R1,R4	Rezistor
1	$30K$	0207/7	R8	Rezistor
2	$10K$	0207/7	R7,R9	Rezistor
4	$220R$	0207/7	R2,R3,R5,R6	Rezistor
2		DIL08	AD8307	Převodník
3		HSMP-3894	PIN	PIN dioda
1		ADC-26-52+	ADC-26-52+	Směrová odbočnice

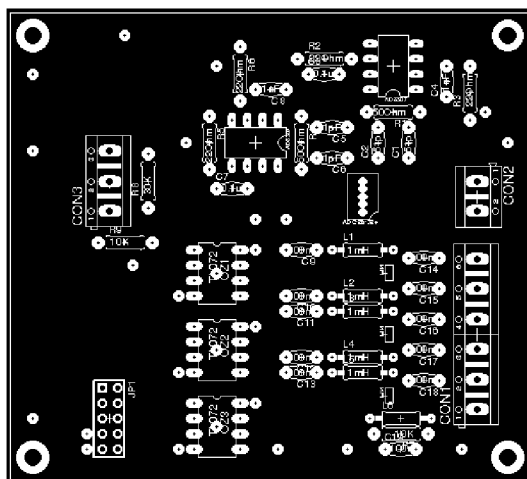
C OSAZOVACÍ PLÁNY

C.1 Osazení řídicí části



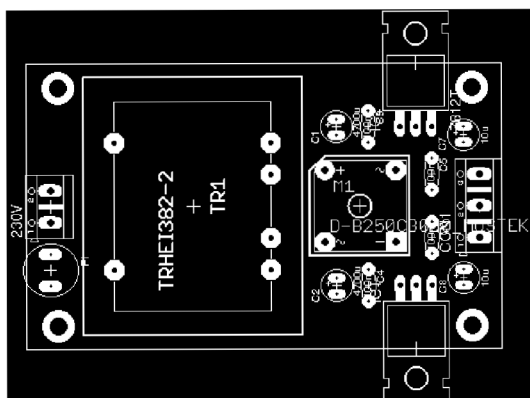
Obr. C.1: Osazovací plán ladící části

C.2 Osazení přizpůsobovací části

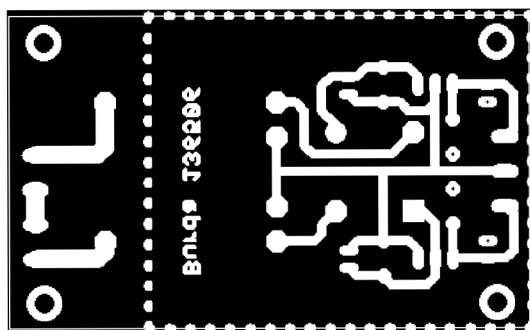


Obr. C.2: Osazovací plán přizpůsobovací části

C.3 Osazení napájecí jednotky



Obr. C.3: Osazovací plán ladící části



Obr. C.4: Šablona desky napájecí jednotky