

# 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

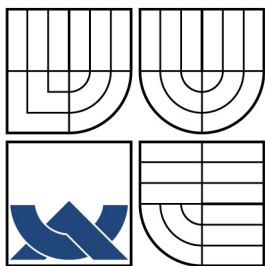
ELEKTRONICKY LADĚNÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA PRO  
KMITOČTY DO 30 MHZ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

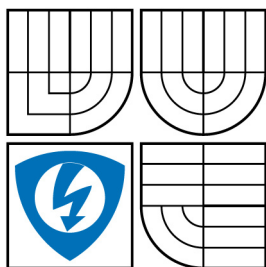
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUDEK SVOBODA

BRNO 2008



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

Luděk Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

BRNO, 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Luděk Svoboda  
Bytem: Určice 444, Určice, 798 04  
Narozen/a (datum a místo): 24. února 1986 v Prostějově

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Elektronicky laděná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

# 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 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 6. června 2008

.....  
podpis autora

# Poděkování

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

V Brně dne 6. června 2008

.....  
podpis autora

## **Anotace**

Cílem této bakalářské práce byla realizace ladícího systému s kompletním softwarovým vybavením, dále ověření funkčnosti systému a parametrů antény. Celý systém byl rozdělen na části ladící, řídící. V první části je realizována změna kapacity obvodu řadou kondenzátorů. Pro spínání řady byl použit tranzistor s malou přechodovou kapacitou, ale také s malou hodnotou maximálního kolektorového proudu. Tento parametr omezuje použití systému. Druhá část je realizována pomocí mikroprocesoru AT89C2051. Dle požadavku obslužného programu v PC mikroprocesor sepne příslušné prvky kapacitní řady, tj. nastaví požadovaný kmitočet. Princip ladění byl ověřen měřením. K měření byl použit obvodový analyzátor.

**Klíčová slova:** Paralelní rezonanční obvod, skin efekt, impedance, SWR, smyčkové antény, mikroprocesor.

## **Annotation**

The aim of this bachelor's project was realization of a tuning system with complete software and testing of the system's functionality and parameters of antenna. The system is divided into two parts, tuner and controller. The tuner implements change of circuit capacity by switching capacitor series. For switching is used transistor with small transitional capacity but small maximal collector current, too. This parameter restricts the use of system. The second part, controller, uses microcontroller AT89C2051. The microcontroller switches capacitors (and thus sets frequency) according to requests sent from PC with control software. The functionality was checked by tests with network analyzer.

**Key element:** Parallel resonance circuit, skin efect, impedance, loop antenna, microprocessor.

## **Bibliografická citace mé práce:**

SVOBODA, L. *Elektronicky laděná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 36 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

# Obsah

1. Úvod.....	1
1.1. Smyčkové antény.....	1
1.2. Paralelní rezonanční obvod.....	2
1.3. Skin efekt.....	7
2. Návrh elektronického ladění.....	8
2.1. Základní parametry pro návrh ladění .....	8
2.2. Princip ladění.....	8
2.3. Početní řešení ladění.....	10
3. Realizace ladícího systému.....	12
3.1. Ladící část systému.....	12
3.1.1. Výběr vhodných součástek.....	12
3.1.2. Realizace ladící části.....	14
3.2. Řídící část systému.....	14
3.2.1. Řídící mikroprocesor.....	15
3.2.2. Sériová komunikace RS-232.....	17
3.2.3. Asynchronní přenos.....	20
3.2.4. Realizace řídící části.....	21
3.2.5. Nastavení mikroprocesoru.....	23
3.2.6. Řídící program mikroprocesoru.....	27
3.3. Obslužný program PC.....	29
4. Ověření funkčnosti a parametrů antény.....	32
5. Závěr.....	35
Seznam literatury.....	36





# 1. Úvod

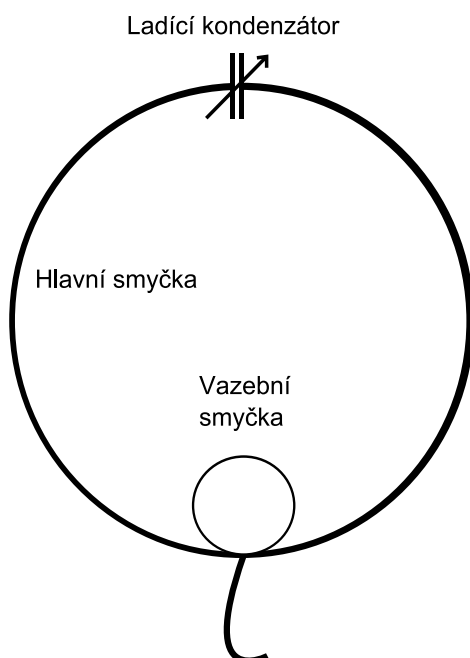
Cílem této práce je navržení funkčního elektronicky laděného systému. Prvním krokem bylo seznámení se s vlastnostmi smyčkových antén. Dále určení potřebných vlastností ladění pro širokopásmové ladění antény bez pohyblivých částí, s ohledem na použití i pro vysílání. Na základě teorie bylo navrženo celkové schéma antény s elektronickým laděním.

Druhým krokem této práce je realizace navrženého ladícího systému s potřebným základním softwarovým vybavením řídícího mikroprocesoru. Dále ověření základní funkčnosti a parametrů antény.

Závěrečnou částí celé práce je vytvoření kompletního softwarového vybavení pro elektronické ladění smyčkové antény tak, aby ji bylo možné řídit přímo z PC pomocí sériového portu či USB portu.

## 1.1. Smyčkové antény

Smyčkové antény se také nazývají magnetické antény. Vyzařují, resp. přijímají převážně jen magnetickou složku elektromagnetického pole. Magnetickou anténu tvoří malá kruhová smyčka, jejíž délka je pouhým zlomkem vlnové délky, odpovídající vysílanému nebo přijímanému kmítočtu. Do rezonance je pak tato malá smyčka, doladěná paralelním kondenzátorem. Jde tedy o paralelní rezonanční obvod napájený malou vazební smyčkou, připojenou k vysílači.



Obr. 1.1.1. Uspořádání magnetické antény

Kruhové smyčkové antény jsou poněkud účinnější než smyčky čtvercové,

kosočtvercové nebo trojúhelníkové atd., protože mají vyšší vyzařovací odpor. Vyzařovací odpor je při daném obvodu úměrný ploše ohraničené smyčkou. Z geometrie víme, že právě kruh ohraničuje největší plochu. Další výhodou kruhových smyček, zhotovených obvykle z jediného vodiče (trubky), jsou nižší ztráty, než u smyček mnohostranných antén. Tam mohou vznikat ztráty v místech spojů jednotlivých stran. Vyzařovací odpor osmiúhelníkové magnetické antény je principiálně srovnatelný s kruhovou smyčkou, avšak osm spojů snižuje účinnost. Magnetická anténa se musí vždy vyladit do rezonance. Z důvodu vysoké kvality obvodu (vysoké Q), se na svorkách ladícího kondenzátoru objeví vysoké napětí a smyčkou poteče velký proud. Při výkonu vysílače cca 150 W dosahuje vř. napětí na kondenzátoru až 10 kV. Proto je třeba použít kondenzátoru s dostatečně velkými mezerami mezi deskami.

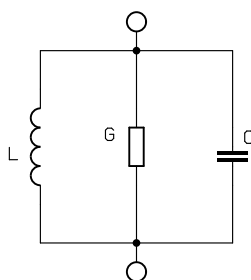
Mají-li kondenzátory magnetických antén vysokou ladící kapacitu, mohou bez přepínání pokrýt několik pásem. Žádoucí poměr indukčnosti smyčky L a kapacity kondenzátoru C (kvalita Q) a nezbytná počáteční kapacita kondenzátoru, však nedovoluje obsáhnout celý rozsah kmitočtových pásem 1,8-30 MHz.

Výrobou magnetických antén se zabývají tři firmy na světě – britské firmy AA&A, AEA a americká MFJ. Přes drobné konstrukční rozdíly pracují na stejném principu a to jako paralelní laditelný rezonanční LC obvod, vytvořený paralelním zapojením kruhové smyčky. Magnetické antény mají tyto hlavní výhody:

- malé rozměry ve srovnání s běžným dipólem  $\lambda/2$ ,
- přesné selektivní naladění na každém kmitočtu, potlačující intermodulační zkreslení (spletery).[1]

## 1.2. Paralelní rezonanční obvod

Paralelní rezonanční obvod se skládá z paralelního zapojení cívky L, vodivosti G a kondenzátoru C. Vodivost G reprezentuje v obvodu ztráty obou reálných akumulacích prvků.



Obr. 1.2.1. Paralelní rezonanční obvod

Pro admitanci obvodu platí

$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = G + j\left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right) = G + jB = Y \cdot e^{j\varphi} \quad , \quad (1.2.1)$$

kde B je výsledná susceptance obvodu, G vodivost, C kapacita kondenzátoru, L indukčnost cívky,  $\omega$  je úhlový kmitočet a  $\varphi$  je fázový posuv. Při harmonickém buzení obvodu ze zdroje

proudu s amplitudou  $I$ , závisí napětí na rezonančním obvodu na modulu admitance  $Y$  a tedy na kmitočtu signálu zdroje. Grafické znázornění závislosti napětí  $U$  na kmitočtu  $f$  (nebo  $\omega$ ) se nazývá rezonanční křivka. Lze ji popsat rovnicí

$$U = \frac{I}{Y} = \frac{I}{\sqrt{G^2 + \left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right)^2}} = Z \cdot I, \quad (1.2.2)$$

kde  $Z$  je celková impedance obvodu. Z podmínky  $B = 0$  lze stanovit vztah pro výpočet rezonančního kmitočtu

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad \text{resp.} \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}, \quad (1.2.3)$$

kde  $f_0$  je kmitočet při rezonanci. Podobně jako u sériového rezonančního obvodu, lze i pro paralelní rezonanční obvod odvodit vztahy pro admitanci obvodu ve tvaru

$$Y(\omega) = G \cdot (1 + j\alpha) \quad \text{a} \quad Y = G \cdot \sqrt{1 + \alpha^2}, \quad (1.2.4)$$

kde  $\alpha$  je stupeň rozladění. Při rezonanci, kdy  $\alpha = 0$ , nabývá modul admitance obvodu své minimální hodnoty  $Y = G$ , zatímco napětí na obvodu nabývá naopak své maximální hodnoty

$$U_r = \frac{I}{G} = I \cdot R, \quad (1.2.5)$$

kde  $R = 1/G$  se nazývá rezonanční odpor.

*Šířka propustného pásma  $B$*  paralelního rezonančního obvodu je definována jako rozmezí dvou kmitočtů v okolí rezonance, při kterých poklesne napětí na rezonančním obvodu na hodnotu  $0,707 U_r$  (pokles o 3 dB), jak je naznačeno na (obr. 1.2.3.). Poněvadž napětí na rezonančním obvodu je přímo úměrné impedanci obvodu, bývá rezonanční křivka kreslena také jako závislost modulu impedance obvodu na kmitočtu. Mezi šířkou propustného pásma a činitelem jakosti obvodu platí vztah

$$Q = \frac{f_0}{B}, \quad (1.2.6)$$

kde  $Q$  je činitel jakosti,  $f_0$  rezonanční frekvence,  $B$  šířka pásma.

Kvalitu rezonančního obvodu můžeme vyjádřit pomocí *činitele jakosti obvodu*, který se označuje symbolem  $Q$ . Je definován vztahem

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot A}{P}, \quad (1.2.7)$$

kde  $A$  je energie, která přechází z elektrického pole do magnetického pole (kmitá) a  $P$  je činný

výkon,  $\omega_0$  je úhlový kmitočet při rezonanci. Poněvadž pro energii A a činný výkon P platí

$$A = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad \text{a} \quad P = \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{R}, \quad (1.2.8)$$

dosazením do vzorce (1.2.7) lze psát

$$Q = \omega_0 \cdot C \cdot R = \frac{R}{\omega_0 \cdot L} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{R}{Z_0} = \frac{\omega_0 \cdot C}{G} = \frac{1}{\omega_0 \cdot L \cdot G}. \quad (1.2.9)$$

Činitel jakosti paralelního rezonančního obvodu se tak rovná podílu rezonančního odporu a induktivní nebo kapacitní reaktance obvodu za rezonance. Pro charakteristickou impedanci obvodu  $Z_0$  platí vztah

$$Z_0 = \omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1.2.10)$$

Jestliže budíme paralelní rezonanční obvod ze zdroje harmonického signálu s amplitudou I, je za rezonance na obvodu napětí  $U_r$  dané vztahem (1.2.5). Poněvadž 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

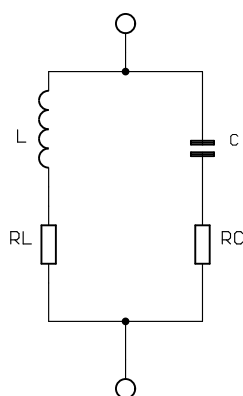
$$I_{Lr} = \frac{U_r}{j \omega_0 \cdot L} = -j \frac{1}{\omega_0 \cdot L} \cdot \frac{I}{G} = -jQ \cdot I \quad (1.2.11)$$

a

$$I_{Cr} = \frac{U_r}{\frac{1}{j \omega_0 \cdot C}} = j \omega_0 \cdot C \cdot \frac{I}{G} = jQ \cdot I. \quad (1.2.12)$$

Proud tekoucí induktorem se zpožďuje za proudem zdroje I a tím i napětím  $U_r$  o  $90^\circ$ , zatímco proud tekoucí kapacitorem předbíhá proud I a tedy i napětí  $U_r$  o  $90^\circ$ . Za rezonance jsou tedy proudy tekoucí induktorem a kapacitorem stejně veliké, ale opačného směru (jejich součet je roven nule). Ve srovnání s proudem zdroje jsou oba proudy Q krát větší. Jestliže budíme paralelní rezonanční obvod např. z generátoru s výstupním proudem  $I = 100 \text{ mA}$  a činitel jakosti obvodu je např.  $Q = 100$ , je proud tekoucí cívkou  $I_{Lr} = 10 \text{ A}$  !!! Proto je třeba pro konstrukci cívky použít vodič dostatečného průřezu. Cívky rezonančních obvodů ve vysílačích velkých výkonů bývají proto konstruovány z měděných trubek, které mohou být i postříbřené.

Model paralelního rezonančního obvodu, nakreslený na (obr.1.2.1.), vytvořený jako duální obvod k sériovému rezonančnímu obvodu, nevystihuje přesně chování skutečného rezonančního obvodu, především při nulovém kmitočtu a v jeho blízkém okolí. Rezananční křivka skutečného obvodu, nakreslená na (obr. 1.2.3.), vykazuje při nulovém kmitočtu určité malé napětí, které v obvodu vzniká v důsledku nenulového odporu vinutí cívky.

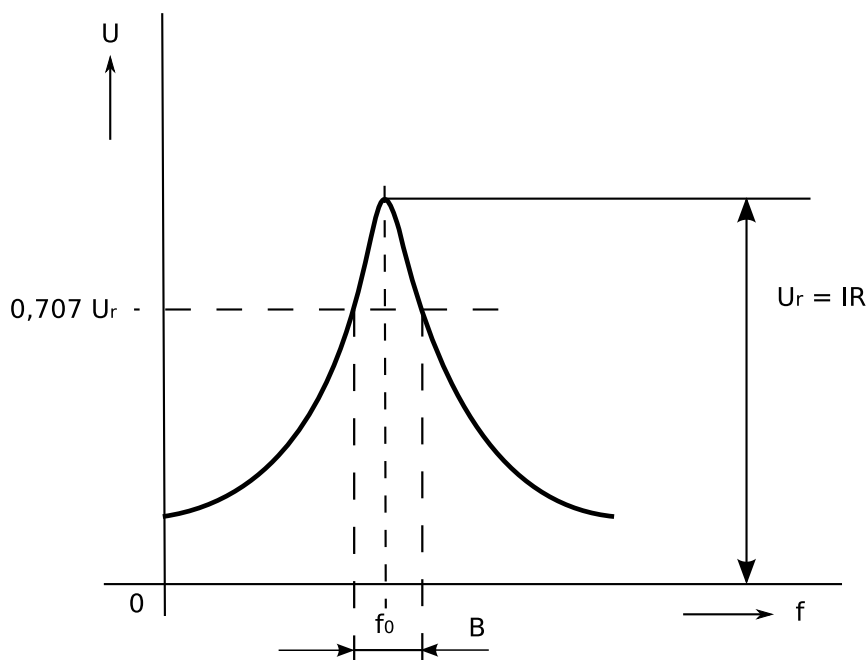


Obr.1.2.2. Paralelní rezonanční obvod se dvěma větvemi

Tuto skutečnost lépe vystihuje model nakreslený na (obr. 1.2.2.). Cívka je modelována sériovou kombinací induktoru  $L$  a ztrátového rezistoru  $R_L$ , podobně kondenzátor je modelován sériovým spojením kapacitoru  $C$  a ztrátového rezistoru  $R_C$ . Impedance obou větví můžeme vyjádřit ve tvaru

$$Z_L = R_L + jX_L \quad \text{a} \quad Z_C = R_C - jX_C, \quad (1.2.13)$$

kde  $X_L$  je reaktance cívky a  $X_C$  reaktance kondenzátoru.



Obr.1.2.3. Rezonanční křivka paralelního rezonančního obvodu

Pro výslednou impedanci obvodu lze psát

$$Z = \frac{Z_L \cdot Z_C}{Z_L + Z_C} = \frac{(R_L + jX_L) \cdot (R_C - jX_C)}{(R_L + jX_L) + (R_C - jX_C)}. \quad (1.2.14)$$

Oddělíme-li od sebe reálnou a imaginární složku, dostaneme

$$Z = R + jX = \frac{R_L \cdot Z_C^2 + R_C \cdot Z_L^2}{Z_s^2} + j \frac{X_L \cdot Z_C^2 - X_C \cdot Z_L^2}{Z_s^2}, \quad (1.2.15)$$

kde  $Z_s$  je modul impedance, která se rovná sériovému spojení impedancí  $Z_L$  a  $Z_C$ , takže platí

$Z_s^2 = (R_L + R_C)^2 + (X_L - X_C)^2$  a dále  $Z_L^2 = R_L^2 + X_L^2$  a  $Z_C^2 = R_C^2 + X_C^2$ . V uvažovaném obvodu nastane rezonance, jestliže imaginární část výsledné impedance (1.2.15) bude rovna nule. Rezonanční podmínka je proto dána vztahem

$$X = \frac{X_L \cdot Z_C^2 - X_C \cdot Z_L^2}{Z_s^2} = 0. \quad (1.2.16)$$

Z této podmínky vyplývá, že rezonanční kmitočet závisí nejen na indukčnosti  $L$  a kapacitě  $C$ , ale i na ztrátových rezistorech  $R_L$  a  $R_C$ . Pouze v případě, kdy platí

$$R_L \ll X_L \text{ a } R_C \ll X_C, \quad (1.2.17)$$

tj. rezistory v jednotlivých větvích můžeme zanedbat vůči jejich reaktancím, lze podmínku (1.2.16)

zjednodušit do tvaru

$$X \approx \frac{X_L \cdot X_C^2 - X_C \cdot X_L^2}{Z_s^2} = \frac{X_L \cdot X_C \cdot (X_C - X_L)}{Z_s^2} = 0. \quad (1.2.18)$$

Rezonance potom nastává v případě, když  $X_C - X_L = 0$ , což je stejná podmínka, jako podmínka platná pro sériový rezonanční obvod. Z ní je možné stanovit rezonanční kmitočet ve tvaru (1.2.3). Jestliže nelze splnit podmínky (1.2.17), musíme rezonanční kmitočet vypočítat z podmínky (1.2.16), tj.

$$X_L \cdot Z_C^2 - X_C \cdot Z_L^2 = 0. \quad (1.2.19)$$

Když to této podmínky dosadíme a upravíme, dostáváme pro rezonanční kmitočet vztah

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{Z_0^2 - R_L^2}{Z_0^2 - R_C^2}} \quad \text{resp.} \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{Z_0^2 - R_L^2}{Z_0^2 - R_C^2}}, \quad (1.2.20)$$

kde  $Z_0$  je charakteristická impedance obvodu daná vztahem (1.2.10)

Odpor obvodu za rezonance neboli rezonanční odpor určíme z (1.2.15), při uvažování rezonanční podmínky (1.2.16). Jestliže navíc platí i podmínky (1.2.17) dostáváme

$$R = \frac{R_L \cdot X_C^2 + R_C \cdot X_L^2}{(R_L + R_C)^2} = \frac{X_L^2}{R_L + R_C} = \frac{X_C^2}{R_L + R_C}. \quad (1.2.21)$$

Rezonanční odpor paralelního rezonančního obvodu se tedy rovná druhé mocnině reaktance libovolné větve obvodu za rezonance, dělené celkovým odporem obou větví v sérii  $R_s = R_L + R_C$ . Po dosazení do (1.2.21) za reaktance jednotlivých větví a úpravě, dostáváme další vztahy pro výpočet rezonančního odporu

$$R = \frac{\omega_0^2 \cdot L^2}{R_s} = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot C^2 \cdot R_s} = \frac{Z_0^2}{R_s} = \frac{L}{C \cdot R_s} = Q^2 \cdot R_s = Q \cdot Z_0. \quad (1.2.22)$$

Lze odvodit, že vztahy (1.2.21) a (1.2.22) můžeme použít s dostatečnou přesností (lepší než 1%) pro rezonanční obvody, u kterých je  $Q \geq 5$ .

Za rezonance je impedance obvodu reálná, a tedy argument impedance je nulový. Na podrezonančních kmitočtech má obvod induktivní charakter neboť impedance induktivní větve je menší než impedance kapacitní větve a při jejich paralelním spojení se výrazněji podílí na výsledné impedanci obvodu. Argument impedance proto nabývá kladných hodnot a pro kmitočty jdoucí k nule se jeho hodnota blíží  $+90^\circ$ . Na nadrezonančních kmitočtech má obvod kapacitní charakter neboť na výsledné impedanci obvodu se nyní výrazněji podílí impedance kapacitní větve. Argument impedance je proto záporný a pro kmitočet  $f \rightarrow \infty$  se jeho hodnota blíží  $-90^\circ$ . [2]

### 1.3. Skin efekt

Skin efekt je jev, při kterém vznikají proudy na povrchu vodiče, který je přivracen ke zdroji elektromagnetické energie. V důsledku toho se při vedení vysokofrekvenční energie vodičem soustřeďuje proudová hustota do tenké vrstvy při povrchu vodiče. Tento efekt má velký vliv na impedanci vodičů. Soustřeďuje-li se proud do tenké vrstvy při povrchu, klesá průřez vodiče a jeho odpor roste.

Hloubka vniku je dána následujícím vztahem

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad . \quad (1.3.1)$$

## 2. Návrh elektronického ladění

### 2.1. Základní parametry pro návrh ladění

K ověření funkčnosti navrhovaného ladícího systému byla využívána smyčková anténa o průměru 0,47 m. Smyčka byla realizována měděným vodičem o průměru 4 mm. Dále k výpočtu byly využity materiálové konstanty, a to relativní permeabilita mědi  $\mu_r = 0,99999$  a konduktivita  $\sigma = 56 \text{ MS.m}^{-1}$ . Jako minimální hodnotu výkonu uvažujeme  $P_{\min} = 20 \text{ mW}$ . Všechny parametry jsou pro přehlednost uvedeny v (tab.2.1.1.).

Tab.2.1.1. Tabulka základních parametrů pro návrh ladění

Parametr	Hodnota
Průměr cívky $d_c$	0,47 m
Průměr vodiče cívky $d_v$	4 mm
Počet závitů cívky $N$	1
Materiál vodiče	měď
Permeabilita mědi $\mu_r$	0,99999
Konduktivita mědi $\sigma$	$56 \text{ MS.m}^{-1}$
Permeabilita vakua $\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
Minimální výkon $P_{\min}$	20 mW
Délka vodiče cívky $l$	1,48 m

Délka vodiče  $l$  byla vypočítána dle vztahu

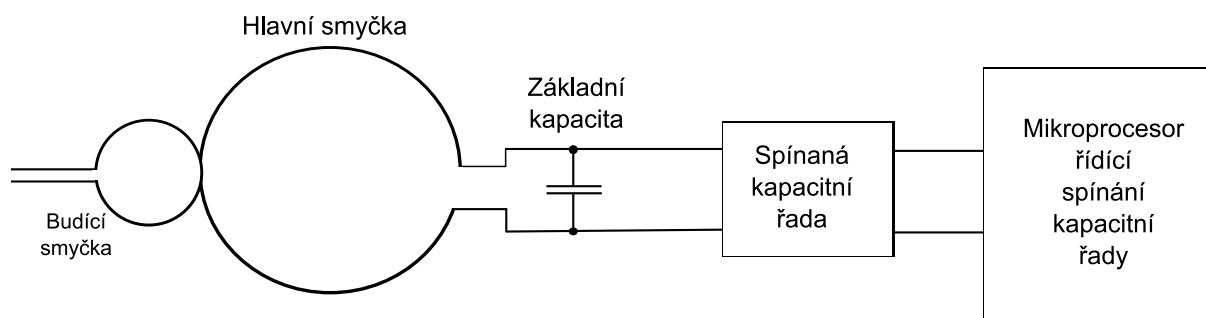
$$l = \pi \cdot d_c \quad , \quad (2.1.1)$$

kde  $d_c$  je průměr cívky (smyčky).

### 2.2. Princip ladění

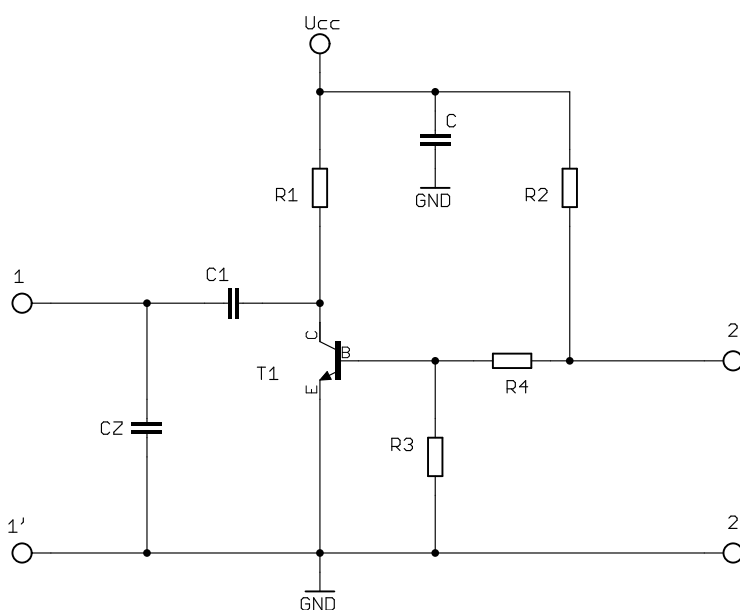
Při návrhu systému ladění bez pohyblivých částí bylo vycházeno z teorie smyčkových antén a paralelního rezonančního obvodu popsané v kapitole (1.1) a (1.2). Parametry využívané antény (cívky) pro ověření návrhu jsou uvedeny v předchozí kapitole. Základní princip ladění spočívá ve změně kapacity paralelního rezonančního obvodu. Tato změna v radio-amatérské praxi bývá řešena laditelným vzduchovým kondenzátorem, jehož použití vylučuje zadání práce. Jako řešení změny hodnoty kapacity se nabízí řada kondenzátorů s různou hodnotou pro různé laděné (rezonanční) kmitočty. Pro řízení změny hodnoty je předpoklad využití mikroprocesoru dle zadání. Samotný mikroprocesor je nutné doplnit tranzistorovým zapojením pro připojení jednotlivých prvků výsledné řady kapacit. Blokové schéma je následujícím obrázkem.





Obr. 2.2.1. Blokové schéma principu ladění

Princip jednoho bloku hodnoty kapacity spočívá ve spínání tranzistoru mikroprocesorem. Schéma jednoho bloku je na (obr. 2.2.2.). Mezi kolektorem tranzistoru  $T_1$  a základním kondenzátorem  $C_Z$  je připojen kondenzátor  $C_1$  s kapacitou potřebnou k změně kapacity rezonančního obvodu, a tím nalezením hledaného kmitočtu. Tento kondenzátor je připojen k obvodu přivedením napětí na bázi tranzistoru  $T_1$ . Toto napětí je dáno poměrem hodnot odporů  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ . Sepnutí tranzistoru je řízeno na základě obslužného programu mikroprocesoru, který je připojen a svorky 2 a 2'. Mikroprocesor spíná k zemi při odeslání 0 na výstupní port. To má za následek rozepnutí tranzistoru.



Obr. 2.2.2. Základní zapojení jednoho bloku banky

Hodnotou odporu rezistoru  $R_1$  připojeného ke kolektoru je nastaven pracovní bod tranzistoru. Jeho hodnotu je nutno zvolit vhodně s ohledem na počet bloků hodnoty řady kapacit.

K zjištění hodnoty kapacity  $C_1$  je důležitá šířka propustného pásma  $B$  paralelního rezonančního obvodu. Při přeladování nesmí krok změny rezonančního kmitočtu být moc velký. Pro dva sousední rezonanční kmitočty musí platit, že se jejich šířky pásem navzájem částečně překrývají, aby bylo přeladění plynulé.

Všechny kondenzátory musí být dimenzovány na vysoké hodnoty napětí, které je

určeno dle vztahu (1.2.8). Dále je důležitý ohled na proud protékající obvodem, který je  $Q$  krát větší než proud zdroje, jak plyne ze vztahu (1.2.11) a (1.2.12). Dalším faktorem ovlivňujícím správnou funkci obvodu je jeho teplotní stabilita, proto je důležité zvolit i vhodný materiál kondenzátorů.

### 2.3. Početní řešení ladění

Jak je patrné z principu popsaného v předchozí kapitole, je přeladování kmitočtu závislé na hodnotě kapacity paralelního rezonančního obvodu. Prvním krokem pro výpočet hodnot kapacity je určení hodnot laděných kmitočtů za předpokladu plynulého přeladování. Plynulosti je dosaženo překrýváním šířek pásem jednotlivých rezonančních (laděných) kmitočtů. Dle zadání je horní ideální hranice kmitočtu 30 MHz. Při uvažování  $Q = 100$  je úpravou vztahu (1.2.6) vypočtena šířka pásma. Pro další nižší hodnoty kmitočtu je nutno počítat s 10 % překrýváním šířky pásma.

Jelikož se uplatňuje skin efekt, je nutné vypočítat hloubku vniku dle vztahu (1.3.1). Využitím hloubky vniku se vypočte skutečný odpor vodiče

$$R_L = \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \sigma \cdot \delta} \quad (2.3.1)$$

Při výpočtu hodnot kapacity a indukčnosti platí podmínka (1.2.17), kdy jsou zanedbány hodnoty ztrátových odporů  $R_C$  a  $R_L$ .

$$X_C = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} \quad X_L = \omega_0 \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot L \quad (2.3.2)$$

Do podmínky  $X_C - X_L = 0$  dosazením vyjádření reaktancí (2.3.2) a následnou úpravou je vyjádřen vztah pro výpočet hodnot kapacity rezonančního kmitočtu

$$C = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L} \quad (2.3.3)$$

kde  $C$  je hledaná kapacita,  $f_0$  rezonanční kmitočet,  $L$  indukčnost cívky. Ta je daná vztahem

$$L = \mu \cdot r_c \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot r_c}{r_v} \right) - \frac{7}{4} \right) \quad (2.3.4)$$

pro jednozávitovou cívku, kde  $r_c$  je poloměr cívky a  $r_v$  poloměr vodiče cívky.

Dále je nutné vypočítat rezonanční odpor, a to dle vztahu (1.2.21). Hodnota reaktance  $X_c$  je určena dosazením a vypočtením vztahů (2.3.2, 2.3.3, 2.3.4). Hodnota  $R_c$  je zanedbána a hodnota  $R_L$  je dána vztahem (2.3.1).

Se znalostí rezonančního odporu a minimálního výkonu  $P_{\min} = 20 \text{ mW}$  lze úpravou vztahu (1.2.8) vyjádřit hodnotu efektivního napětí obvodu. Na toto napětí, ale na hodnotu maximální, musí být dimenzovány všechny kondenzátory. Tranzistory musí být dimenzovány s ohledem na kladnou i zápornou půlvlnu.

Proud jednotlivými větvemi je dán vztahy (1.2.11, 1.2.12). Tento proud je velmi důležitý při výběru spínacího tranzistoru.

### 3. Realizace ladícího systému

Systém byl rozdělen na dvě části. Rozdělení se týká oddělení ladící části od řídicí části s mikroprocesorem, a to z důvodu případného vzájemného ovlivňování. S rozdělením se také nabízí i možnost pro případné jednoduché úpravy a opravy jednotlivých částí či výměny celých částí.

#### 3.1. Ladící část systému

Dle navrženého principu bylo sestaveno schéma ladící části systému. Viz (obr.3.1.1). Kde rezistory R2 – R9 jsou pro nastavení pracovního bodu tranzistoru s ohledem na počet bloku kapacitní řady. Tuto řadu tvoří kondenzátory označené jako C2 – C9. Rezistory R11 – R27 slouží k nastavení napětí na bázi tranzistoru. Ladící část systému by měla být umístěna, co nejbližší anténě, a to z vnější strany smyčky. Pro připojení k smyčce slouží piny ANT a GND ve schématu. Konektor DATA slouží k připojení řídicího mikroprocesoru a napájení.

##### 3.1.1. Výběr vhodných součástek

Pro realizaci všech vypočtených hodnot kapacity, tudíž přeladění kmitočtu, je nejvhodnější použít binární řadu hodnot kapacity, viz (tab.3.1.1.1).

Tab.3.1.1.1. Tabulka hodnot binární řady kapacit [3]

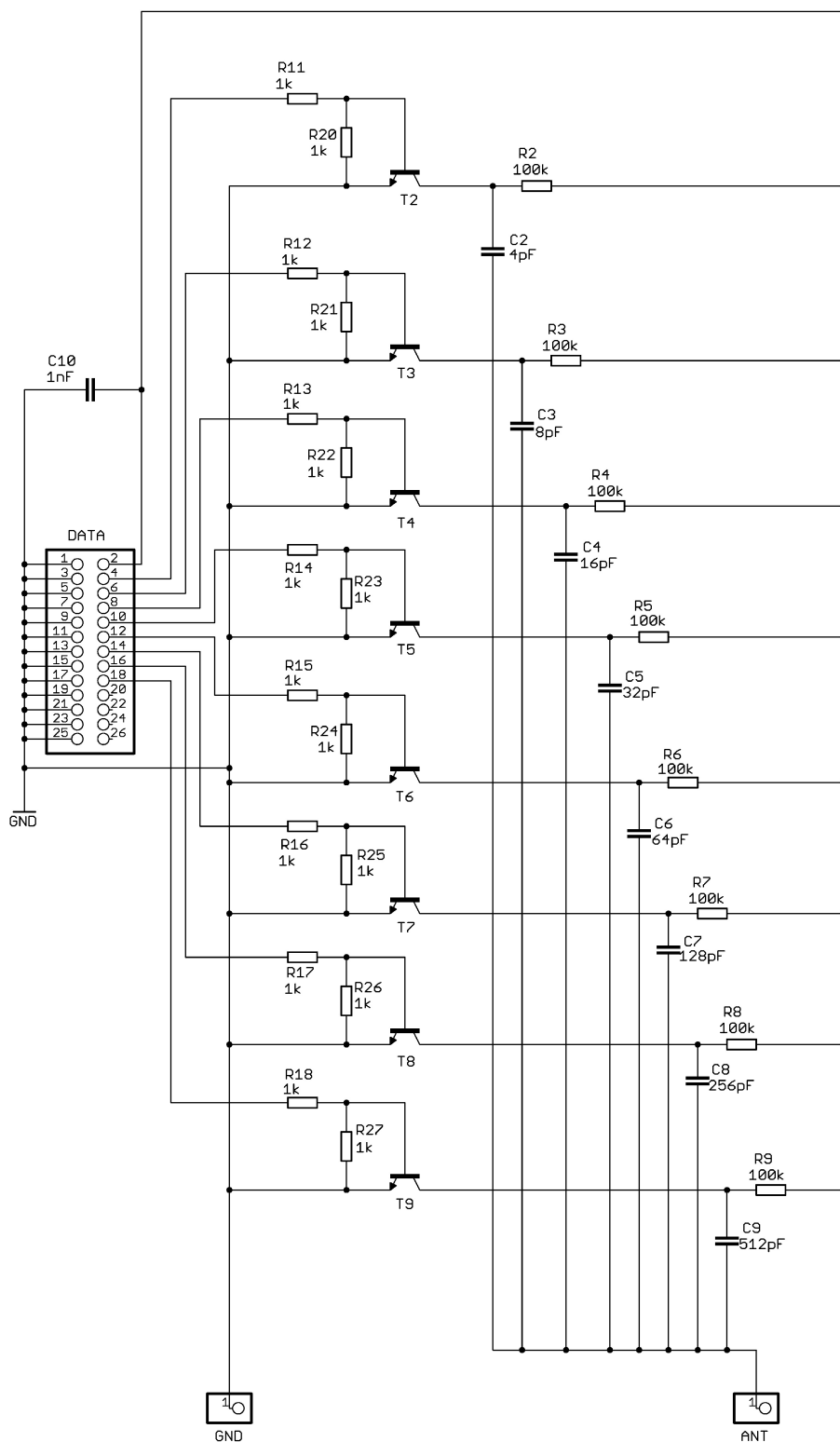
Teoretická C [pF]	4	8	16	32	64	128	256	512
Dostupná C [pF]	3,9	8,2	15	33	68	120	270	560

Byly zvoleny kondenzátory s dielektrikem NPO kvůli jejich vlastnostem, viz (tab.3.1.1.2).

Tab.3.1.1.2. Tabulka vlastností dielektrika NPO [4]

<b>Teplotní rozsah</b>	-55 až + 125°C
<b>Kapacitní změna</b>	± 30 ppm/°C
<b>Ztrátový činitel</b>	$15 \cdot 10^{-4}$
<b>Izolační odpor</b>	100 GΩ

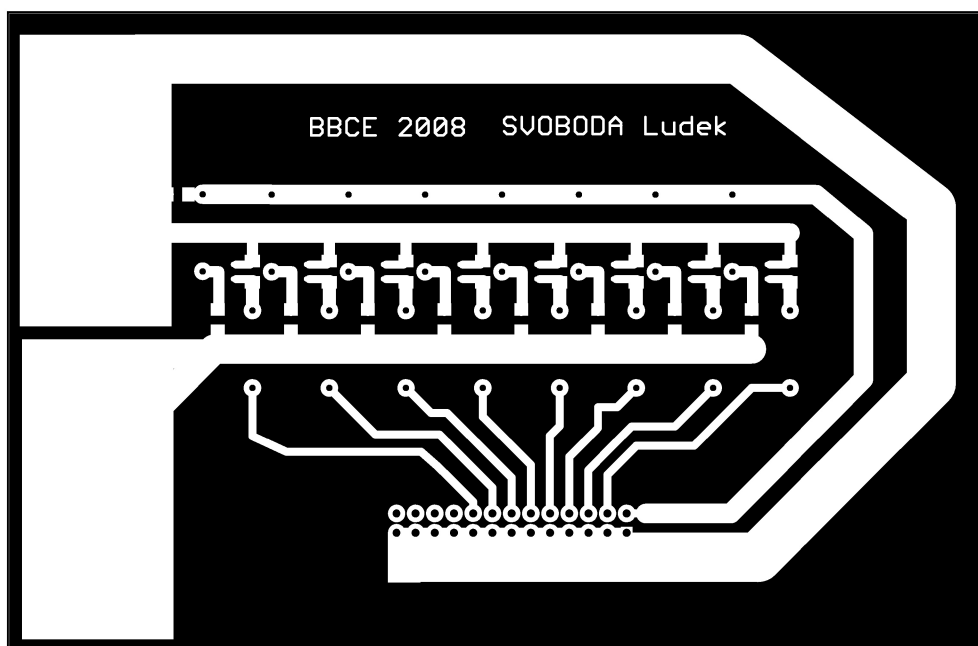
Pro spínání velkých proudů se nejvíce využívají tranzistory FET. Bohužel tyto tranzistory mají velkou kapacitu přechodu (asi kolem 200 pF), tudíž by výrazně ovlivnily spínanou kapacitu řady. Proto byl zvolen tranzistor MPSA42. Tento typ má přechodovou kapacitu jen několik pF, ale také nižší hodnotu maximálního proudu kolektorem. Jeho hodnota je 500 mA. Tento parametr výrazně omezuje možnosti ladícího systému.



Obr. 3.1.1. Schéma zapojení ladící části systému

### 3.1.2. Realizace ladící části

Dle schématu zapojení na (obr.3.1.1) byla vytvořena deska plošného spoje. Tranzistory a kondenzátory byly použity SMD pro minimalizaci desky a případným vznikům parazitních jevů. U tranzistorů bylo zvoleno pouzdro SOT-23 a kondenzátory velikosti 1206. Rezistory se volily v klasické velikosti, pouzdro se zatížitelností 0,5 W. Pro propojení s řídicí částí byly zvoleny dvě řady po 13 pinech, a to z důvodu jednoduché realizace propojovacího kabelu samořeznými konektory. Osm pinů slouží pro spínání hodnot kapacitní řady. Jeden pin pro připojení napájecího napětí. Zbývající piny jsou spojeny se zemí nebo ponechány pro případné využití. Na (obr. 3.1.2.1) je šablona výsledné desky. Deska byla navržena jako jednostranná. Zdrojové soubory s návrhem pro prostředí EAGLE jsou uloženy na CD v příloze.



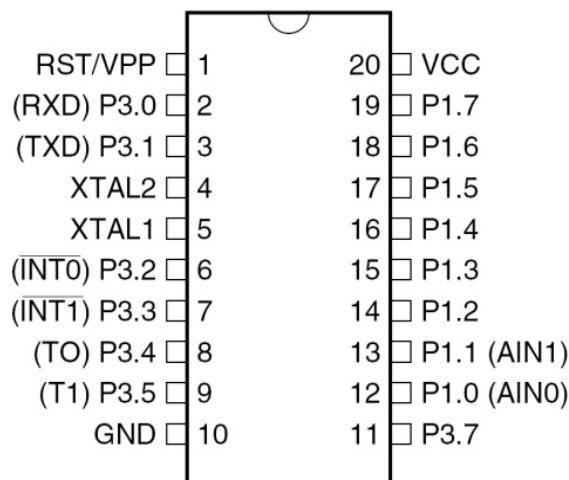
Obr. 3.1.2.1. Šablona desky ladící části (není v poměru 1:1)

### 3.2. Řídící část systému

Úkolem řídicí části je kombinovaně spínat ladící část s dosažením výsledné hodnoty kapacity obvodu na základě požadavků obslužného programu v PC. Tento proces řízení bude realizován využitím mikroprocesoru, jak je patrné ze zadání projektu. Hlavním parametrem pro výběr mikroprocesoru je počet řídicích pinů. Zapotřebí je tedy 9 řídicích pinů. Dalším parametrem je sériový kanál pro komunikaci s PC. Pro komunikaci s PC je předpoklad využití sériové komunikace RS-232. Pro sériovou linku jsou potřeba další dva piny (TxD, RxD).

### 3.2.1. Řídící mikroprocesor

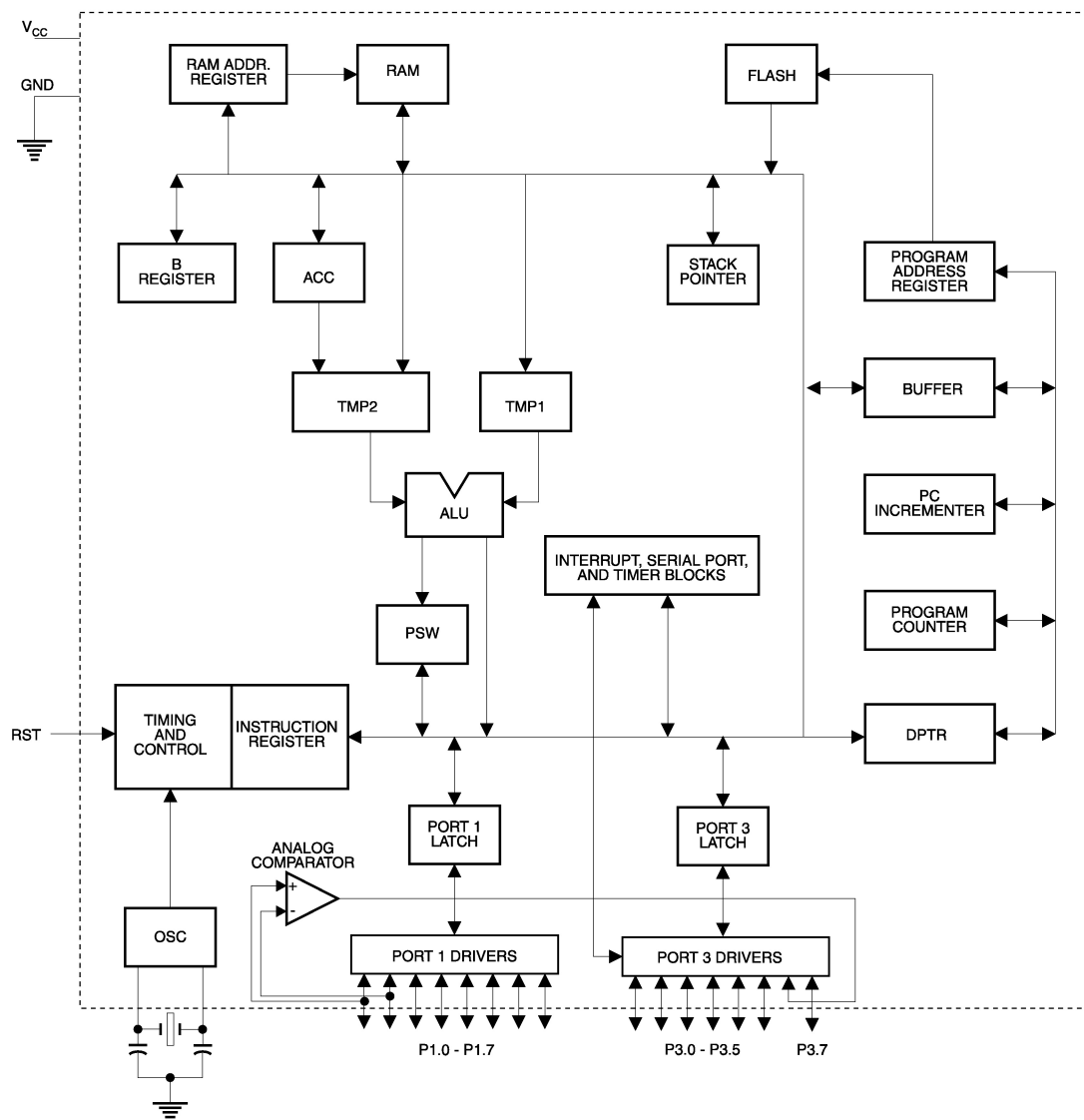
Jako vhodný mikroprocesor byl použit AT89C2051, pro jeho dostupnost, cenu, snadné programování. Rozmístění pinů mikroprocesoru je na (obr. 3.2.1).



Obr. 3.2.1. Rozmístění pinů u mikroprocesoru AT89C2051 [7]

Mikrořadiče xx51 vycházejí z mikroprocesoru 8051, mezi *základní vlastnosti* patří:

- zintegrovaná paměť Flash pro uložení programu (instrukcí), její velikost závisí na konkrétním typu mikrořadiče (AT89C1051 – 1 KB, AT89C2051 – 2 KB, AT89C4051 – 4 KB); zaručený počet programování je 1000,
- zintegrovaná datová RAM o kapacitě 128 B,
- mikrořadič pracuje s napájecím napětím v rozsahu 2,7 až 6 V,
- plně statický design, pracuje s hodinovým kmitočtem 0 až 24 MHz,
- dvouúrovňový zámek pro paměť Flash,
- mikrořadič může ovládat 15 vstupně/výstupních linek, které mohou přímo budit LED (zkratový proud jedné linky je 20 mA; součet proudů všech výstupů nesmí překročit 80 mA),
- zintegrovaný analogový komparátor,
- zintegrovány dva 16bitové čítače/ časovače,
- zintegrován programovatelný sériový kanál (duplexní),
- 6 zdrojů přerušení,
- dva režimy snížení spotřeby[5].

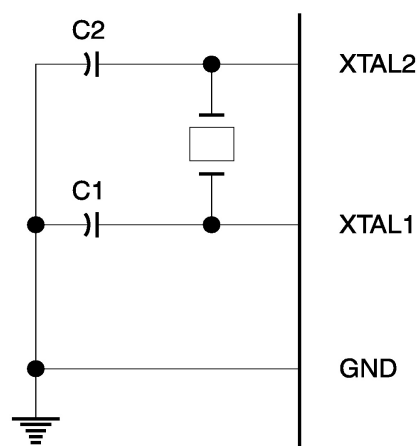


Obr. 3.2.2. Blokové schéma AT89C2051 [7]

Jako zdroj hodinového kmitočtu pro mikrokontrolér lze použít krystal doplněný kondenzátory. Doporučené zapojení výrobcem je na (obr. 3.2.3).

Hodnoty připojených kondenzátorů výrobce udává pro použití krystalu  $30 \text{ pF} \pm 10 \text{ pF}$  a pro použití keramických rezonátorů  $40 \text{ pF} \pm 10 \text{ pF}$ . [7]





Obr. 3.2.3. Zapojení zdroje hodinového kmitočtu [7]

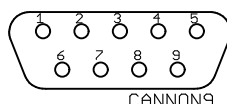
### 3.2.2. Sériová komunikace RS-232

Standart **RS-232** se používá jako komunikační rozhraní osobních počítačů a další elektroniky. Tento standart umožňuje propojení a vzájemnou sériovou komunikaci dvou zařízení, tzn. že jednotlivé bity přenášených dat jsou vysílány postupně za sebou (v sérii) po jediném vodiči. Standard definuje asynchronní sériovou komunikaci pro přenos dat. Logický stav „0“, „1“ přenášených dat je reprezentován pomocí dvou možných úrovní napětí, které jsou bipolární a dle zařízení mohou nabývat hodnot  $\pm 5$  V,  $\pm 10$  V,  $\pm 12$  V nebo  $\pm 15$  V. Nejčastěji se používá varianta při které logické hodnotě 1 odpovídá napětí -12 V a logické hodnotě 0 pak +12 V. Srovnání úrovní RS-232 a TTL je zřejmé z (obr. 3.2.5). Základní tři vodiče rozhraní (příjem RxD, vysílání TxD a společná zem GND) jsou doplněny ještě dalšími sloužícími k řízení přenosu (vstupy DCD, DSR, CTS, RI, výstupy DTR, RTS). Ty mohou a nemusí být používány (zapojeny), nebo mohou být použity pro napájení elektronických obvodů v zařízení, jako je například počítačová myš. Výstupní elektronika je vybavena ochranou proti zkratu, kdy po překročení proudu 20 mA proud již dále neroste. [10]

Tab. 3.2.1. Linky sériového portu [5]

Vývod	Název	Směr	Význam
1	RLSD	vstup	detektor nosného signálu
2	RxD	vstup	přijímaná data
3	TxD	výstup	vysílaná data
4	DTR	výstup	pohotovost koncového zařízení
5	GND	zem	signálová zem
6	DSR	vstup	pohotovost ukončovacího zařízení
7	RTS	výstup	výzva k vyslání
8	CTS	vstup	pohotovost k vyslání
9	RING	vstup	indikátor volání

Standard RS-232 uvádí jako maximální možnou délku vodičů 15 metrů, nebo délku vodiče o kapacitě 2500 pF. To znamená, že při použití kvalitních vodičů lze dodržet standard a při zachování jmenovité kapacity prodloužit vzdálenost až na cca 50 metrů. Kabel lze také prodlužovat při snížení přenosové rychlosti, protože potom bude přenos odolnější vůči velké kapacitě vedení. Texas Instruments uvádí jako výsledek pokusných měření následující délky vodičů v závislosti na přenosové rychlosti. Vzhledem k „laboratorním“ podmínkám tohoto měření je třeba brát tyto údaje pouze jako orientační. V praxi je třeba počítat s rušením.



Obr. 3.2.4. Označení pinů konektoru CANNON9

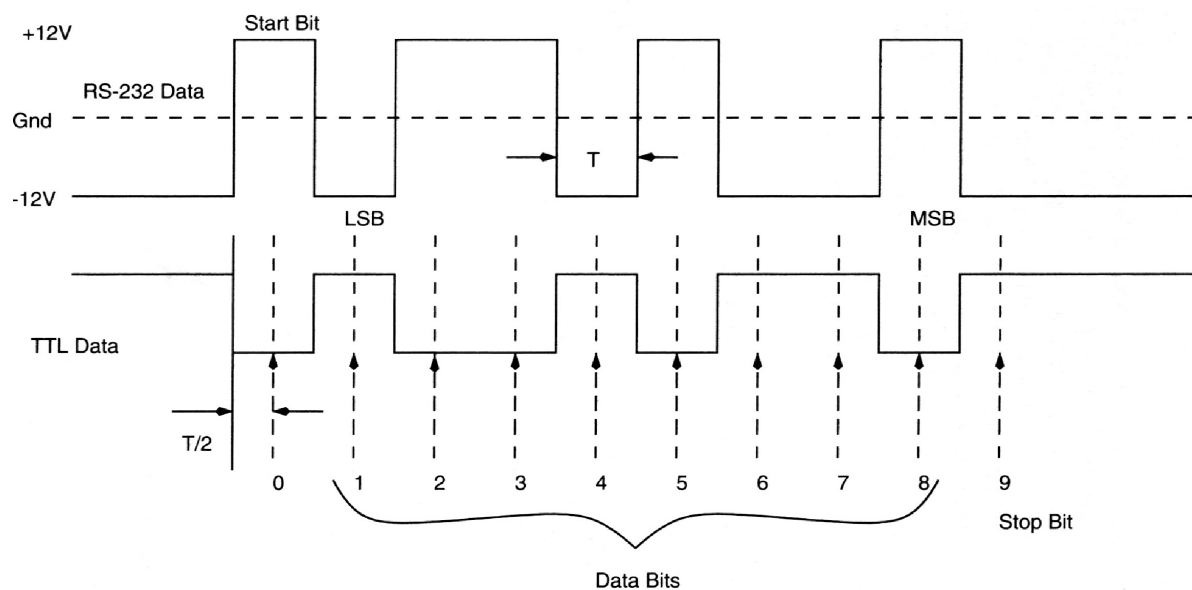
Tab. 3.2.2. Výsledky pokusných měření Texas Instruments[11]

Přenosová rychlost [Bd]	Max. délka [m]
19200	15
9600	150
4800	300
2400	900

*Parita* je nejjednodušší způsob jak bez nároků na výpočetní výkon zabezpečit přenos dat. Ve vysílacím zařízení se sečte počet jedničkových bitů a doplní se paritním bitem tak, aby byla zachována předem dohodnutá podmínka sudého nebo lichého počtu jedničkových bitů.

- **SUDÁ PARITA** – Počet jedničkových bitů + paritní bit = sudé číslo.
- **LICHÁ PARITA** – Počet jedničkových bitů + paritní bit = liché číslo.
- **SPACE PARITY** – Tzv. nulová parita – paritní bit je vždy v log. 0, používá se například při komunikaci s 7bitového zařízení s 8bitovým, kdy paritní bit nahrazuje tvrdou log. 0 poslední bit v byte, tím je zachována kompatibilita s 8bitovým přenosem.
- **MARK PARITY** - Paritní bit je nastaven tvrdě na log. 1, při kompenzaci 7bitového provozu je třeba jej na přijímací straně nulovat, jinak není kompatibilní s ASCII. [11]

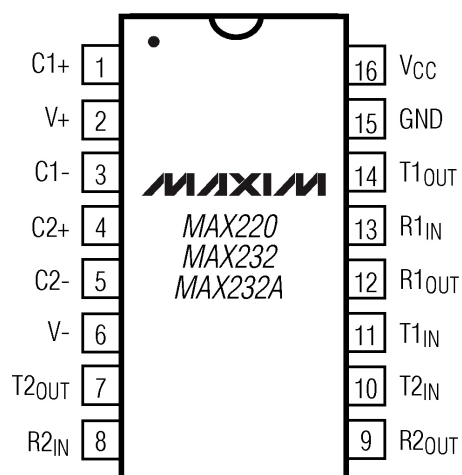
Vzhledem k odlišným napěťovým úrovním RS-232 a mikrokontroléru (typ. +5 V) není přímé propojení s TTL, CMOS možné. Napěťové úrovně lze sjednotit pomocí převodníku **MAX232** (Maxim): konvertuje log. 0 na +3,15 V a log. 1 na –3,15 V.



Obr. 3.2.5. Porovnání napěťových úrovní u RS-232 a TTL [9]

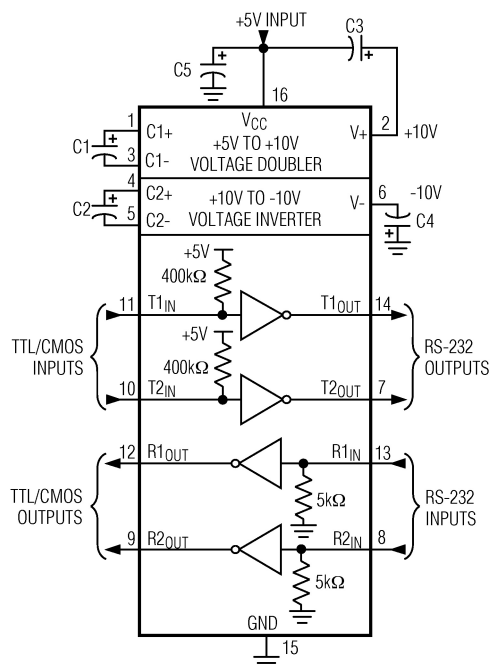
*Základní parametry MAX232:*

- napájecí napětí +5 V
- převádí obě linky oběma směry
- rychlost až 200 kb/s
- pouzdro DIP16



Obr. 3.2.6. Rozmístění pinů převodníku MAX232 [8]

Na (obr. 3.2.7) je výrobcem doporučené zapojení převodníku úrovní MAX232.



Obr. 3.2.7. Doporučené zapojení převodníku MAX232

### 3.2.3. Asynchronní přenos

Mikrokontrolér AT89C2051 je vybaven jednotkou UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter).

**UART** je univerzální asynchronní přijímač / vysílač. Umožňuje komunikovat mikrokontroléru se sériovým I/O zařízením. Obsahuje základní části:

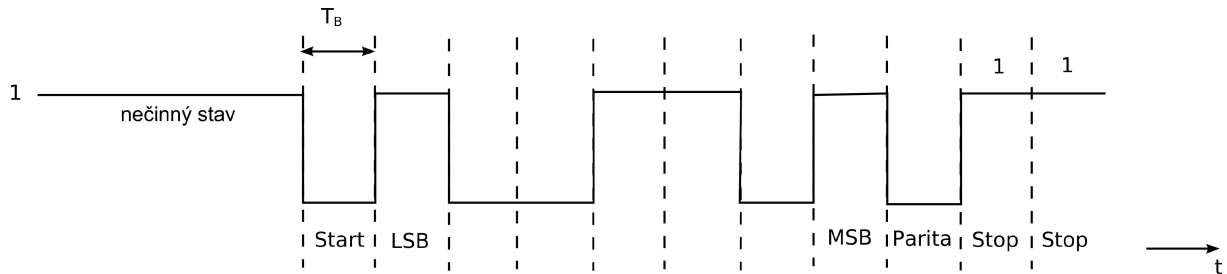
- sériový přijímač Rx,
- sériový vysílač Tx,
- obousměrný buffer datové sběrnice,
- externí hodinové signály RxCLK a TxCLK.

Při asynchronním přenosu vysílač může posílat data v libovolném okamžiku s libovolně dlouhou pauzou mezi vyslanými daty. Při komunikaci mezi dvěma zařízeními je struktura přenášeného signálu (dat) pevně daná (tvoří rámec). Přenos je duplexní, tj. obousměrný.

#### Formát asynchronního rámce:

- Start bit; vždy logická nula,
- datové bity reprezentující přenášenou informaci; nejméně důležitý bit LSB je vyslán jako první,

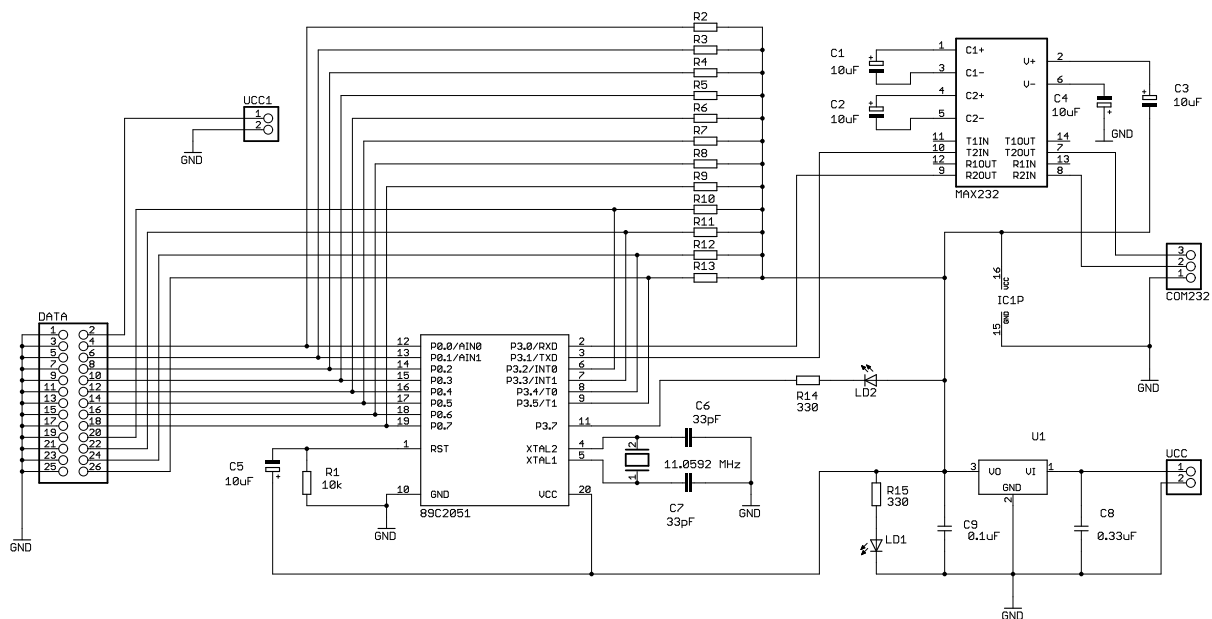
- volitelný paritní bit pro možnost detekce chyb během přenosu; používá se lichá i sudá parita,
- Stop bit; lze použít 1, 1,5 nebo 2 stop bity (nejčastěji); vždy logická jednička. [9]



Obr. 3.2.8. Struktura asynchronního rámce

### 3.2.4. Realizace řídicí části

Při návrhu řídicí části bylo vycházeno z doporučených zapojení mikrokontroléru AT89C2051 [7] a napěťového převodníku MAX232 [8]. Kompletní zapojení řídicí části je na (obr. 3.2.9).



Obr. 3.2.9. Schéma zapojení řídicí části

Jako zdroj hodinového kmitočtu mikrokontroléru slouží zapojení krystalu s kmitočtem 11,0592 MHz a kondenzátorů s výrobcem doporučenou hodnotou 33 pF. Hodnota krystalu je zvolena pro dosažení maximální přesnosti nastavení přenosové rychlosti. Rezistor R1 a

kondenzátor C5 na vstupu RST mikrokontroléru způsobí při připojení napájecího napětí reset mikrokontroléru, tvoří tedy nulovací obvod mikrokontroléru. AT89C2051 obsahuje dva vstupně / výstupní porty P1 a P3. Port P1 je plně využit pro spínání kapacitní řady v ladící části a přímo vyveden na konektor DATA pro připojení k ladící části. Všechny piny portu P1 jsou doplněny zapojením rezistorů R2 až R9 (s hodnotou 2 kΩ) k napájecímu napětí +5 V, protože mikrokontrolér spíná směrem k zemi. Na portu P3 jsou využity piny P3.0 a P3.1 pro sériový kanál. K pinu P3.7 je připojena LED červené barvy pro indikaci přijetí dat od obslužného programu v PC. Zbývající piny portu P3 byly vyvedeny na konektor DATA s možností budoucího využití při rozšíření systému.

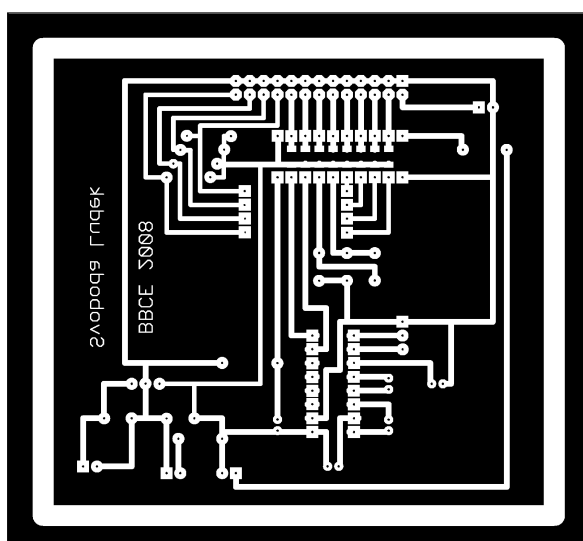
Napěťový převodník je doplněn kondenzátory dle doporučení výrobce. TTL úroveň z mikrokontroléru je přivedena na T2IN (vstup pro vysílaná data) a R2OUT (výstup pro příjem dat). Na T2OUT, R2IN je již napěťová úroveň dle standardu RS-232. Oba piny jsou již vyvedeny na konektor COM232 pro přímé propojení s PC. Význam pinů konektoru je popsán v (tab. 3.2.3).

Tab. 3.2.3. Zapojení význam pinů konektoru COM232

Označení pinu	Význam
1	Zem (GND)
2	TxD vysílaná data z PC
3	RxD data přijímaná v PC

Oba obvody jsou napájeny ze stabilizátoru napětí 7805. Zapojení stabilizátoru je opět dle doporučení výrobce. K výstupu stabilizátoru je připojena LED zelené barvy pro indikaci připojeného vstupního napětí na konektoru UCC.

Konektor DATA je totožný s konektorem ladící části pro vzájemné snadné propojení plochým kabelem. Na konektor je vyvedeno i napětí ze svorky UCC1, sloužící pro napájení ladící části.



Obr. 3.2.10. Šablona pro výrobu řídicí části (není v poměru 1:1)

Při samotné realizaci řídicí části byla použita jak klasická pouzdra, tak i pouzdra v SMD. Deska je navrhována jako jednostranný spoj. Zdrojové soubory s návrhem pro prostředí EAGLE jsou uloženy na CD v příloze.

### 3.2.5. Nastavení mikroprocesoru

Pro komunikaci řídicí části a PC se využil sériový kanál mikrokontroléru. Pro funkční komunikaci je nutné správné nastavení!

#### Sériový kanál

Pro práci se sériovým kanálem jsou určeny registry:

- řídicí registr SCON (konfiguruje vlastnosti sériového kanálu),
- datový registr SBUF (slouží pro příjem/vysílání znaku),
- bit SMOD v registru PCON ovlivňující přenosovou rychlost.

Registr **SBUF** slouží pro příjem/vysílání znaku. Zápis znaku do SBUF způsobí jeho vyslání (při správné konfiguraci sériového kanálu). Podobně čtení SBUF získáme přečtený znak (pokud bude příjem znaku povolen).

Jednotlivé bity řídicího registru **SCON** jsou uvedeny v (tab. 3.2.4).

Tab. 3.2.4. Registr SCON

7	6	5	4	3	2	1	0
SM0	SM1	SM2	REN	TB8	RB8	TI	RI

Bity SM0, SM1 slouží k nastavení režimu sériového kanálu dle (tab. 3.2.5)

Tab. 3.2.5. Režimy sériového kanálu AT89C2051

Mód	SM0	SM1	režim	Přenosová rychlost
0	0	0	8bitový posuvný registr	OSC/12
1	0	1	8bitový asynchronní přenos	čítač/časovač 1
2	1	0	9bitový asynchronní přenos	OSC/64 nebo OSC/32
3	1	1	9bitový asynchronní přenos	čítač/časovač 1

*Význam ostatních bitů:*

- SM2 – povolení tzv. víceprocesorové komunikace,
- REN – povolení příjmu,
- TB8 – vysílaný 9. bit (v režimech 2,3),
- RB8 – přijatý 9. bit (v režimech 2,3),

- TI – indikace vyprázdnění vysílacího registru,  
v režimech 0 je aktivován na konci vysílání 8. bitu,  
v režimech 1,2 a 3 je aktivován na začátku stop-bitu, tento bit  
se nastaví hardwarově, nuluje se programově,
- RI – indikace naplnění přijímacího registru,  
v režimech 0 je aktivován po přijetí 8. bitu,  
v režimech 1,2 a 3 je aktivován uprostřed stop-bitu, tento bit  
se nastaví hardwarově, nuluje se programově.

Pro realizaci této aplikace byl zvolen režim 1. Tedy režim, kdy sériový kanál používá 8bitový asynchronní přenos dat. Bity se vysílají na TxD (P3.1) a přijímají na RxD (P3.0). Přenos začíná start-bitem (log.0), následuje 8 datových bitů ( v pořadí od nejméně významného k nejvíce významnému) a poslední je stop-bit (log.1). Přenosová rychlost je dána přetečením časovače 1.

Bit **SMOD** v registru PCON umožňuje zdvojnásobit přenosovou rychlost.

Tab. 3.2.6. Registr PCON

7	6	5	4	3	2	1	0
SMOD	-	-	-	-	-	PD	IDL

Přenosové rychlosti vysílače a přijímače při asynchronním přenosu nemusí být shodné, nesmí se však vzájemně lišit o více než  $\pm 5\%$ ! [5]

## Čítač / časovač 1

Jelikož je přenosová rychlost dána přetečením časovače, je nutné jej také patřičně nastavit.

*Čítač* je obvod, který počítá impulzy vnějšího signálu(měří jeho kmitočet). *Časovač* čítá pevný kmitočet, který je obvykle odvozen od hodinového signálu mikrokontroléru. Napočítáním určitého počtu impulzů se zajistí odměření časového úseku. Obvykle jsou obě funkce spojeny, a pak se jedná o čítač/časovač.

AT89C2051 obsahuje dva čítače/časovače, které mohou mít délku až 16 bitů. Obsah čítačů je dostupný pomocí registrů TH1, TL1 (pro čítač/časovač 1) a TH0, TL0 (pro čítač/časovač 0). Každý čítač/časovač lze nezávisle na druhém nastavit do čtyř režimů. Pro řízení čítačů/časovačů se používají registry TMOD a TCON.

Registr **TMOD** umožňuje volit režim obou čítačů/časovačů. Registr TMOD (není bitově adresovatelný) je rozdělen na dvě poloviny, dolní 4 bity ovládají volbu režimu čítače/časovače 0, horní 4 bity volí stejným způsobem režim čítače/časovače 1. Dle zvoleného režimu sériového kanálu bude využit čítač/časovač 1.



Význam bitů registru *TMOD*:

- **G** (Gate) volí způsob hradlování čítače (tedy kdy jsou impulzy čítače uvažovány):
  - $G = 0$  čítač/časovač je řízen pouze programově (bitem TR1 v registru TCON);
  - $G = 1$  čítač/časovač je řízen programově (bitem TR1 v registru TCON) i obvodově (vstupem  $\overline{INT1}$ )
- **C/T** (Counter / Timer) volí, zda čítač/časovač pracuje jako čítač nebo časovač:
  - $C/\overline{T} = 0$  pracuje jako časovač, v tom případě jsou brány hodiny z vnitřního zdroje odvozeny jako 1/12 hodinového kmitočtu mikrokontroléru,
  - $C/\overline{T} = 1$  pracuje jako čítač, hodinový vstup je na vývodu T1. Maximální kmitočet je 1/24 hodinového kmitočtu mikrokontroléru,
- **M1, M0** (Mode) volí se jeden ze 4 režimů čítače/časovače.

Tab.3.2.7. Registr *TMOD*, volba režimu čítače/časovače

Mód	M1	M0	Režim
0	0	0	13bitový čítač
1	0	1	16bitový čítač
2	1	0	8bitový čítač s funkcí RELOAD
3	1	1	Pracuje-li čítač/časovač 0 v režimu 3, lze čítač/časovač 1 použít pouze v aplikaci, která nepracuje s přerušením

Jako vhodný režim byl zvolen režim 2. V tomto režimu čítač/časovač je 8bitový s funkcí RELOAD. Čítač/časovač je tvořen registrem TL1 a čítá nahoru po přetečení se nastaví TF1 (v registru TCON) a zároveň se TL1 naplní obsahem TH1 (tedy automaticky se provádí nové nastavení – RELOAD).

Tab. 3.2.8. Registr *TMOD*

7	6	5	4	3	2	1	0
G	C/ $\overline{T}$	M1	M0	G	C/ $\overline{T}$	M1	M0
čítač/časovač 1				čítač/časovač 0			

Bity registru **TCON** (je bitově adresovatelný) slouží pro programové spouštění časovačů nebo indikaci přetečení:

- TF0, TF1 indikují přetečení čítače/časovače 0,1,
- TR0, **TR1** povolují čítání impulzů pro čítače/časovače 0, 1. [5]

Tab. 3.2.9. Registr TCON [5]

7	6	5	4	3	2	1	0
TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0

Pro získání přenosové rychlosti 9600 Bd je třeba určit obsah registru TH1, který se po přetečení časovače 1 nahrává do TR1 a určuje přenosovou rychlost sériového kanálu. Hodnotu obsahu určíme dle následujícího vztahu

$$PR = \frac{2^{SMOD}}{32} \cdot \frac{f_0}{12 \cdot [256 - TH1]} \quad (3.2.1)$$

Dosazením hodnot bitu  $SMOD = 1$  a  $f_0 = 11,0592 \text{ MHz}$  určíme hodnotu  $TH1 = 250$ . Tato hodnota je zapotřebí nastavit do registru TH1.

### Přerušení (Interrupt)

S používáním sériového kanálu, čítačů/časovačů je neodmyslitelně spojeno přerušení. Je to reakce na vnější událost. Běžící program je v daném místě přerušen a začne se vykonávat tzv. *rutina obsluhy přerušení*. Po obsloužení přerušení pokračuje program ve své činnosti v místě, kde byl přerušen.

Mikrokontrolér rozeznává celkem šest zdrojů přerušení, jsou to:

- vnější přerušení aktivované pomocí vstupu  $\overline{INT0}$  (P3.2),
- vnější přerušení aktivované pomocí vstupu  $\overline{INT1}$  (P3.3),
- přerušení vyvolané přetečením čítače/časovače 0,
- přerušení vyvolané přetečením čítače/časovače 1,
- přerušení vyvolané příjmem znaku pomocí sériového kanálu,
- přerušení vyvolané po vyslání znaku sériovým kanálem.

Rutiny obsluhy přerušení jsou umístěny v paměti programu na pěti specifikovaných adresách, (tab. 3.2.10). Jak je z (tab. 3.2.10) zřejmé, každý zdroj přerušení má svou specifickou adresu. Jediná výjimka se týká přerušení od sériového kanálu, zde je pro oba zdroje přerušení jediná rutina jejich obsluhy.

Tab. 3.2.10. Specifické adresy rutiny obsluhy přerušení

Adresa	zdroj přerušení
003h	vnější přerušení 0
00Bh	čítač/časovač 0
013h	vnější přerušení 1
01Bh	čítač/časovač 1
023h	sériový kanál

Mikrokontrolér AT89C2051 je navržen tak, že po resetu je příjem jakéhokoliv přerušení *zakázán*. Pokud chceme na přerušení reagovat, musíme dané zdroje přerušení povolit. Povolení přerušení je řízeno pomocí registru **IE** (Interrupt Enable).

Tab. 3.2.11. Registr IE

7	6	5	4	3	2	1	0
EA	-	-	ES	ET1	EX1	ET0	EX0

Všechny bity v *IE* jsou *bitově adresovatelné*, tak lze pohodlně povolovat/zakazovat libovolné přerušení nezávisle na ostatních.

Význam jednotlivých bitů registru IE:

- EA – povolení všech přerušení, tzv. globální přerušení. Při EA = 0 jsou všechna přerušení zablokována. Při EA = 1 je přerušovací systém uvolněn, příjem jednotlivých přerušení je řízen bity ES až EX0.
- ES – povolení přerušení od sériového kanálu,
- ET1- povolení přerušení od čítače/časovače 1,
- EX1 – povolení přerušení od INT1,
- ET0- povolení přerušení od čítače/časovače 0,
- EX0 – povolení přerušení od INT0. [5]

### 3.2.6. Řídící program mikroprocesoru

Řídící program pro mikrokontrolér se skládá z několika částí (podprogramů). První částí je definování obsluhy přerušení dle jednotlivých zdrojů. V druhé části (inicializační smyčka) jsou patřičně nastaveny registry pro zvolení režimu sériového kanálu, čítače/časovače 1. Dále povolení přerušení a naplnění registru R0 logickými nulami. Další částí je hlavní zacyklený program. Ten neustále posílá obsah R0 na port P1 a nastavuje pin P3.7 na log. 1. Při vyvolání přerušení od sériového kanálu se z hlavního programu vyskočí na návěstí SERIAL, kde je program pro obsluhu tohoto přerušení. Při zakázaných přerušeních se testuje naplnění přijímacího registru. Pokud je registr RI = 1, nastaví se jeho obsah na 0 a skočí na návěstí PRIJEM, kde se načtou přijatá data do registru R0. Na jednu sekundu se rozvíří LED na portu P3.7. Dále se jen povolí přerušení a je proveden návrat do hlavního programu, který pokračuje v místě, kde byl přerušen.

## Popis programu:

```
CH1      EQU 250                                ;vytvoření konstanty CH1 s hodnotou 250
ORG 0H
JMP RESET                                     ;inicializace,skok na návěští RESET
ORG 023H                                     ;při přerušení od sériového kanálu
JMP SERIAL                                   ;skoč na návěští seriál

;-----inicializační smyčka nastavení-----
RESET:    MOV R0, #00000000b                    ;do registru R0 ulož 0
          MOV TH1, #CH1                        ;do registru TH1 nastav hodnotu konstanty CH1
          MOV TMOD, #00100000b                ;nastavení režimu 2 čítače/časovače 1
          MOV SCON,#01010000b                 ;nastavení režimu 1 sériového kanálu
          SETB EA                             ;globální povolení přerušení
          SETB ES                             ;povolení přerušení od sériového kanálu
          MOV PCON, #10000000b                ;nastavení bitu SMOD na 1
          SETB TR1                             ;spuštění časovače 1

;-----zacyklený hlavní program-----
SEM:      MOV P1,R0                            ;odeslání obsahu registru R0 na port P1
          SETB P3.7                          ;zhasnutí indikační LED na portu P3.7
          JMP SEM                              ;zacyklení, skok na návěští SEM

;-----Podprogram pro obsluhu přerušení od sériového kanálu-----
SERIAL:   CLR EA                              ;globální zakázání přerušení
          JBC RI,PRIJEM                       ;testování naplnění přijímacího registru,
                                           když RI=1 tak nastav RI = 0 a skoč na PRIJEM
          SETB EA                              ;globální povolení přerušení
          RETI                               ;návrat z podprogramu

;-----Obsluha příjmu-----
PRIJEM:   MOV R0,SBUF                         ;ulož do registru R0 obsah registru SBUF
          CLR P3.7                          ;rozsviť LED na portu P3.7
          CALL DEL1S                          ;čekej jednu sekundu
          SETB EA                             ;globální povolení přerušení
          RETI                               ;návrat z podprogramu

;-----
INCLUDE(DELAY.INC)                         ;načtení zpoždění uložených v souboru DELAY.INC
END
```

Řídící program je uložen na doprovodné CD této práce v několika typech souborů.

### 3.3. Obslužný program PC

Obslužný program byl vytvořen v programovacím prostředí Borland DELPHI Personal 7, studentská verze. Program byl navržen jako demonstrační a maximálně univerzální. Jeho podoba je na následujícím obrázku.

The screenshot shows a software window titled "BBCE Elektronicky laditelná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz". The interface is divided into several sections:

- Frekvence:** A text box containing "12" and a dropdown menu set to "MHz".
- Vypočítat kapacitu obvodu:** A button to calculate the circuit capacitance.
- Výpočet:** A scrollable area showing calculated parameters:
  - Počet závitů: 1
  - Parazitní kapacita: 0pF
  - Materiál: Měď
  - ur: 0,99999
  - u0: 1,25663706143592E-6 H.m-1
  - Konduktivita: 56000000 S.m-1
  - Výpočet:**
    - Délka vodiče: 1,4765485471872 m
    - Hloubka vniku: 1,9415012146991E-5
    - Odpor vodiče: 0,108071747255614 Ohm
    - Indukčnost: 1,50484775666427E-6 H
    - Kapacita: 1,16892112131205E-10 F
- Parametry antény:** Fields for:
  - Průměr cívky: 47 cm
  - Průměr vodiče cívky: 4 mm
  - Základní / parazitní kapacita: 0 pF
  - Materiál vodiče cívky: Měď
- Nastavení portu:** Fields for:
  - COM: 2
  - Přenosová rychlost: 9600 Bd
  - ☒ Automatické odeslání dat
- Změnit parametry antény a nastavení portu:** A button to update parameters.
- Kapacitní řada:** A row of checkboxes for capacitance values: 2 pF, 4 pF (checked), 8 pF, 16 pF (checked), 32 pF (checked), 64 pF, 128 pF, 256 pF, 512 pF.
- Nastavit procesor:** A button to set the processor.
- Bakalářská práce:** A section with the title "Elektronicky laditelná smyčková anténa pro kmitočty do 30 MHz" and the author "Svoboda Luděk, xsvobo02@stud.feec.vutbr.cz".
- Ukončit program:** A button to exit the program.

Obr. 3.3.1. Obslužný program

Uživatel má možnost volby parametrů antény, nastavení komunikačního portu a přenosové rychlosti. Hodnoty se zadávají v celých číslech s možností volby jednotky. Po zadání námi požadovaného kmitočtu a stisku tlačítka „Vypočítat kapacitu obvodu“ je provedena kontrola, zda leží požadovaný kmitočet uvnitř nastavených mezí. Dále provede výpočet kapacity obvodu dle postupu popsánoho v (kap. 2.3). Konstanty, výsledky jednotlivých veličin jsou zobrazeny v textové podobě. Současně zaškrtnutím příslušného políčka je demonstrováno sepnutí daného prvku kapacitní řady ladící části. Hodnota vypočtená programem je dle teorie přesná, ale hodnota zobrazena pomocí políček již ne. Je pouze přibližná, a to z důvodu použití nejmenšího kroku 4 pF. Vzniká tak určitá chyba. Odeslání vypočtených dat proběhne automaticky(při zaškrtnutém políčku „Automatické odeslání dat“) nebo po kliknutí na tlačítko „Nastavit procesor“. Pro změnu parametrů je

nutný stisk tlačítka „Změnit parametry a nastavení portu“.

Všechna nastavení jsou ukládána do souboru „nastaveni.ini“, odkud jsou při opětovném spuštění načtena. Jejich formát je na (obr. 3.3.2). S příslušnými hodnotami jsou uloženy i jejich jednotky. Každá jednotka je reprezentována číslem dle (tab. 3.3.1).

Tab. 3.3.1. Definování jednotek číslem

Průměr		Kapacita	
Jednotka	Číslo	Jednotka	Číslo
m	0	F	0
dm	1	mF	1
cm	2	uF	2
mm	3	nF	3
		pF	4

Dalšími uloženými parametry je i „pamet“ pro volbu automatického odesílání (pamet=1). Dále také materiál ( 0 = měď, 1 = hliník), meze zadávaného kmitočtu (nutno zadat vždy v příslušných jednotkách ve kterých zadáváme požadovaný kmitočet).

```
[PORT]
Port=2
Rychlost=9600
Pamet=1
[Antena]
Prumer smycky=47
Prumer smycky jednotka=2
Prumer vodice=4
Prumer vodice jednotka=3
Material=0
[Ladici cast]
Parazitni kapacita=0
Parazitni kapacita jednotka=4
[Meze frekvence]
Horni kmitocet=30
Dolni kmitocet=4
```

Obr. 3.3.2. Formát uložených dat v souboru „nastaveni.ini“

## Odesílání dat, TSerial

Pro odesílání dat po sériové lince mikrokontroléru byla použita třída Tserial [6]. Využívá několik metod a vlastností:

### Metody

- *constructor Create(Number:Integer;ABaudRate:DWord)* – konstruktor, *Number* udává číslo portu, *ABaudRate* je přenosová rychlost v baudech. Ostatní parametry přenosu jsou: 1 stop-bit, 8bitový znak, bez parity. Pokud není port k dispozici, vyvolá se výjimka,
- *destructor Destroy* – destruktorka,
- *function ReadByte(var AByte:Byte):Boolean* – čte jeden znak ze sériového kanálu do proměnné *AByte*, návratová hodnota informuje o úspěšnosti příjmu,
- *function WriteByte(AByte:Byte):Boolean* – pošle znak *AByte* na sériový kanál, návratová hodnota informuje o úspěšnosti vyslání,
- *procedure ClearInBuffer* – smaže vstupní buffer, znaky přijaté v bufferu tedy nebudou čteny,
- *procedure ClearOutBuffer* – smaže výstupní buffer.

### Vlastnosti

- *BaudRate:DWord* – nastaví nebo zjistí přenosovou rychlost sériového kanálu,
- *InQueue:DWord (R/O)* – zjistí počet znaků přijatých do vstupního bufferu,
- *OutQueue:DWord (R/O)* – zjistí počet znaků ve výstupním bufferu,
- *CTS: Boolean (R/O)* – čtení stavu linky CTS,
- *DSR: Boolean (R/O)* – čtení stavu linky DSR,
- *RING: Boolean (R/O)* – čtení stavu linky RING (RI),
- *RLSD: Boolean (R/O)* – čtení stavu linky RLSD (DCD),
- *DTR: Boolean (W/O)* – zápis stavu linky DTR,
- *RTS: Boolean (W/O)* – zápis stavu linky RTS[6]

V obslužném programu je tedy využita metoda Create. Každé použití metody si vyžaduje ukončení použitím Free, jinak port zůstane otevřený a nastane chyba. Dále bylo využito pro odesílání dat funkce WriteByte.

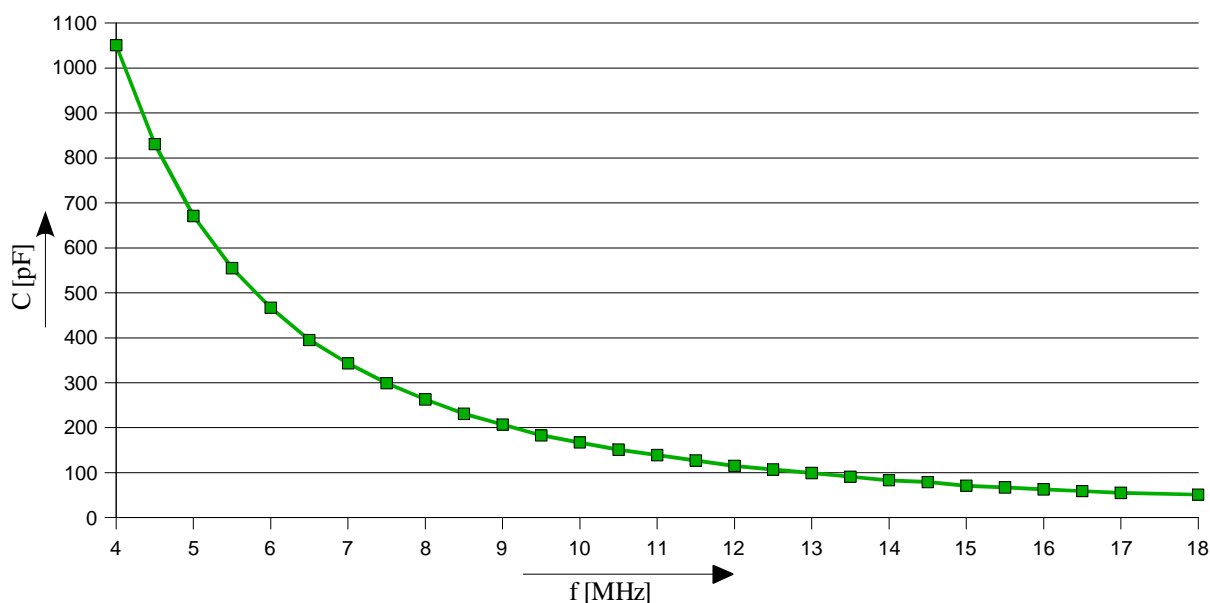
V nabídce políček symbolizujících prvky banky je nepřístupné políčko s hodnotou 2 pF připravené pro budoucí rozšíření systému o tento prvek banky. Při výpočtu kapacity je využito pole binárních hodnot, které se v případě rozšíření systému musí také o jeden prvek s hodnotou 2 pF zvětšit. Zvýšení by se také týkalo počtu opakování cyklů při výpočtu datového slova.

Program i celý projekt v prostředí Borland je uložen na doprovodném CD.

## 4. Ověření funkčnosti a parametrů antény

Ověření funkčnosti principu proběhlo měřením přípravku. K měření byla použita smyčková anténa dle (tab. 2.1.1). Měření bylo provedeno přístrojem NETWORK ANALYZER 9 kHz – 9 GHz od firmy Rohde&Schwarz. Přípravek byl napájen hodnotami napájecích napětí  $U_{CC} = 5,7 \text{ V}$  a  $U_{CC1} = 9 \text{ V}$ .

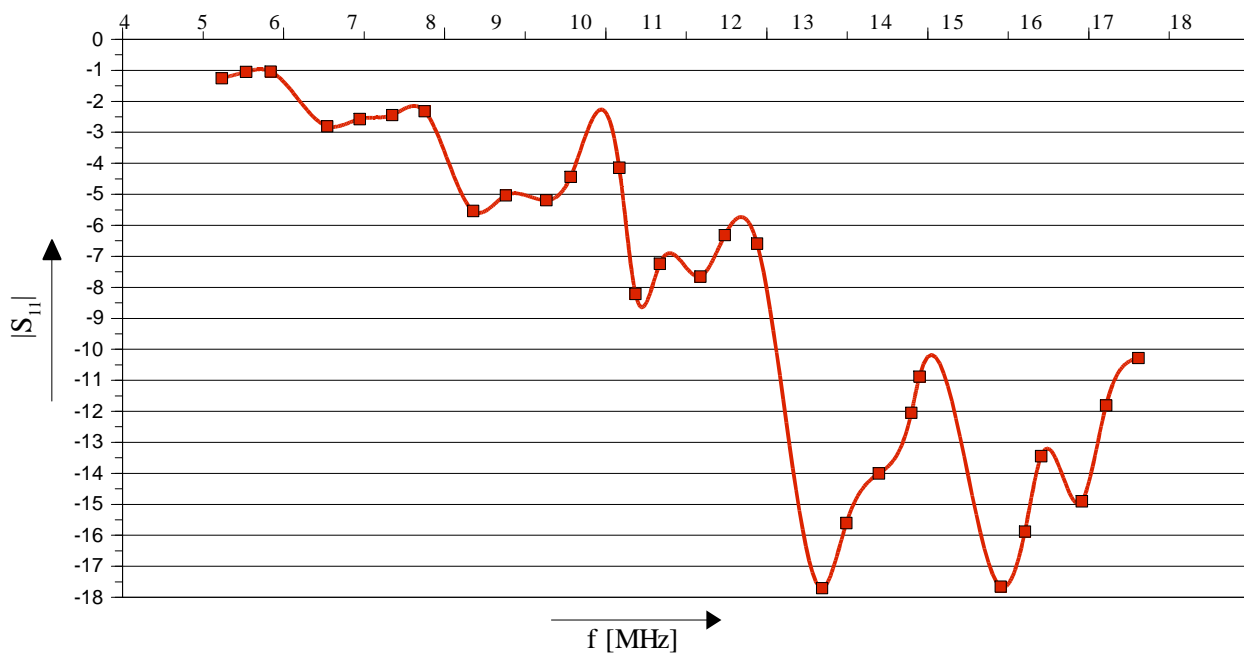
Všechny parametry antény byly nastaveny v ovládacím programu. V prvním kroku měření byla zjištěna parazitní kapacita při zapojeném přípravku, ale bez sepnutí prvků kapacitní řady. Tato kapacita byla také zadána jako parametr v ovládacím programu pro zohlednění její hodnoty při spínání prvků kapacitní řady ladící části. V druhém kroku bylo zadáno a změřeno 28 hodnot v rozsahu od 4 MHz do 18 MHz s krokem 0,5 MHz. Měřeny byly hodnoty rezonančního kmitočtu a parametr  $S_{11}$ . Tyto hodnoty jsou vyneseny do následujících grafů:



Obr. 4.1. Graf závislosti hodnoty kapacity obvodu na požadované hodnotě kmitočtu

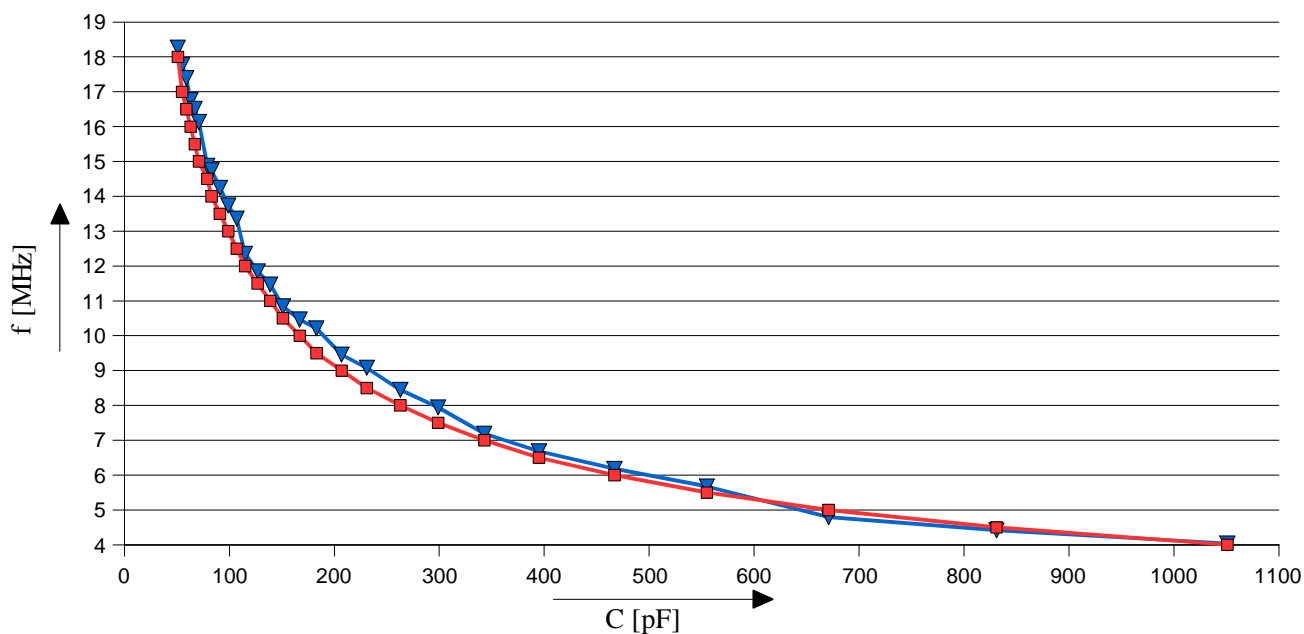
Z (obr. 4.1) je patrné, že s rostoucí požadovanou hodnotou kmitočtu klesá hodnota kapacity obvodu potřebná pro dosažení požadovaného kmitočtu.





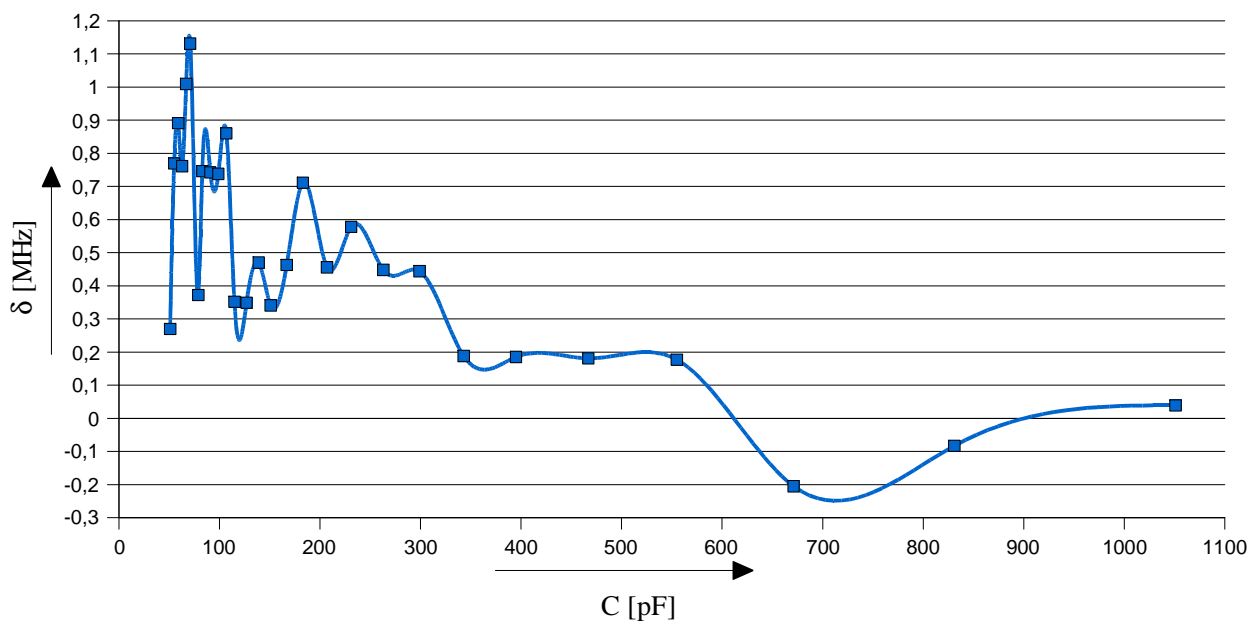
Obr. 4.2. Graf závislosti přizpůsobení  $|S_{11}|$  na hodnotě rezonančního kmitočtu obvodu

Nejlepší přizpůsobení dle (obr. 4.2) je přibližně na 13,5 MHz. Teoretický předpoklad nejlepšího přizpůsobení je v polovině rozsahu. Zlepšení a tedy dosažení teoretického předpokladu přizpůsobení dosáhneme změnou polohy přizpůsobovací smyčky.



Obr. 4.3. Porovnání závislosti rezonančního kmitočtu zadaného a změřeného na kapacitě obvodu

Závislosti v (obr. 4.3.) popisují závislost kmitočtu požadovaného a změřeného na kapacitě obvodu. Je zřejmé, že se oba průběhy nepatrně liší. Jejich odchylky byly zpracovány do (obr. 4.4).



Obr. 4.4. Závislost odchylky požadovaného a změřeného kmitočtu na kapacitě obvodu

Nejvýraznější odchylka nastala přibližně při nastavení 80 pF, viz (obr. 4.4). Tato odchylka může být způsobena nepřesností hodnoty prvku banky, malým nejmenším možným krokem banky, vlivem parazitních kapacit.

## 5. Závěr

Cílem této práce byl návrh a realizace ladícího systému s kompletním softwarovým vybavením. Dále pak ověření funkčnosti celého systému.

Celý systém ladění byl rozdělen na několik částí pro získání případné možnosti jednoduchých úprav, a to na ladící, řídící. Jako první byla vytvořena ladící část systému. Jejím vytvoření předcházelo ověření principu navržené ladící části systému na univerzální desce jen pro několik nízkých hodnot řady. Měření bylo ovlivněno parazitními kapacitami, ale i tak byl princip ověřen. Dále byla sledována poloha umístění ladící části k anténě. Při realizaci ladící části byl použit tranzistor s malou přechodovou kapacitou, ale i s nižší hodnotou maximálního kolektorového proudu. Tento parametr omezuje použitelnost systému.

Při návrhu řídící části byl jako vhodný mikrokontrolér zvolen AT89C2051. Pro komunikaci po sériové lince bylo nutné použití napěťového převodníku MAX232. Při realizaci řídící části bylo vycházeno z doporučených zapojení od výrobců. Zapojení je doplněno o stabilizátor napětí pro napájení obou integrovaných obvodů. Napájení je indikováno zelenou LED diodou. Červená LED indikuje příjem dat z obslužného programu. Ladící a řídící část jsou vzájemně propojeny datovým kabelem. Pro řízení spínání ladící části byl vytvořen řídící program pro mikrokontrolér. Ten pouze reaguje na data odeslaná obslužným programem v PC.

Obslužný program byl vytvořen v jazyce DELPHI v prostředí Borland. Jeho návrh byl proveden s cílem maximální univerzálnosti a vytvoření demonstračního prostředí. Program umožňuje volbu parametrů antény, ale i komunikace. Všechny parametry ukládá do souboru, takže si je všechny při opětovném spuštění pamatuje. Pro zadaný kmitočet program dle teorie a zadaných parametrů vypočte hodnotu hloubky vniku, odpor vodiče, indukčnost a kapacitu. Vše vypíše v textové formě a demonstračně zobrazí sepnutí jednotlivých prvků řady. Dále data jen odešle mikroprocesoru, který nastaví příslušné prvky ladící banky.

Funkčnost realizovaného systému byla ověřena měřením. Přeladitelné pásmo bylo měřením zjištěno od 4 MHz do 18 MHz. Odchylka požadovaného kmitočtu od změřeného dosáhla maximálně hodnoty 1 MHz. Zpřesnění nastavení lze zlepšením přizpůsobení na střední kmitočet pásma, nastavení hodnot kapacitní řady, co nejbližší teoretickým a také zjemnění minimálního kroku.

## Seznam literatury

- [1] Matuszczyk, Jacek. Antény prakticky. 3. české vydání. Praha: BEN, 2005. 239 s. ISBN 80-7300-178-0
- [2] Hanis, Stanislav; Svačina, Jiří. Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika.[pdf]. Brno: Ústav radiotechniky, 2002. Dostupný z WWW: <[https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Vf\\_a\\_mikrovlenna\\_technika\\_S.pdf](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Vf_a_mikrovlenna_technika_S.pdf)>.
- [3] GM Electronic. Brno. 2005 Součástky pro elektrotechniku. 2005. 534 s.
- [4] GES Electronics.Brno. 2007 GES CD KATALOG 2007/1.
- [5] Matoušek, David. Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051. 2. vydání. Praha : BEN, 2004. 264 s. ISBN 80-7300-094-6.
- [6] Matoušek, David. Udělej si z PC v Delphi...1.díl. 1. vydání. Praha: BEN, 2003. 272 s. ISBN 80-7300-111-X.
- [7] Atmel Corporation, 8-bit Microcontroller with 2K Bytes Flash.[pdf]. Atmel Corporation , 2005. Dostupné z WWW: <<http://www.atmel.com>>.
- [8] Maxim Integrated Products, +5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers.[pdf]. Maxim Integrated Products, 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.maxim-ic.com>>.
- [9] Frýza, Tomáš. Řízení komunikace. Mikroprocesorová technika, přednáška č.8 [online]. 2007. Dostupné z WWW: <[https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/B\\_EST/prezencni/BMPT/prednasky/bmpt\\_pred\\_08\\_071114.pdf](https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/B_EST/prezencni/BMPT/prednasky/bmpt_pred_08_071114.pdf)>.
- [10] Wikipedie, otevřená encyklopedie. RS-232[online]. MediaWiki. 2008. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/RS-232>>.
- [11] HW Server. HW server představuje – RS-232[online]. MediaWiki. 2008. Dostupné z WWW: <<http://rs232.hw.cz>>.