

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

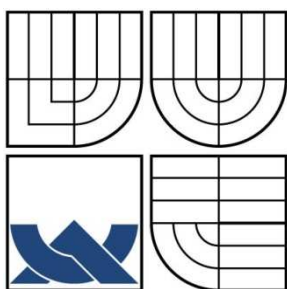
SACÍ MĚŘIČ REZONANCE S VĚTŠÍ MĚŘICÍ CÍVKOU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

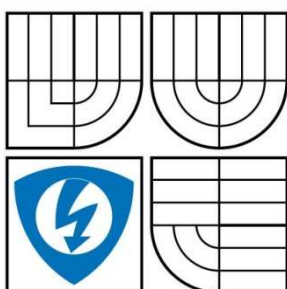
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL OBR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SACÍ MĚŘIČ REZONANCE S VĚTŠÍ MĚŘICÍ CÍVKOU GRID DIP METER WITH LARGE-DIAMETER MEASURING COIL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL OBR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL HANÁK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Michal Obr
Ročník: 2

ID: 101950
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Sací měřič rezonance s větší měřicí cívkou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a sestavte funkční vzorek sacího měřiče rezonance (grid dip meter). Měřicí cívka musí mít průměr přibližně 10 cm, frekvenční pásmo měřiče musí být přeladitelné cca v rozsahu 0,5 až 1,5 MHz. Měřicí kmitočet musí být možné přeladit elektronicky, například s využitím varikapů či jiných vhodných prvků. Pro měření množství odsáté energie z oscilátoru použijte malé panelové měřidlo, pro měření kmitočtu můžete využít externí stolní čítač. Funkční vzorek zabudujte do vhodné krabičky, avšak měřicí cívka musí být umístěna vně.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Bowick, C. RF circuit design, 2nd edition. Newnes, Amsterdam, 2008. ISBN 978-0-7506-8518-4.
- [2] Dobeš, J., Žalud. Moderní radiotechnika. BEN, Praha, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [3] Hagen, J. B. Radio-frequency electronics: circuits and applications. Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-55356-3.

Termín zadání: 7. 2. 2011

Termín odevzdání: 26. 5. 2011

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hanák

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku 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 c.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Předkládaná diplomová práce se zabývá sacím měřičem rezonance, jeho principem činnosti, vlastnostmi a postupem při měření. Práce obsahuje základní rozdělení oscilátorů, jejich vlastnosti a princip činnosti.

Diplomová práce obsahuje kompletní návrh sacího měřiče rezonance s větší měřicí cívkou umístěnou mimo přístroj. Měřič rezonance je vyrobený z SMD součástek na jednostranné desce plošných spojů. Sací měřič rezonance obsahuje vlastní transformátor, který má dvě sekundární vinutí pro napájecí měřiče rezonance a interního digitálního měřiče kmitočtu. Krabička obsahuje analogové panelové měřidlo a BNC konektor pro připojení externího čítače.

Klíčová slova

Indukčnost, kapacita, rezonanční frekvence, sací měřič rezonance – GDO, varikap, oscilátor, cívka

Abstract:

This master's thesis deals with grid dip meter, its operating principle, characteristics and with measuring procedure. The thesis contains basic division of oscillators, its characteristics and operating principal.

The master's thesis contains complete design of grid dip meter with large-diameter measuring coil which is placed outside the device. Grid dip meter is made of SMD components on a one-sided printed wiring. Grid dip meter consist of transformer itself, that has two secondary windings as a supply for resonance meters and internal digital frequency meter. The device has analog panel gauge and BNC input for external counter.

Key words

Inductivity, capability, frequency of resonance, grid dip meter – GDO, voltage variable capacitor, oscillator, coil

Bibliografická citace díla:

OBR, M. Sací měřič rezonance s větší měřicí cívkou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Hanák.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „Sací měřič rezonance s větší měřicí cívkou“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 20. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Hanákovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 20. května 2011

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod	- 9 -
2. Sací měřič rezonance – „GDO“	- 10 -
2.1 Co je GDO	- 11 -
2.2 Použití GDO	- 11 -
3. Oscilátory	- 13 -
3.1 Vlastnosti oscilátorů	- 13 -
3.2 Princip činnosti oscilátorů	- 14 -
3.3 Vznik netlumených kmitů	- 16 -
3.4 Rozdělení oscilátorů	- 17 -
3.4.1 Oscilátory LC	- 18 -
4. Cívky	- 22 -
4.1 Provedení cívek	- 23 -
4.2 Rozdělení cívek	- 24 -
4.3 Ztrátový úhel cívky.....	- 25 -
4.4 Transformátory	- 27 -
5. Popis, schéma a DPS návrhu zapojení měřiče rezonance	- 29 -
6. Síťový zdroj	- 35 -
7. Výpočet rezonančního obvodu	- 39 -
8. Výroba cívky a její měření	- 41 -
9. Seznam součástek	- 49 -
9.1 Seznam součástek zdroje	- 49 -
9.2 Seznam součástek měřiče rezonance	- 49 -
10. Závěr	- 51 -
Seznam použité literatury	- 53 -
Seznam použitých zkratk a symbolů	- 54 -
Seznam příloh.....	- 55 -

Seznam obrázků

Obr. 1 Profesionálně vyráběné GDO	- 10 -
Obr. 2 Blokové zapojení zpětnovazebního oscilátoru	- 16 -
Obr. 3 Paralelní rezonanční obvod	- 16 -
Obr. 4 Kmity	- 17 -
Obr. 5 Indukčně vázaný oscilátor	- 19 -
Obr. 6 Hartleyův oscilátor	- 19 -
Obr. 7 Colpittsův oscilátor	- 20 -
Obr. 8 Clappův oscilátor	- 20 -
Obr. 9 Cívka bez jádra	- 23 -
Obr. 10 Tlumivka	- 24 -
Obr. 11 Druhy vinutí cívek	- 25 -
Obr. 12 Náhradní schéma cívky a její fázorové diagramy	- 26 -
Obr. 13 Jednofázové transformátory	- 27 -
Obr. 14 Základní princip transformátoru	- 28 -
Obr. 15 Schéma zapojení měřiče rezonance	- 31 -
Obr. 16 Rozmístění součástek na DPS sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM	- 32 -
Obr. 17 Rozmístění součástek na DPS sacího měřiče rezonance. Pohled TOP	- 32 -
Obr. 18 DPS sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM	- 33 -
Obr. 19 Fotografie osazené DPS sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM	- 33 -
Obr. 20 Fotografie osazené DPS sacího měřiče rezonance. Pohled TOP	- 34 -
Obr. 21 Blokové uspořádání napájecího zdroje	- 35 -
Obr. 22 Schéma zapojení zdroje sacího měřiče rezonance	- 37 -
Obr. 23 Rozmístění součástek na DPS zdroje sacího měřiče rezonance. Pohled TOP	- 37 -
Obr. 24 DPS zdroje sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM	- 38 -
Obr. 25 Fotografie osazené DPS zdroje měřiče rezonance	- 38 -
Obr. 26 Graf závislosti citlivosti na vzdálenosti	- 43 -
Obr. 27 Graf závislosti citlivosti na úhlu natočení cívek	- 44 -
Obr. 28 Graf závislosti frekvence na napětí varikapu	- 46 -
Obr. 29 První způsob měření množství odsáté energie, kde je měřený obvod umístěný ve středu měřicí cívky	- 47 -
Obr. 30 Druhý způsob měření množství odsáté energie, kde se měřený obvod otáčí kolem své osy	- 48 -
Obr. 31 Druhý způsob měření množství odsáté energie, kde se měřený obvod otáčí kolem své osy	- 48 -
Obr. 32 Vyhotovený model měřiče rezonance ve 3D programu Pro/Engineer	- 56 -
Obr. 33 Vyhotovený model měřiče rezonance ve 3D programu Pro/Engineer	- 57 -
Obr. 34 Fotografie sacího měřiče rezonance zepředu	- 58 -
Obr. 35 Fotografie sacího měřiče rezonance zezadu	- 59 -
Obr. 36 Fotografie sacího měřiče rezonance ze shora	- 60 -
Obr. 37 Fotografie vnitřního prostoru krabičky měřiče rezonance	- 61 -

1. Úvod

Jedním z účelných a všestranných měřicích přístrojů radioamatéra je kromě základního přístroje pro měření napětí a proudu (Avomet) také přístroj pro vysokofrekvenční měření neboli sací měřič rezonance.

Úvod diplomové práce pojednává o samotném měřicím přístroji, historickém vývoji od elektronek k tranzistorům a principu samotného měření. Měřič rezonance byl profesionálně vyráběn např. firmou TESLA. Dnes se již tyto přístroje běžně na našem trhu neobjevují. Získat komerčně vyráběné GDO je v dnešní době možné už jen ze zahraničí či na burzách nebo za pomoci inzerátů.

Předkládaná diplomová práce pojednává o základním rozdělení typů oscilátorů a jejich vlastností. Dále se zmíním o vlastnostech, rozdělení cívek a jejich chování v obvodu. Základními prvky sacího měřiče rezonance neboli GDO jsou vysokofrekvenční oscilátor, detektor a stejnosměrný zesilovač pro měřicí přístroj.

Tato diplomová práce se zabývá kompletním návrhem vzorku jednoduchého sacího měřiče rezonance s větší měřicí cívkou o přibližném průměru 11 cm, která je umístěna vně krabičky. Frekvenční pásmo je přeladitelné elektronicky od 0,6 MHz do 1,1 MHz za pomoci varikapů. Množství odsáté energie z oscilátoru indikuje malé panelové měřidlo. Do krabičky sacího měřiče rezonance se dá velmi lehce zabudovat stavebnice měřiče kmitočtu. Na krabičce je také umístěn konektor BNC pro připojení externího čítače. Sací měřič rezonance obsahuje vlastní napájecí zdroj, který má dvě sekundární vinutí. Jedno sekundární vinutí má 40 V střídavého napětí. Je navrhnuté pro ladění napětí varikapů, které jsou přeladovány od 1 V do 30 V, kde se jejich kapacita v závislosti na napětí mění dle katalogových údajů od 20 pF do 230 pF. Druhé sekundární vinutí má 12 V střídavého napětí. Je navrhnuté pro napájení měřiče rezonance + 12 V. Z tohoto napětí je vytvořeno + 9 V pro případné napájení stavebnice měřiče kmitočtu.

2. Sací měřič rezonance – „GDO“

GDO je zkratkou pro „Grid Dip Oscillator“, přístroj, který se již dlouhou dobu používá jako velmi užitečný pomocník pro mnoho vysokofrekvenčních měření. Název je odvozen od změny proudu v mřížkovém obvodu elektronky zapojené jako oscilátor, což vychází samozřejmě ze zapojení, v němž byly používány elektronky. Další vývoj vedl k zapojení s tranzistory, dnes až do vysokých kmitočtů, takže používat v názvu „Grid“ nemá logické opodstatnění. Z tohoto důvodu se dnes v zahraničních pramenech používá častěji název Dip Oscillator či Dip Meter. U nás se toto pojmenování moc neujalo a tak se používá název měřič rezonance.

Sací měřič rezonance je užitečný přístroj pro zjištění rezonančního kmitočtu laděného obvodu. Jeho výhodou je jednoduchá obsluha, malé rozměry, které jej předurčují k rychlému a pohodlnému měření při zachování dostatečné přesnosti. Měřič oceníme i v případě, nemáme-li osciloskop nebo generátor k dispozici. Komerčně vyráběného GDO je na obr. 1.



Obr. 1 Profesionálně vyráběné GDO

2.1 Co je GDO

Základem sacího měřiče rezonance je oscilátor, který kmitá v požadovaném rozsahu kmitočtů. Cívky oscilátoru jsou konstruovány jako výměnné a umístěny tak, aby se jimi bylo možno těsně přiblížit k cívce rezonančního obvodu, jehož kmitočet chceme změřit. Oscilátor umožňuje změnu kmitočtu napětovým přeladováním kapacitních diod, jeho nastavení a odečtení. Většina těchto přístrojů má sadu výměnných cívek a tak lze v několika rozsazích pokrýt široký rozsah kmitočtů. Přístroj je umístěn v malé krabici, nesoucí vývody pro vnější výměnnou cívku. Úroveň oscilací nejčastěji ukazuje panelové ručkové měřidlo umístěné tak, aby jeho údaj bylo při změně rezonančního kmitočtu možno dobře sledovat. Měřič rezonance umožňuje nastavovat intenzitu oscilačních aktivit, proto lze údaj ručkového měřidla udržovat v optimálním rozmezí v širokém kmitočtovém rozsahu.

Sací měřič rezonance může obsahovat i tlačítko pro vypnutí, kterým lze vypnout oscilace a následně přístroj začne pracovat také jako velmi citlivý absorpční vlnoměr pro měření kmitočtu nějakého signálu. Protože sací měřič rezonance je oscilátorem, můžeme ho rovněž použít jako zdroj signálu pro hledání závad a nastavování přijímačů. S měřičem rezonance lze udělat poměrně mnoho měření, která by jinak vyžadovala velmi drahou sestavu laboratorních přístrojů. Ovšem nevýhodou měřiče rezonance je to, že se nejedná o přesný přístroj. Níže popíšu jak postupovat při měření, aby výsledné chyby byly co nejmenší a naměřený rezonanční kmitočet byl opravdu co nejpřesnější.

2.2 Použití GDO

Umístíme-li cívku sacího měřiče rezonance poblíž testovaného rezonančního obvodu, váže se část energie kmitajícího oscilátoru měřiče rezonance na tento obvod. Tato vazba je nejsilnější, je-li kmitočet měřiče rezonance a rezonanční kmitočet měřeného obvodu shodný. Energie, která je takto přenášena do vnějšího obvodu, je poskytována oscilátorem měřiče rezonance, což způsobuje pokles intenzity jeho oscilací. Protože intenzitu oscilací indukuje analogové panelové měřidlo, pozorujeme pokles jeho výchylky při naladění na rezonanční kmitočet obvodu. Kmitočet oscilací při maximální záporné výchylce měřidla je rezonančním kmitočtem testovaného obvodu. Velkou výhodou tohoto je, že proměřovaný laděný obvod

může být při tomto měření stále připojen v určitém obvodu nebo zapojení, které při zjišťování rezonančního kmitočtu nemusí být v činnosti a není potřeba ho napájet.

Pokud je cívka měřiče rezonance přiložena těsně k cívce měřeného obvodu a rovnoběžné s ní, je právě induktivní vazba nejsilnější. Pak je záporná výchylka ručičky měřidla (tzv. dip) nejzřetelnější. V takovém případě je ale oscilační kmitočet měřiče rezonance nejsilněji ovlivňován „strháván“ přidanými ztrátami ve vnějším měřeném obvodu. Tím vzniká hlavní zdroj chyb při měření pomocí měřiče rezonance. Odečítáme-li pokles údaje měřidla při slabší vazbě s vnějším měřeným obvodem, sníží se tyto chyby na přijatelnou hodnotu.

Jakmile tedy zaregistrujeme, při jakém rezonančním kmitočtu dojde k největšímu zápornému poklesu výchylky ručičky panelového měřidla citlivosti, snížíme vzájemnou vazbu tím, že od sebe oddálíme obě cívky. Takovým zeslabením vazby dosáhneme toho, že již měřený obvod nestrhává příliš silně kmitočet oscilátoru v sacím měřiči rezonance. Rezonanční kmitočet obvodu, při kterém právě dochází k maximální záporné výchylce měřidla citlivosti, můžeme znovu přesněji odečíst na připojeném externím čítači.

3. Oscilátory

Tvoří samostatnou skupinu elektrických obvodů, které nezpracovávají žádný vstupní signál, ale naopak samy jsou zdrojem, generátorem střídavého elektrického signálu od nejnižších do nevyšších frekvencí pro další obvody. Jsou označovány za autonomní obvody, tj. takové obvody, které vytvářejí signál bez vnějšího buzení.

Oscilátory se používají ve všech odvětvích elektrotechniky, od radiotechniky, výpočetní techniky k měřicí technice, atd.

Základem oscilátorů je zesilovač s vhodně vytvořenou zpětnou vazbou (ZV). Podle průběhu časového signálu rozdělujeme oscilátory na:

- harmonické - vytvářejí vysokofrekvenční napětí sinusového průběhu s přesně určenou a stálou frekvencí
- neharmonické - vyrábějí signály nesinusového průběhu (např. pilovité nebo obdélníkové kmitů), jejichž časový průběh je periodický.

3.1 Vlastnosti oscilátorů

a) **Podle tvaru časového průběhu generovaného napětí** se oscilátory rozdělují na:

- Oscilátory harmonických kmitů
- Oscilátory obdélníkových (pravoúhlých) kmitů
- Oscilátory trojúhelníkových kmitů
- Oscilátory kmitů jiného tvaru

b) **Opakovací kmitočet (f_0) doba periody (T)** - přičemž platí

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad (1)$$

c) **Stabilita kmitočtu generovaného napětí**

Tato důležitá vlastnost oscilátoru je číselně určena absolutní hodnotou podílu změny kmitočtu, ke které došlo během určitého časového intervalu a za definovaných provozních podmínek a stabilního kmitočtu.

$$s(\epsilon) = \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \quad (2)$$

d) **Laditelnost**

Je možnost záměrné změny kmitočtu oscilátoru. Podle tohoto zaměření se oscilátory rozdělují na:

- Oscilátory s pevným kmitočtem
- Oscilátory s proměnným kmitočtem

Rozsah kmitočtů, ve kterém lze v daném oscilátoru uskutečnit ladění, se nazývá přeladitelnost.

3.2 Princip činnosti oscilátorů

Každý harmonický (sinusový) oscilátor se skládá ze dvou základních částí:

- **zesilovač** – je realizován aktivním čtyřpólem, z jehož výstupu je přes obvod zpětné vazby přivedeno budící napětí na jeho vstup
- **řídící obvod** – je realizován pasivním čtyřpólem, podle typu oscilátoru obsahuje prvek RC nebo LC a svými vlastnostmi určuje frekvenci generovaného napětí.

Podle vzájemného zapojení těchto dvou základních částí oscilátoru rozlišujeme:

- **zpětnovazební oscilátory**
- **oscilátory bez zpětné vazby**

Nejčastěji se používají zpětnovazební oscilátory.

Obvod se chová jako oscilátor pouze tehdy, je-li splněn vztah mezi napětovým zesílením signálu A_u a napětovým přenosem zpětnovazebního bloku β . Podmínka vzniku kmitů se stanovuje ze vztahu (3) pro výpočet zesilovače s kladnou zpětnou vazbou.

$$A'_u = \frac{A_u}{1 - \beta A_u} \quad (3)$$

Zesílení A_u roste nad všechny meze a ze zesilovače se vlivem kladné zpětné vazby stává oscilátor. Pro jeho kmitání musí být splněny následující dvě podmínky:

- **amplitudová podmínka** - $\beta A_u = 1 \Rightarrow$ přenos zpětnovazební smyčky se rovná jedné (jedná se o kritickou vazbu). Je-li přenos větší než jedna, amplituda kmitů narůstá, je-li menší než jedna, amplituda kmitů klesá. Ve skutečnosti je počáteční A_u větší než jedna. Toho je využito při rozkmitání oscilátoru impulsem po připojení k napájecímu zdroji.

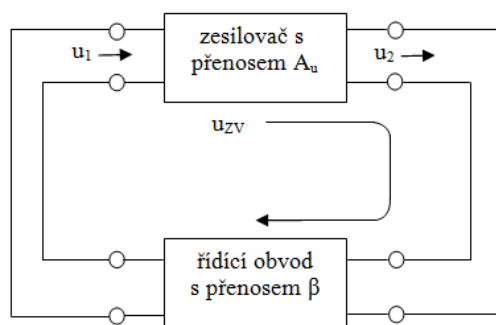
Kmity, jak je uvedeno v [1] však nemohou narůstat až do limitace zesilovače, proto se zesílení musí včas změnit. V nejjednodušších aplikacích se k automatické regulaci amplitudy využívá nelinearity zesilovače (př. zakřivení charakteristiky tranzistoru). Omezení způsobuje zaoblení vrcholů signálu, a tedy jeho nelineární zkreslení. Protože rezonanční obvod (oscilátory LC) má selektivní charakter a vybírá první harmonickou, zůstává zkreslení v přijatelných mezích. U oscilátorů RC je však tento způsob nepoužitelný, protože RC články nemají jakost rezonančního obvodu a neodfiltrují dostatečně vyšší harmonické. V těchto oscilátorech se proto ke stabilizaci amplitudy kmitů využívá zvláštní napětově závislé zpětné vazby. Nejjednodušší aplikaci představují odpory závislé na teplotě. Nejčastěji se do obvodu zapojuje obyčejná žárovka, která je nažhavená asi na třetinu jmenovitého napětí. V tomto režimu je vlákno dostatečně teplé, aby reagovalo na teplotní změny okolí, přičemž změna dynamického odporu žárovky je dostatečně výrazná. Nevýhodou tohoto řešení je však větší spotřeba. Proto se zde zapojují i polovodičové prvky s podobnou voltampérovou charakteristikou, přičemž nejjednodušším řešením jsou dvě antiparalelně zapojené diody.

- **Fázová podmínka** – je vyjádřena rovnicí $\varphi_A + \varphi_B = 2\pi$, kde

φ_A – je fázový posun způsobený tranzistorem

φ_B – je fázový posun zpětnovazebního čtyřpólu

Součet fázových posuvů se musí rovnat 2π nebo násobku 2π , protože to charakterizuje kladnou zpětnou vazbu.

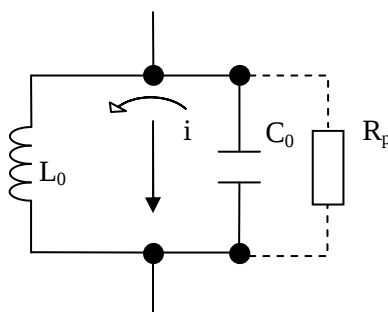


Obr. 2 Blokové zapojení zpětnovazebního oscilátoru

3.3 Vznik netlumených kmitů

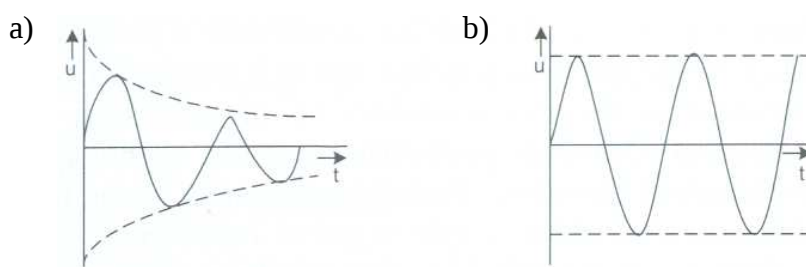
Přivedeme-li do paralelního rezonančního obvodu (obr. 3) složeného z ideální cívky a ideálního kondenzátoru elektrický impuls tak, že indukujeme v cívce proud nebo nabijeme kondenzátor, vzniknou v obvodu elektrické kmity s konstantní amplitudou a frekvencí. Tento obvod by kmital tak dlouho, dokud bychom jeho kmity netlumili. (na ideálních součástkách nevznikají ztráty). Rezonanční frekvence takového obvodu je dána vztahem (4).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (4)$$



Obr. 3 Paralelní rezonanční obvod

Jelikož se však v praxi dle [1] nevyskytují bezetrátové rezonanční obvody, vznikají tak kmity tlumené (obr. 4). Je to proto, že v každém reálném rezonančním obvodu vznikají ztráty, čímž se amplituda kmitů stále zmenšuje, až po určité době kmity zcela zaniknou. Dodáme-li do paralelního obvodu tvořeného reálnou cívkou a reálným kondenzátorem energii z vnějšího zdroje, dochází v něm k periodické výměně energie mezi cívkou a kondenzátorem. Důsledkem toho v obvodu protéká periodicky časově proměnný proud, na jeho svorkách vzniká periodicky proměnné napětí. Obvod tvoří kmitavou soustavu. Přitom v každém cyklu přeměny energie dochází k energetickým ztrátám, vzniklé kmity se tlumí, proud a napětí zanikají, a to tím rychleji, čím menší je ztrátový odpor R_p a činitel jakosti obvodu $Q_0 = R_p / \omega_0 L$. Aby se takový obvod LC stal oscilátorem, musí být zdrojem netlumených kmitů. Napětí a proud v obvodu musí mít konstantní amplitudu, takže činitel jakosti a ztrátový odpor musí být nekonečně velké. Toho se dosáhne tím, že se energetické ztráty LC obvodu nahrazují z vnějšího zdroje.



Obr. 4 Kmity a) tlumené b) netlumené

3.4 Rozdělení oscilátorů

Podle toho, jakého druhu je řídicí obvod, rozdělujeme harmonické oscilátory na:

- oscilátory LC
- oscilátory řízené krystalem
- oscilátory RC

3.4.1 Oscilátory LC

Jedná se o nejpoužívanější oscilátory elektronických zařízení. Skládají se z rezonančního obvodu složeného z cívky L , kondenzátoru C , tranzistoru jako zesilovacího členu a kladné zpětné vazby, pomocí níž vznikají netlumené kmity, které mají konstantní amplitudu a frekvenci určenou rezonančním obvodem. Oscilátory tohoto typu mají nejméně zkreslený průběh výstupního napětí. Je to dáno tím, že rezonanční obvod potlačuje vyšší harmonické složky, a to i tehdy, je-li aktivní prvek nelineární. Kmitočet těchto oscilátorů je určen Thomsonovým vztahem:

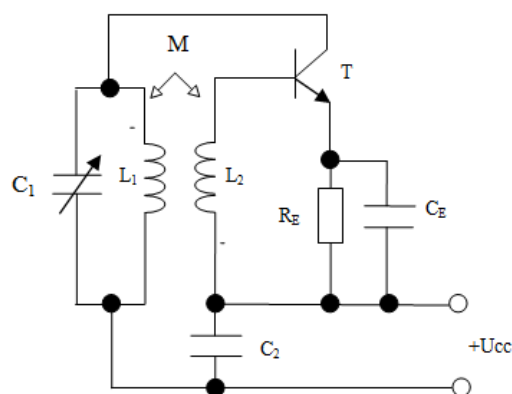
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Podle zapojení rezonančního obvodu rozlišujeme oscilátory LC:

- s indukční vazbou
- třibodové oscilátory

Oscilátory s indukční vazbou

Oscilátory mají kladnou zpětnou vazbu (KZV) vytvořenou indukční vazbou mezi vstupními a výstupními elektrodami tranzistoru (obr. 5). Indukční vazba je tvořena vzájemnou indukčností M cívek L_1 a L_2 . Paralelní rezonanční obvod je zapojen v obvodu kolektoru. Proudovým nárazem se rezonanční obvod L_1C_1 rozkmitá rezonanční frekvencí. Napětí rezonančního obvodu se indukuje na zpětnovazební cívku L_2 , která otáčí fázi o 180° . Zavádí se tak signál kladné vazby do báze. Kladné zpětné vazby se dosáhne tím, že cívky L_1 a L_2 mají opačný směr vinutí. Protože je zesilovač zapojen se společným emitorem, otáčí tak fázi o 180° a tím je splněna fázová podmínka vzniku kmitů. Amplitudová podmínka je zabezpečena tím, že zesílení tranzistoru je větší než útlum ve zpětné vazbě. Výstupní kmitočet je s dostatečnou přesností dán parametry rezonančního obvodu.

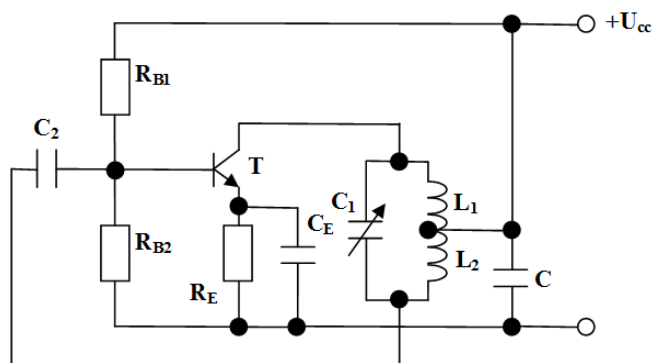


Obr. 5 Indukčně vázaný oscilátor

Tříbodové oscilátory

Označují se tak oscilátory LC, u kterých je rezonanční obvod k zesilovači připojen pomocí třech bodů. To je provedeno tak, že je vytvořena odbočka v cívkách s indukčností L_1 , L_2 a paralelně s nimi je kondenzátor C (Hartleyův oscilátor). Nebo děleným kondenzátorem C_1 , C_2 a paralelně s nimi je cívka L (Colpittsův oscilátor). Toto jsou typické oscilátory pro radiotechnická zařízení a podle uspořádání rezonančních obvodů je označujeme jmény jejich prvních konstruktérů.

a) Hartleyův oscilátor

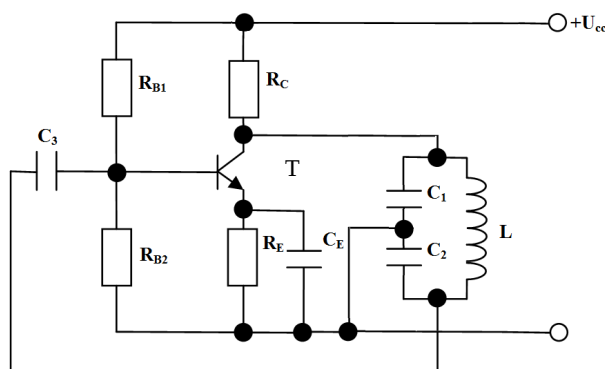


Obr. 6 Hartleyův oscilátor

V tomto oscilátoru pracuje tranzistor v zapojení se společným emitorem (SE). Mezi oběma částmi cívky existuje vzájemná indukčnost (M). Tento oscilátor používá jednu cívku

rezonančního obvodu s odbočkou, která je uspořádána jako autotransformátor. Spodní konec cívky má opačnou fázi signálu. Přes oddělovací kondenzátor C_2 budí bázi zesilovacího členu. Pro přeladování kmitočtu slouží ladící kondenzátor C_1 . Stabilita frekvence je $\varepsilon = 10^{-3}$.

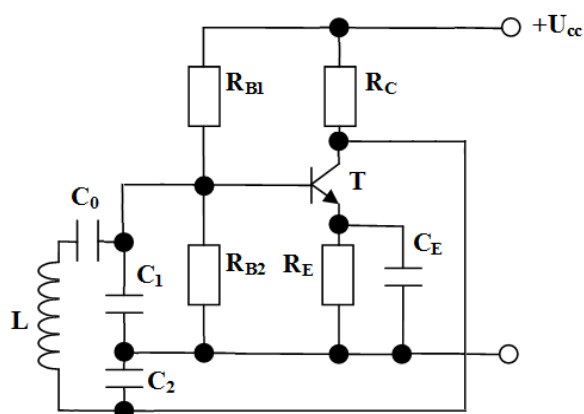
b) Colpittsův oscilátor



Obr. 7 Colpittsův oscilátor

Tranzistor tady pracuje v zapojení se společným emitorem (SE). Tento oscilátor má rezonanční obvod tvořený cívkou L_1 a kondenzátory C_1 a C_2 . Kladná zpětná vazba (KZV) je vyvedena z odbočky kapacitního děliče C_1 , C_2 přes kondenzátor C_3 na bázi tranzistoru. Kapacita sériového zapojení kondenzátoru C_1 a C_2 je současně kapacitou rezonančního obvodu. Pro přeladování kmitočtu se používá ladící cívka L_1 . Stabilita frekvence je $\varepsilon = 10^{-3}$.

c) Clappův oscilátor



Obr. 8 Clappův oscilátor

Tento oscilátor má oproti předchozímu zapojení přidán do rezonančního obvodu kondenzátor C_0 . Při výpočtu rezonanční frekvence se uvažuje sériové zapojení kondenzátorů C_1 , C_2 , a C_0 . Stabilita frekvence u tohoto typu je $\varepsilon = 10^{-5}$.

Oscilátory mají vyrábět harmonické napětí s určitou amplitudou a frekvencí. Amplituda výstupního napětí závisí na velikosti zpětné vazby. Aby oscilátor nepřestal kmitat, respektive aby při malých změnách pracovních podmínek nevypadl z oscilací, je třeba ho uspořádat tak, aby při malých amplitudách výstupního napětí byla zpětná vazba nadkritická, tj. aby platilo $\beta A_u > 1$.

Čím více se však tato hodnota liší od jedné, tím větší amplitudy dosáhne výstupní napětí v ustáleném tvaru. Čím větší je však amplituda výstupního napětí, tím větší je nelineární zkreslení signálu. Zpětnou vazbu je třeba zvolit tak, aby součin βA_u byl velmi blízký jedné. Potom kmity vznikají poměrně snadno a jejich amplituda je dostatečná.

Další vlastností oscilátorů je frekvenční stabilita výstupního napětí. Udává se jako poměr změny frekvence Δf výstupního napětí k základní frekvenci f_0 oscilátoru. Běžné oscilátory LC mají frekvenční stabilitu řádu 10^{-3} .

Velikost stability závisí na mnoha faktorech. Jsou to zejména změny ztrátového odporu ladícího obvodu vlivem změny teploty, mechanické změny v ladícím obvodu, změna vlastností zesilovacího členu či kolísání napájecího napětí stejnosměrného zdroje. Z hlediska stability frekvence je třeba zvolit rezonanční obvod, s co největším činitelem jakosti Q . Také zesilovací člen musí pracovat s co největší efektivní strmostí.

Stabilita frekvence oscilátoru LC se zlepší změnou zapojení a použitím kvalitnějších součástek a zvýšením kvality rezonančního obvodu a případným použitím piezoelektrických rezonátorů.

4. Cívky

Cívky jsou součástky, jejichž podstatou je obvykle vodič navinutý do tvaru spirály. Základní a požadovanou vlastností cívky je vlastní indukčnost L a závisí na počtu závitů, jejich geometrickém uspořádání a na magnetických vlastnostech prostředí, které cívky obklopuje.

Ideální cívka má nezávisle na pracovních podmínkách a parametrech okolního prostředí posouvat napětí o $\pi/2$ před proudem při procházejícím střídavém proudě. Díky různorodým a těžko sjednotitelným požadavkům, na rozdíl od rezistorů a kondenzátorů, nejsou cívky všeobecně standardizovány a nejsou tedy ve velkém vyráběny. Standardizovány a hromadně vyráběny jsou pouze díly vhodné pro konstrukci běžných cívek, jako např. jádra, kostřičky, kryty. Výjimku tvoří pouze odrušovací a vysokofrekvenční oddělovací tlumivky, která jsou mnoha výrobci dodávány.

V elektronických zařízeních je používáno mnoho druhů cívek, které se vzájemně od sebe liší jak parametry, tak i svoji obvodovou funkcí. Z konstrukčního hlediska jsou cívky tvořeny vodičem, který je tvarově upravený tak, aby vzájemná indukčnost jednotlivých úseků byla co největší. Magnetické pole vznikající kolem vodiče, protéká-li jím proud, volně prochází prostorem kolem vodiče. Případně je cívka opatřena magnetickým obvodem z feromagnetického materiálu, ve kterém se magnetické pole soustřeďuje.

Vlastnosti cívek, které do značné míry nezávisí na jejich konstrukci, lze popsat následujícími parametry:

- velikost indukčnosti cívky
- činitel jakosti cívky
- teplotní závislost indukčnosti cívky
- proudová a napěťová závislost indukčnosti
- maximální výkon cívky
- maximální provozní proud cívky
- maximální provozní napětí cívky
- stárnutí cívky

4.1 Provedení cívek

Cívky bez jádra se konstruují pro indukčnosti v řádech mikrohenry, výjimečně jednotek milihenry. Jsou využívány v obvodech s kmitočtem až několik set megahertzů nebo v obvodech nízkofrekvenčních, kdy záleží na tom, aby se při změně proudu procházejícího vinutím měnila indukčnost (obr. 9).

Vinou se na izolační kostry, nebo při použití tlustšího drátu mohou být provedeny jako samonosné. Vinutí je buď jednovrstvé, nebo při větší indukčnosti několikavrstvé.

Speciální skupinu cívek bez jádra tvoří tzv. plošné cívky, které jsou vytvořeny vyleptáním do plošných spojů ve tvaru závitů. Indukčnost těchto cívek zpravidla nepřesahuje 10 μH a užívají se pro kmitočty několika desítek až stovek megahertzů.



Obr. 9 Cívka bez jádra

Cívky s jádrem. Podle druhu použitého jádra dosahuje maximální indukčnost těchto cívek několika desítek až stovek milihenry (pro vysokofrekvenční obvody) nebo několika desítek henry (nízkofrekvenční tlumivky). Jádra jsou vyráběna z magneticky značně vodivých materiálů s malými hysterezními ztrátami. Elektrická vodivost jader musí být naopak co nejmenší, aby ztráty vznikající v jádře průchodem vířivých proudů byly minimální.

Vysokofrekvenční cívky s jádrem. Pro cívky s indukností do několika set mikrohenry se používají jádra šroubová. Jádro má tvar šroubu s velmi jemným závitem. Šroubováním ho lze zasouvat do prostoru cívky a tím se mění její indukčnost. Cívky s větší indukností využívají jader hrníčkových, která jsou složena ze dvou stejných částí miskového tvaru. Jádro po jeho složení obklopuje cívku a tak rozptyl magnetického toku do okolí jádra je velmi malý. Cívka, která je navinutá na izolační kostřičce je nasunuta na středním sloupku jádra a obě části sloupku nedosahují při styku vnějších částí jádra těsně k sobě, protože sloupek je přerušen

vzduchovou mezerou. Tuto vzduchovou mezeru lze překlenout ladicím šroubovým jádrem, jehož polohou lze v malém rozsahu měnit indukčnost.

Nízkofrekvenční tlumivky mají jádra tvořena magnetickým obvodem, který je navinut z ortopermového pásku o tloušťce 0,32 mm označený žlutou barvou a vhodný pro síťový kmitočet 50 Hz nebo tloušťky 0,13 mm, označený zeleně pro kmitočty akustického pásma. Průchod vířivých proudů jádrem je zmenšen pomocí jednotlivých závitů pásku, které jsou od sebe izolovány. Aby bylo možné na magnetický obvod nasunout cívku navinutou na izolační kostře, je jádro uprostřed rozříznuto do dvou částí tvaru C.

Většinou nízkofrekvenčních tlumivek současně prochází stejnosměrný i střídavý proud (např. filtrační tlumivky v napájecích zdrojích). U nich je potřeba zajistit, aby magnetické pole vznikající v důsledku průchodu stejnosměrného proudu, tzv. stejnosměrná předmagnetizace, nemohla posunout pracovní bod magnetického materiálu jádra až do oblasti jeho magnetického nasycení. Tomuto stavu se zabráňuje přerušením magnetického obvodu vzduchovou mezerou, nebo oddělením obou částí jádra izolačním materiálem.



Obr. 10 Tlumivka

4.2 Rozdělení cívek

Cívky se dělí dle následujících kritérií:

a) *podle použití*

- cívky pro ladící okruhy a filtry
- tlumivky síťové, nízkofrekvenční nebo vysokofrekvenční

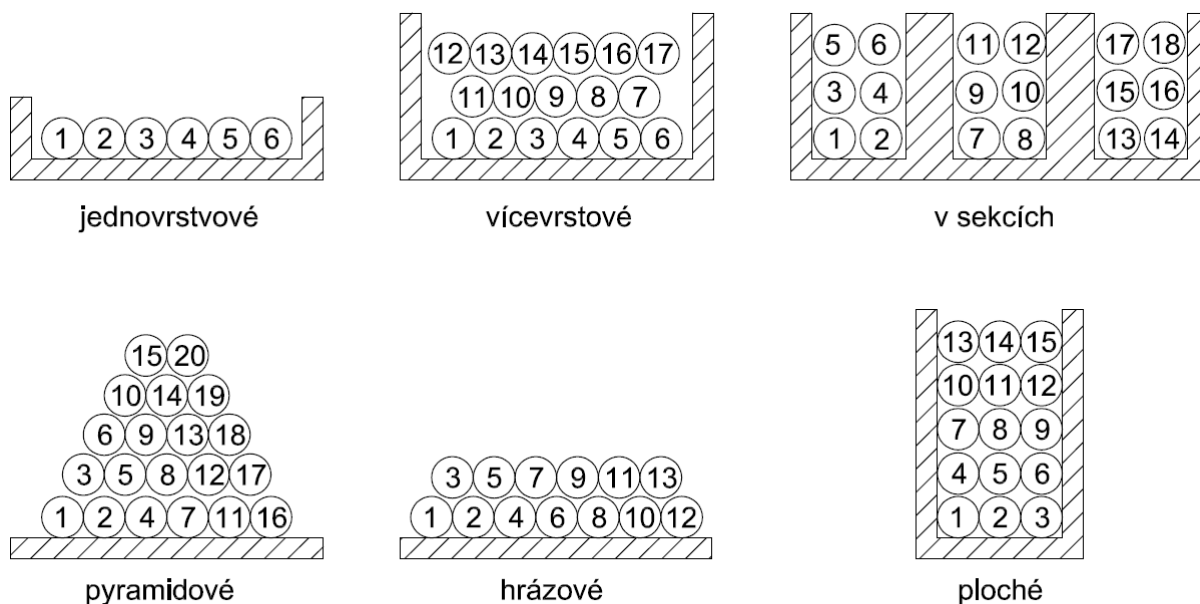
b) *podle velikosti magnetické permeability jádra:*

- vzduchové cívky

- cívky s magnetickým obvodem
- s otevřeným magnetickým obvodem
- s uzavřeným magnetickým obvodem

c) podle druhů vinutí:

- cívky s vrstevným vinutím
- cívky s hrázovým nebo pyramidovým vinutím
- cívky s vinutím v sekcích
- podle pracovního kmitočtu: nízkofrekvenční
vysokofrekvenční

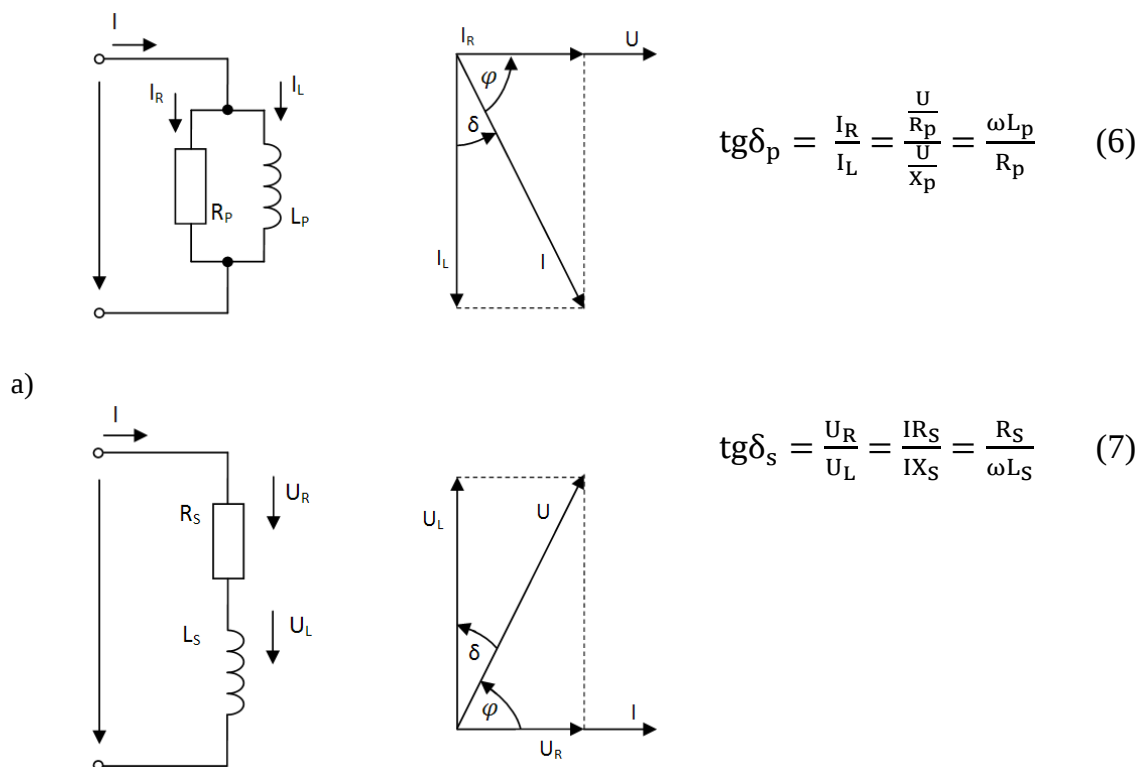


Obr. 11 Druhy vinutí cívek

4.3 Ztrátový úhel cívky

Skutečná cívka se nechová v obvodu střídavého proudu jako ideální indukčnost, která posouvá fázor napětí o 90° před fázor proudu. Vlivem ztrát vznikajících v cívce je výsledný fázový posun napětí proti proudu menší o úhel δ , který se nazývá *ztrátový úhel cívky*. Pro

vyjádření ztrát se v sériovém obvodu přiřazuje k ideální cívce ztrátový odpor R_s a v paralelním obvodu R_p (obr. 12).



Obr. 12 Náhradní schéma cívky a její fázorové diagramy
a) v paralelním zapojení b) v sériovém zapojení

Oba dva náhradní obvody jsou elektricky rovnocenné za předpokladu, že $R_p \gg R_s$. Převrácená hodnota ztrátového činitele se nazývá *činitel jakosti*, který je označován písmenem Q .

Pro sériový náhradní obvod je dán vztahem:

$$Q_s = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad (8)$$

Pro paralelní náhradní obvod vztahem:

$$Q_p = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{R_p}{\omega L_p} \quad (9)$$

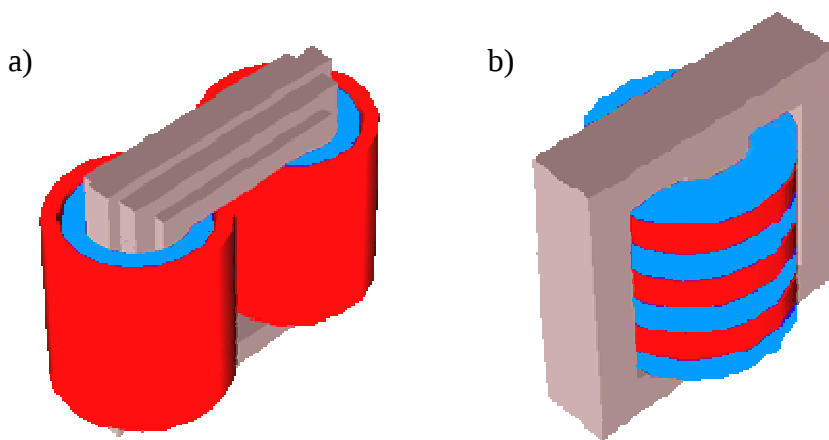
4.4 Transformátory

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který umožňuje přenášet elektrickou energii z jednoho obvodu do jiného pomocí vzájemné elektromagnetické indukce. Používá se většinou pro přeměnu střídavého napětí nebo pro galvanické oddělení obvodů (obr. 13).

Transformátory se skládají z uzavřeného magneticky velmi dobře vodivého jádra, na kterém je cívka se dvěma či více vinutími. Vstupní vinutí se nazývá primární a výstupní vinutí sekundární. Primární vinutí slouží k převodu elektrické energie na magnetickou energii. Procházejícím proudem se vytváří magnetický tok Φ a tento tok je veden magnetickým obvodem (jádrem) k sekundární cívce, kde se podle principu Faradayova indukčního zákona indukuje střídavé elektrické napětí a po připojení zátěže jím protéká elektrický proud. Účelem magnetického obvodu většiny transformátorů je zajistit, aby co nejvíce magnetických siločar procházelo zároveň primární a sekundární cívkou.

Podstatnou částí transformátoru je magnetický obvod, tj. jeho aktivní část, která vede magnetický tok. Na magnetickém obvodu rozlišujeme jádra, na kterých je umístěno vinutí. Magnetický obvod je složen z elektrotechnických plechů. Podle konstrukce magnetického obvodu rozeznáváme transformátory:

- jádrové – cívky vstupního a výstupního vinutí rovnoměrně rozdělené na všechny jádra - vinutí obklopuje plechy
- plášťové – cívky na vnitřních jádrech a jsou z obou stran obklopené magnetickým obvodem – plechy obklopují vinutí

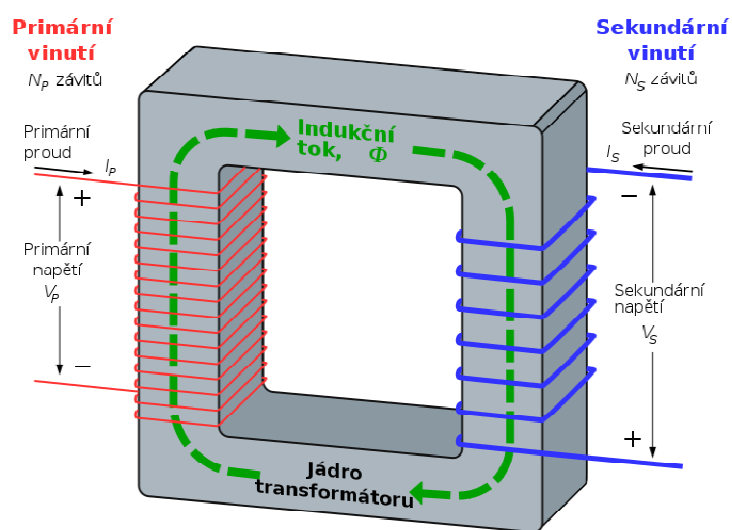


Obr. 13 Jednofázové transformátory a) jádrový, b) jádroplášťový

Transformační poměr:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (10)$$

kde U_1 je napětí na primární cívce, I_1 je proud primární cívkou, N_1 je počet závitů primární cívky. Indexem „2“ jsou značeny veličiny sekundární cívky.



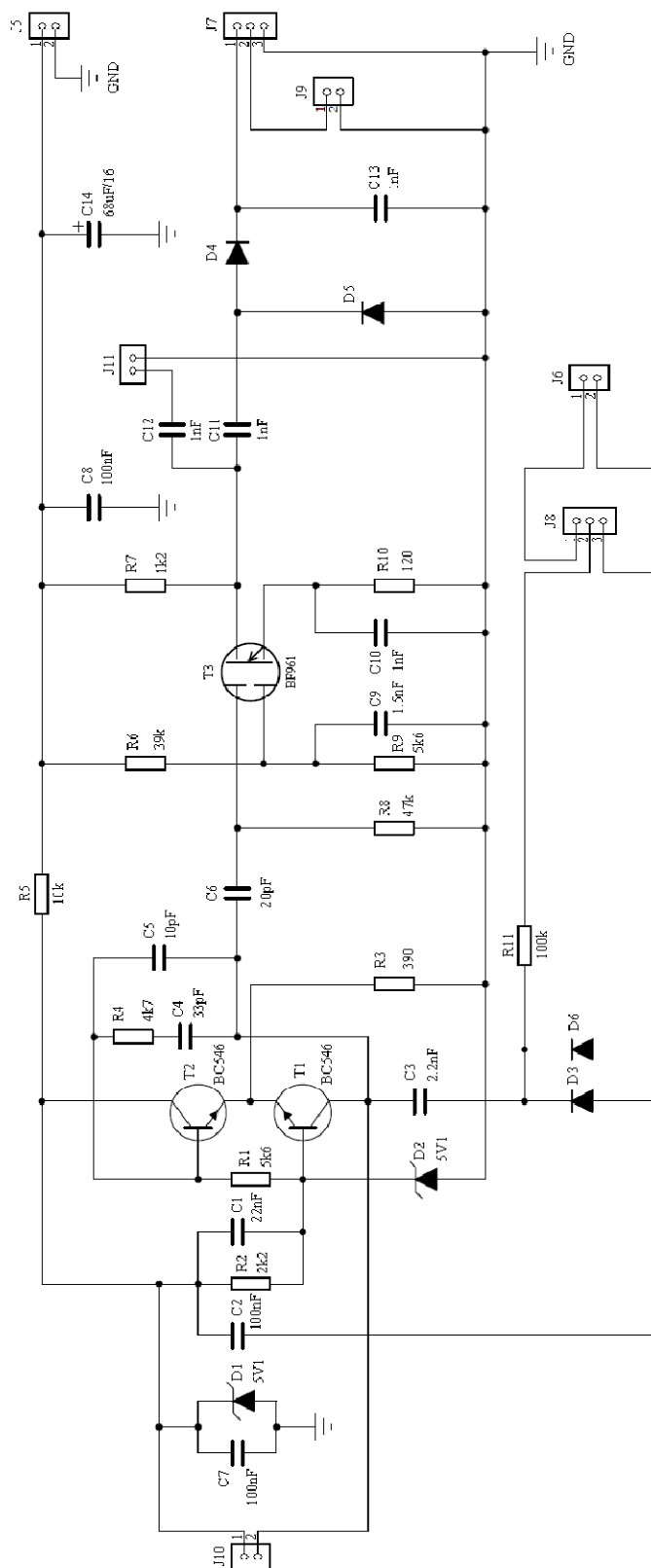
Obr. 14 Základní princip transformátoru

Vzájemnou vazbu měřicí a měřené cívky sacího měřiče rezonance lze vzdáleně považovat za transformátor se slabou vazbou.

5. Popis, schéma a DPS návrhu zapojení měřiče rezonance

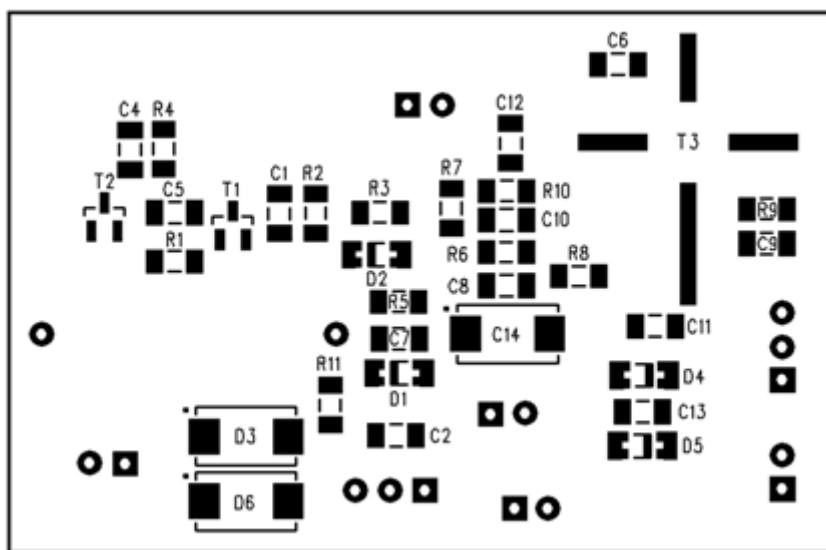
Schéma zapojení sacího měřiče rezonance je na obr. 15. Na SPOX konektor J10 se připojí měřicí cívka, která je umístěna mimo krabičku měřiče rezonance. Kondenzátor C7 je použit z důvodu galvanického oddělení napětí. Samotný oscilátor je složený ze dvou SMD tranzistoru BC546 označeny jako T1 a T2. Oscilátor je zapojený jako dvojstupňový tranzistorový zesilovač v zapojení se společným kolektorem (SK) a společnou bází (SB). Stupeň se společným kolektorem má vysokou vstupní impedanci, tj. můžeme ho připojit přímo na rezonanční obvod bez značného poklesu činitele jakosti Q obvodu. Stupeň se společnou bází má vysokou výstupní impedanci, tj. malou výstupní kapacitu a malý zpětnovazební přenos. Tyto vlastnosti umožňují použít stejné základní zapojení pro funkci oscilátoru, až do frekvence 100 MHz. Tento oscilátor je daleko lepší než Colpitts či Hartley a je schopný kmitat se špatným poměrem LC. Stupeň společný kolektor (SK) tvoří tranzistor T1 a stupeň společná báze (SB) tvoří tranzistor T2. T1 je aktivní a T2 spolu s rezistorem R4 a kondenzátory C4, C5 vytvářejí kladnou zpětnou vazbu. V měřiči rezonance jsou použity dva varikapy KB 113 s kapacitou 20 – 250 pF označeny ve schématu jako D3 a D6. V sérii s nimi je zapojený kondenzátor C3 typu styroflex, který je velice stabilní a díky němu neujíždí kmitočet vlivem okolí. Napájení oscilátoru je omezeno pomocí dvou 5 V zenerových diod D1 a D2, která plní funkci stabilizace pracovního bodu tranzistoru T2. Z kolektorového výstupu tranzistoru T1 odebíráme napětí přes kondenzátor C6 s velikostí kapacity 20 pF. Následuje dvou-bázový MOSFET (Double-Gate MOSFET) tranzistor T3, který je použit jako zesilovač s vysokou vstupní impedancí spolu s velkým zesílením a tím nezatěžuje rezonanční obvod. Tranzistor T3 je řízený napětím na gate jedna. Na druhém gate se pomocí rezistorů R6 a R9 nastaví pracovní bod tranzistoru, čili jeho největší zesílení. Rezistor R7 slouží k napájení tranzistoru T3. Dvou-bázový tranzistor je použit hlavně z důvodu minimální spotřeby proudu a snadného nastavení pracovního bodu samotného tranzistoru, který je zapojen dle doporučení katalogu. Na výstupu tranzistoru T3 je přes kondenzátor C12 zapojený SPOX konektor J11 jako výstup pro připojení čítače. Následuje zdvojovač napětí složený z diod D4, D5 a filtrační kondenzátor C13, aby panelové analogové měřidlo mělo souvislou informaci o velikosti napětí a pro zobrazení „dipu“. Pomocí lineárního potenciometru citlivosti P1, který se připojí na SPOX konektor J7, nastavíme rozsah na panelovém měřidle připojený na SPOX konektor J9 tak, abychom se nepohybovali mimo stupnici. SPOX konektor J5 je pro připojení

napájecího napětí 12 V ze zdroje. Na SPOX konektor J6 je ze zdroje sacího měřiče rezonance přivedeno ladící napětí 0 – 30 V pro varikapy. Pomocí logaritmického potenciometru P2, který se připojí na SPOX konektor J8, měníme na varikapech napětí, čímž dochází ke změně jejich kapacity. Následně dochází ke změně podmínek v rezonančním obvodu, které se projeví změnou rezonančního kmitočtu. Při sladění kmitočtů měřiče rezonance a měřeného obvodu dojde k poklesu neboli k „dipu“ na panelovém měřidle. Tento pokles je velmi citlivý a rychlý. Z tohoto důvodu se i v profesionálních GDO přístrojích používají analogová měřidla (obr. 1).

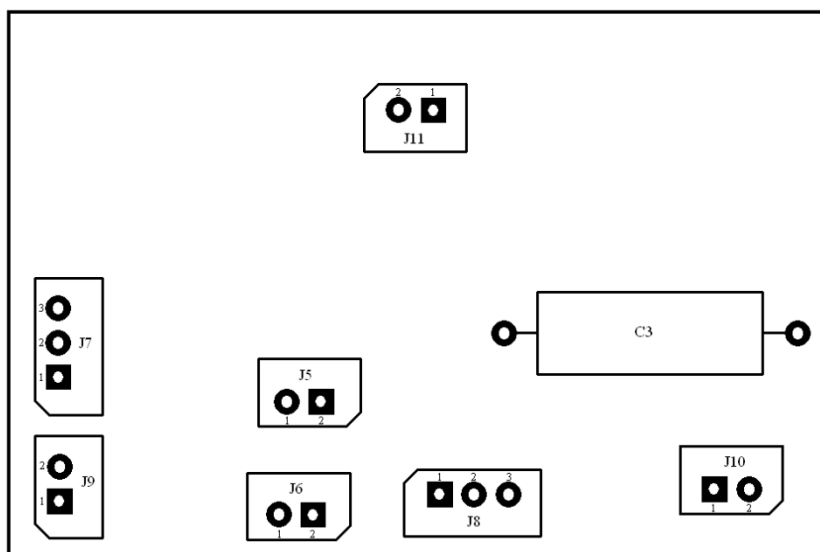


Obr. 15 Schéma zapojení měřiče rezonance

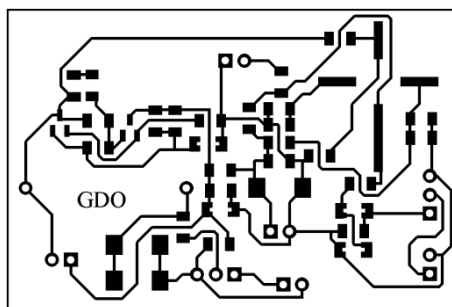
Sací měřič rezonance je vyrobený na jednostranné desce plošných spojů a kompletně osazený SMD součástkami. Obrázek 16 je zvětšeny z důvodu větší přehlednosti rozmístění SMD součástek na desce plošného spoje z pohledu BOTTOM. Na obrázku 17 je rozmístění součástek z pohledu TOP. Obrázek 18 ukazuje DPS sacího měřiče rezonance z pohledu BOTTOM. Velikost DPS je 1:1, která činí 60 mm x 40 mm. Fotografie osazených DPS sacího měřiče rezonance jsou na obrázku 19 z pohledu BOTTOM a na obrázku 20 z pohledu TOP. Jejich velikost je dvakrát větší než ve skutečnosti.



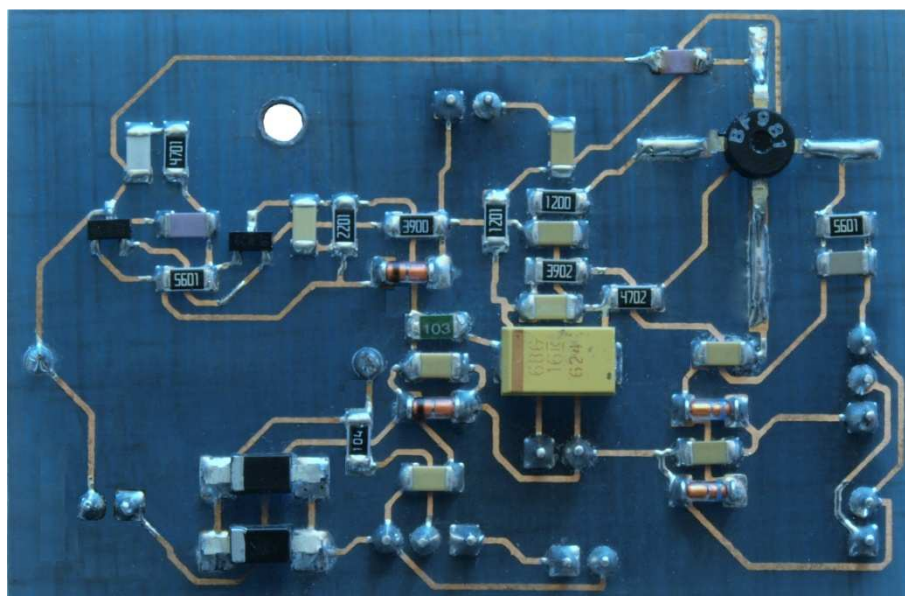
Obr. 16 Rozmístění součástek na DPS sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM



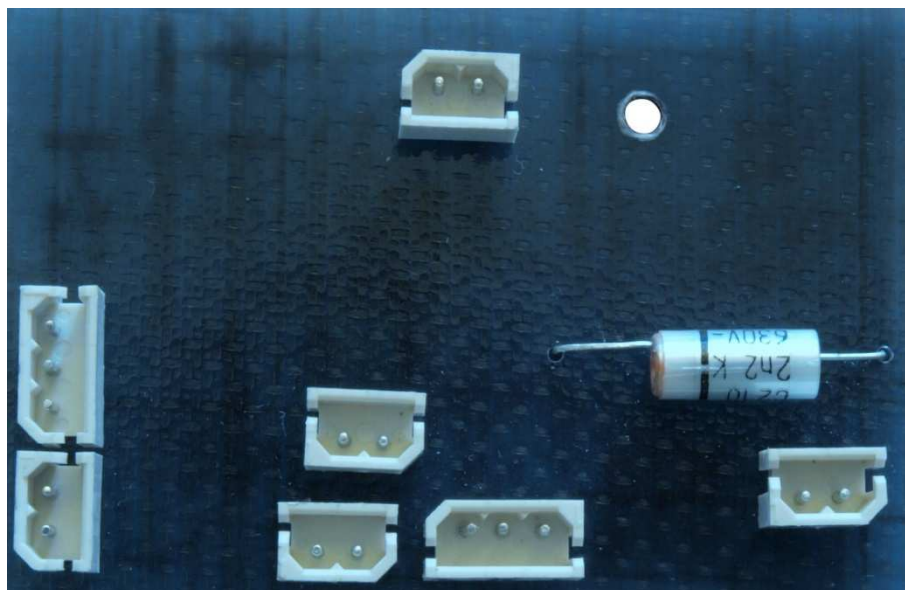
Obr. 17 Rozmístění součástek na DPS sacího měřiče rezonance. Pohled TOP



Obr. 18 DPS sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM



Obr. 19 Fotografie osazené DPS sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM



Obr. 20 Fotografie osazené DPS sacího měřiče rezonance. Pohled TOP

6. Síťový zdroj

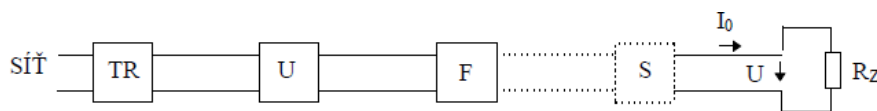
Síťový zdroj umožňuje využití rozvodné sítě (230 V/50 Hz) pro napájení uvažovaných zařízení. Protože napájená zařízení potřebují ke svému provozu určitá stejnosměrná napětí při určitém odběru, musejí síťové zdroje umožňovat zmenšení či zvětšení střídavého napětí a jeho přeměnu na napětí stejnosměrné, které nesmí vykazovat v ideálním případě žádné zvlnění, tj. nesmí obsahovat žádnou zbytkovou střídavou složku napětí. Dobrý síťový napájecí zdroj se má chovat jako ideální zdroj napětí. Tedy jeho napětí se při změnách zatěžovacího proudu nesmí měnit, tj. zdroj má mít co nejmenší výstupní (vnitřní) odpor

$$R_{VYST} = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} \quad (11)$$

při co nejmenším zvlnění

$$\varphi_z = \frac{\Delta U}{U_0} \quad (12)$$

Napájecí zdroj má síťový transformátor TR (obr. 21), který upravuje dle [5] velikost střídavého napětí na potřebnou hodnotu, usměrňovač U s kapacitním nebo induktivním výstupem, který vytvoří ze střídavého napětí pulsující stejnosměrné napětí a vyhlazovací filtr F, jenž potlačí zvlnění výstupního stejnosměrného napětí zdroje. Pokud jsou na neměnnost a zvlnění výstupního napětí kladeny vyšší požadavky, bývá za vyhlazovací filtr zařazen stabilizátor stejnosměrného napětí S (každý stabilizátor funguje zároveň jako vyhlazovací filtr, proto je v některých zapojeních, využívajících stabilizátoru S, vyhlazovací filtr F vynechán).



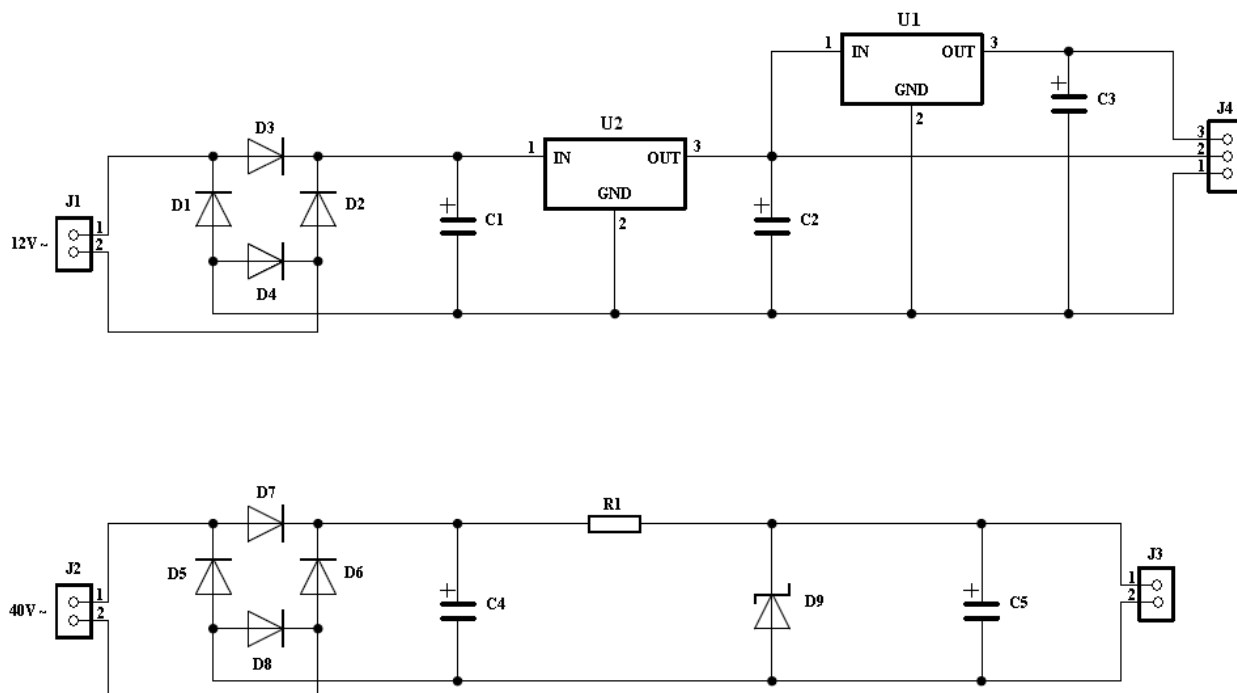
Obr. 21 Blokové uspořádání napájecího zdroje

Síťový transformátor umožňuje úpravu velikosti střídavého napětí při galvanickém oddělení od rozvodné sítě, jak je uvedeno v [5]. Transformátor má jedno primární a jedno či více sekundárních vinutí. Rozměry magnetického obvodu transformátoru volíme pro zvolenou hodnotu magnetické indukce podle přenášeného výkonu při uvažování účinnosti, která bývá u miniaturních transformátorů relativně malá (60 %), se zvětšující se velikostí účinnost roste. (např. při $P = 100 \text{ W}$ bývá 80 až 90 %, u silových transformátorů až 99 %).

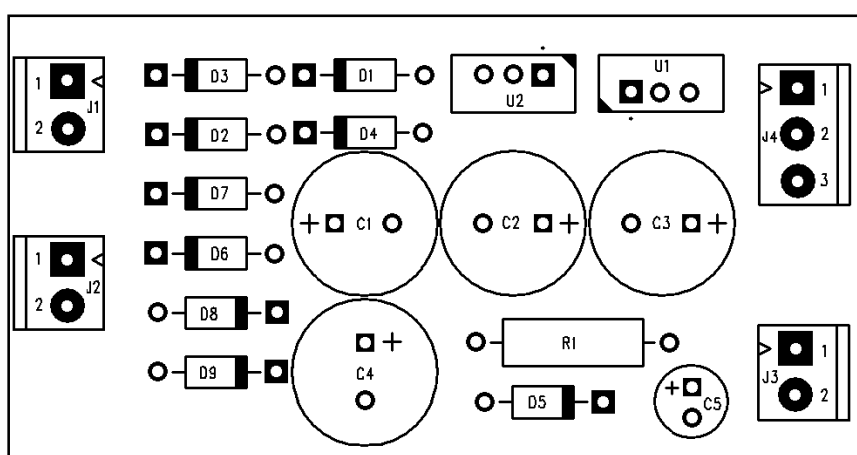
Síťový transformátor pro napájení sacího měřiče rezonance je navinutý na kostřičce, kde je primární část oddělená od dvojice sekundárního vinutí, která jsou zároveň mezi sebou odizolována fólií. Síťový transformátor je vyroben z EI plechů. Primární vinutí transformátoru obsahuje 2860 závitů průměrem drátu 0,1 mm. Sekundární vinutí pro napětí 40 V střídavého má 250 závitů průměrem drátu 0,3 mm a pro druhé sekundární vinutí 12 V střídavých je navinuto 156 závitů stejným průměrem drátu, tedy 0,3 mm.

Sekundární vinutí 40 V střídavých je přivedeno na MTA konektor J2, za kterým je z diod D5 až D8 sestaven usměrňovací můstek (obr. 22). Následuje elektrolytický filtrační kondenzátor C4. Za rezistorem R1 je umístěna 33 V Zenerova dioda D9, která výstupní stejnosměrné napětí stabilizuje. Toto napětí je přivedeno na MTA konektor J3, pin 1. Tímto napětím je napájena dvojice kapacitních diod D3 a D6, které v závislosti na tomto napětí mění svoji velikost kapacity. Druhé sekundární vinutí má 12 V střídavých a je přivedeno na MTA konektor J1, za kterým je z diod D1 až D4 sestaven usměrňovací můstek. Následuje elektrolytický filtrační kondenzátor C1, za kterým se nachází stabilizátor L7812 označený jako U2 a filtrační kondenzátor C2. Stabilizované napětí je přivedeno na MTA konektor J4, pin 2 a slouží pro napájení sacího měřiče rezonance. Z dvanácti voltového výstupu je na stejnosměrné napětí paralelně připojen druhý stabilizátor L7809 označený ve schématu jako U1, na jehož výstupu je filtrační kondenzátor C3 a výsledné devíti-voltové napětí je přivedeno na MTA konektor J4, pin 3. S tímto napětím je dopředu počítáno, aby se do krabičky sacího měřiče rezonance dalo velmi lehce doplnit interní digitální měřič frekvence.

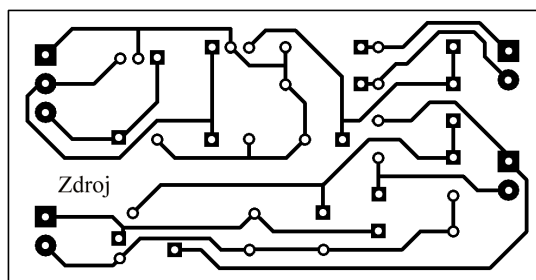
Schéma zapojení zdroje sacího měřiče rezonance je na obrázku 22. Obrázek 23 je zvětšen z důvodu větší přehlednosti rozmístění součástek na desce plošného spoje. Na obrázku 24 je deska plošného spoje z pohledu BOTTOM zdroje měřiče rezonance a velikost DPS je 1:1, která činí 70 mm x 35 mm. Fotografie osazené DPS zdroje je na obrázku 25.



Obr. 22 Schéma zapojení zdroje sacího měřiče rezonance



Obr. 23 Rozmístění součástek na DPS zdroje sacího měřiče rezonance. Pohled TOP



Obr. 24 DPS zdroje sacího měřiče rezonance. Pohled BOTTOM



Obr. 25 Fotografie osazené DPS zdroje měřiče rezonance

7. Výpočet rezonančního obvodu

Základem sacího měřiče rezonance je paralelní rezonanční obvod složený z cívky o indukčnosti L a varikapů o kapacitě C . Varikapy jsou proměnné kapacity, pomocí nichž můžeme měnit rezonanční kmitočet v širokých mezích v závislosti na velikosti kapacity. Rezananční kmitočet je dán Thomsonovým vzorcem:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz, Hz, F]} \quad (13)$$

Pro výpočet rezonančního obvodu složeného z kapacitní diody – varikap – o minimální kapacitě 20 pF, maximální kapacitě 200 pF a známé frekvenci vypočítáme přibližnou indukčnost cívky L .

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{C} \quad (14)$$

Příklad výpočtu:

$C = 20 \text{ pF}$, $f = 1,5 \text{ MHz}$:

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot (1,5 \cdot 10^6)}\right)^2}{20 \cdot 10^{-12}} = 563 \text{ } \mu\text{H} \quad (15)$$

$C = 200 \text{ pF}$, $f = 500 \text{ kHz}$:

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot (0,5 \cdot 10^6)}\right)^2}{2 \cdot 10^{-10}} = 507 \text{ } \mu\text{H} \quad (16)$$

Z toho plyne, že pro přeladění požadovaného frekvenčního pásma 500 kHz až 1,5 MHz je zapotřebí cívka o indukčnosti okolo 550 μH . Přesný rozsah kmitočtů můžeme ověřit pomocí Thomsonova vzorce.

Několika výpočty určíme indukčnost cívky L tak, aby rozsah kmitočtů byl plynulý aspoň od 480 kHz do 1,5 MHz. Indukčnost cívky by měla být přibližně 550 μH .

Pro maximální frekvenci:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(550 \cdot 10^{-6}) \cdot (20 \cdot 10^{-12})}} = 1,51 \text{ MHz} \quad (17)$$

Pro minimální frekvenci:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(550 \cdot 10^{-6}) \cdot (200 \cdot 10^{-12})}} = 480 \text{ kHz} \quad (18)$$

8. Výroba cívky a její měření

Vlastní konstrukce cívky L1 o průměru 11 cm obsahuje 16 závitů, které jsou navinuté lakovaným drátem o průměru 0,375 mm. S touto vyrobenou cívkou zapojenou v sacím měřiči rezonance se dosahuje frekvenčního přeladění v pásmu od 617 kHz do 1,06 MHz. Měřená frekvence se odečítala na externě připojeném čítači. Z vlastní zvědavosti jsem si vyrobil menší cívku L3 o průměru 4 cm, která pro frekvenční pásmo 655 kHz až 1,17 MHz obsahuje stejným průměrem lakovaného drátu 26 závitů. Po konzultaci výsledků byla vyrobena cívka L2, která svým průměrem 7 cm spadá mezi velkou a malou cívku. Její frekvence je od 635 kHz do 1,12 MHz a obsahuje 20 závitů lakovaným drátem. Všechny parametry jsou zapsány v tabulce 1. Vlastnoručně vyrobené cívky jsou „zalité“ v troliturovém laku, který je nejkvalitnější impregnační pro vysokofrekvenční obvody.

První způsob měření množství odsáté energie je zobrazený na ilustrativním obrázku 29. Tyto modely jsou kresleny ve 3D modelovacím programu Pro/Engineer. Měřený obvod je umístěn ve středu měřicí cívky. Při minimální vzdálenosti mezi oběma cívkami bylo množství odsáté energie po sladění jejich frekvencí na stupnici přibližně 8 %. Což není pomalu dobře patrné. Samotné měření bylo velmi citlivé na ladění rezonanční frekvence. Strhávání kmitočtu v tomto měření vůbec nebylo. Měření vzdálenosti, ze které je možné odsát energii bylo provedeno ve dvou krocích. Nejprve se cívka sacího měřiče rezonance přibližovala k měřenému rezonančnímu obvodu na takovou vzdálenost, kde již došlo k prvnímu poklesu výchylky panelového měřidla. Vzdálenost se zmenšovala až na minimum. Ve druhém kroku se měřicí cívka oddalovala od měřeného obvodu. Vzdálenost a pokles intenzity není u této cívky příliš velký. V přiloženém grafu je její chování naznačeno zelenou barvou. Stejnému principu měření byly vystaveny zbývající dvě cívky L2, L3. Při měření cívky L3 bylo strhávání kmitočtů nejvíce ovlivněno a s touto cívkou bylo množství odsáté energie největší. Z naměřených výsledků je přehledně vypracovaná tabulka 2. Velmi pěkně jsou naměřené hodnoty patrné z vytvořeného grafu (obr. 26). Samotné měření probíhalo za ideálních podmínek na pracovním stole.

Druhý způsob měření je zobrazený na ilustrativním obrázku 30 a 31. Měřený obvod je umístěn uprostřed měřicí cívky a otáčí se kolem své osy. Z výchozí vodorovné pozice 0° do 180° a následně až do 360°. Naměřené hodnoty jednotlivých cívek jsou zapsány v tabulce 3 a velmi pěkně patrné z vytvořeného grafu (obr. 27). Měření závislosti citlivosti na úhlu je

velmi orientační. Ke strmému poklesu intenzity dochází okolo 30°- 40°. Samotné měření probíhalo za ideálních podmínek na pracovním stole.

Těmto způsobům měření byly podrobeny všechny tři vlastnoručně vyrobené cívky a jednotlivé výsledky jsou zapsané v tabulkách a dobře patrné z příložených grafů. U měření nejmenší cívky L3 o průměru 4 cm docházelo při sladění rezonanční frekvence ke strhávání. Z tohoto důvodu se cívka po sladění oddálila a znovu se přesněji určil největší pokles intenzity.

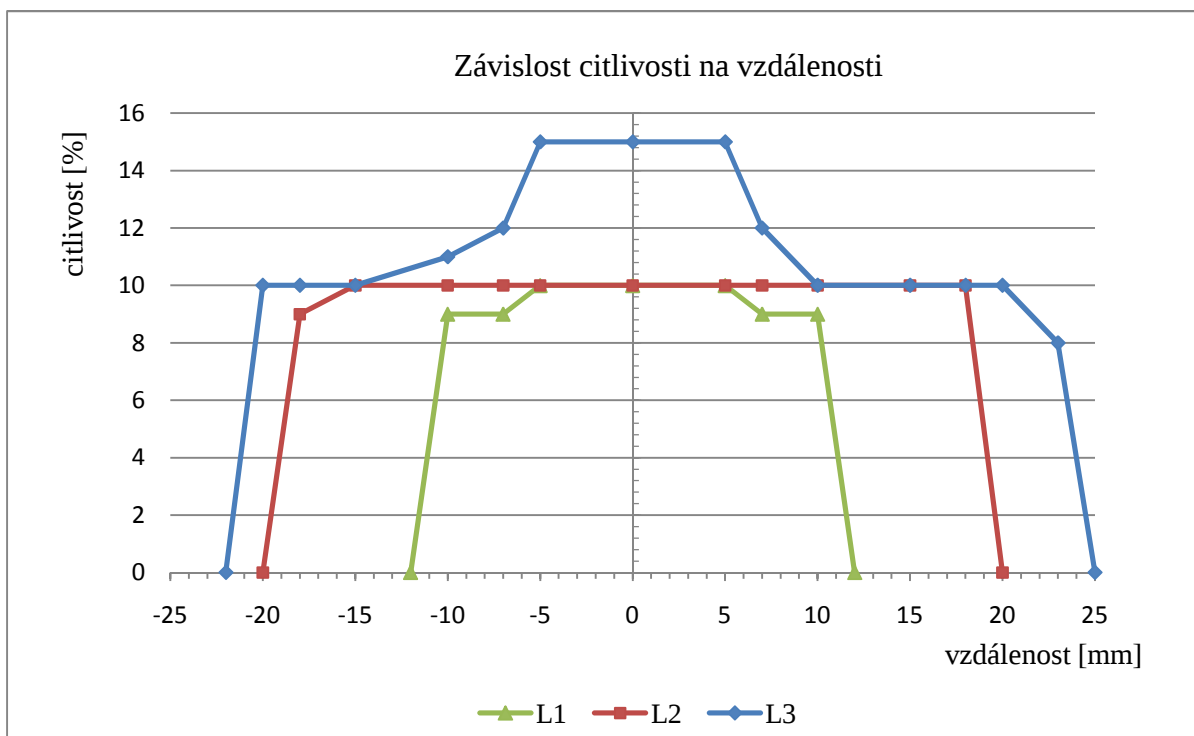
Tabulka 1: Parametry a označení cívek

označení cívky	počet závitů	průměr cívky [cm]	minimální frekvence [kHz]	maximální frekvence [MHz]
L1	16	11	617	1,06
L2	20	7	655	1,17
L3	26	4	635	1,12

Tabulka 2: Naměřené parametry jednotlivých cívek

vzdálenost [mm]	velikost poklesu intenzity [%]		
	L1	L2	L3
-22	0	0	0
-20	0	0	10
-18	0	9	10
-15	0	10	10
-10	9	10	11
-7	9	10	11
-5	10	10	15
0	10	10	15
5	10	10	15
7	9	10	12
10	9	10	10
15	0	10	10
18	0	10	10
20	0	0	10
23	0	0	8
25	0	0	0

Záporná část stupnice vzdálenosti představuje přibližování k měřené cívce. Kladná část její opětovné oddálení.

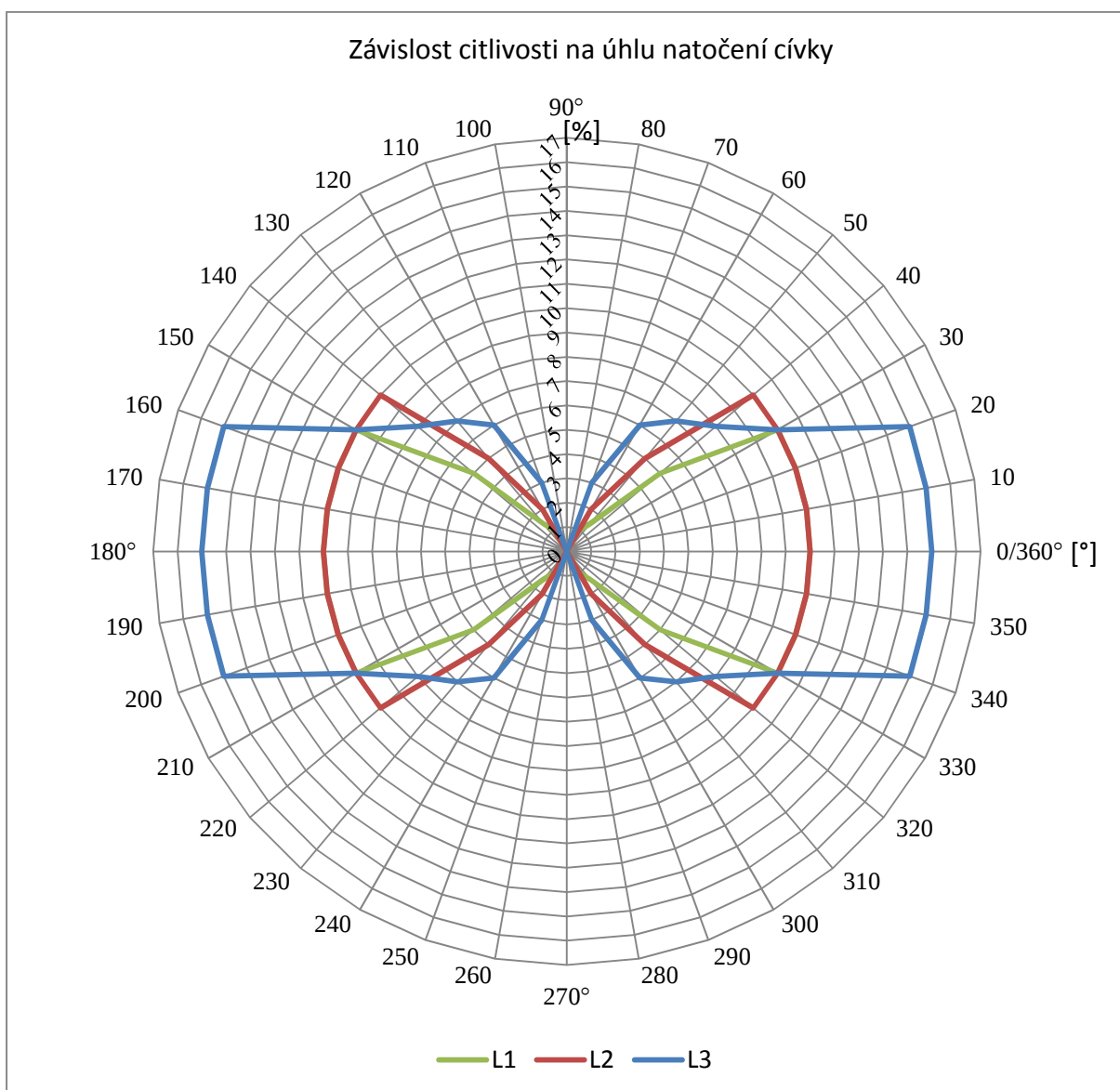


Obr. 26 Graf závislosti citlivosti na vzdálenosti

Tabulka 3: Naměřené parametry jednotlivých cívek

úhel natočení [°]	velikost poklesu intenzity [%]		
	L1	L2	L3
0	10	10	15
10	10	10	15
20	10	10	15
30	10	10	10
40	5	10	7
50	1,5	5	8
60	1	2	6
70	0	0	3
80	0	0	0
90	0	0	0
100	0	0	0

110	0	0	3
120	1	2	6
130	1,5	5	7
140	5	10	8
150	10	10	10
160	10	10	15
170	10	10	15
180	10	10	15



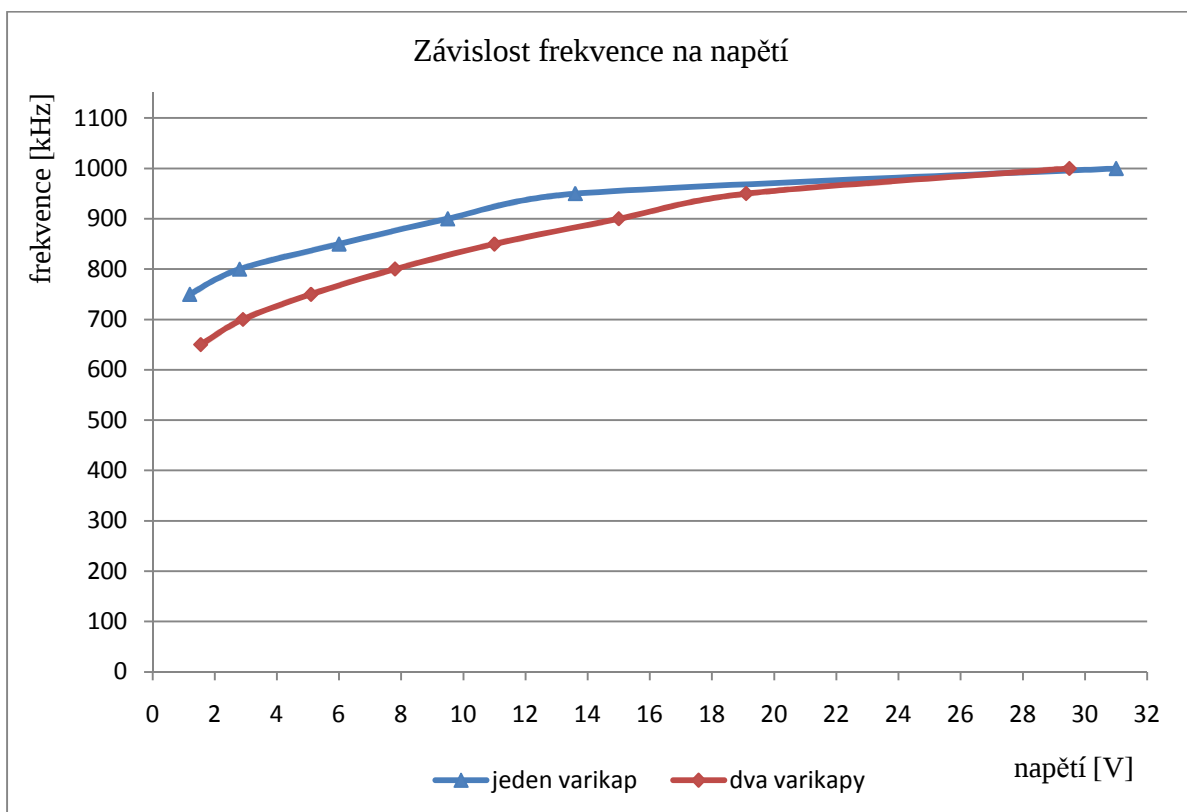
Obr. 27 Graf závislosti citlivosti na úhlu natočení cívek

Tabulka 4 představuje závislost naměřené frekvence GDO na napětí na dvojici varikapů. Z takto naměřených hodnot je vypracovaný graf (obr. 28). Měření probíhalo při použití největší měřicí cívky a jednom varikapu KB 113, kde jeho přeladitelná frekvence byla od 715,94 kHz do 1032,59 kHz. Při použití dvou stejných varikapů je přeladitelná frekvence od 617,14 kHz do 1006,21 kHz a naměřená frekvence při použití tří varikapů je od 552,75 kHz do 975,380 kHz.

Z těchto výsledku lze jednoznačně říci, že maximálně dvojice varikapu je dostačující, protože se zvyšujícím se počtem paralelně zapojených varikapů nedochází ke zvětšování šířky přeladitelného frekvenčního pásma.

Tabulka 4: Změřené závislosti frekvence GDO na napětí varikapů

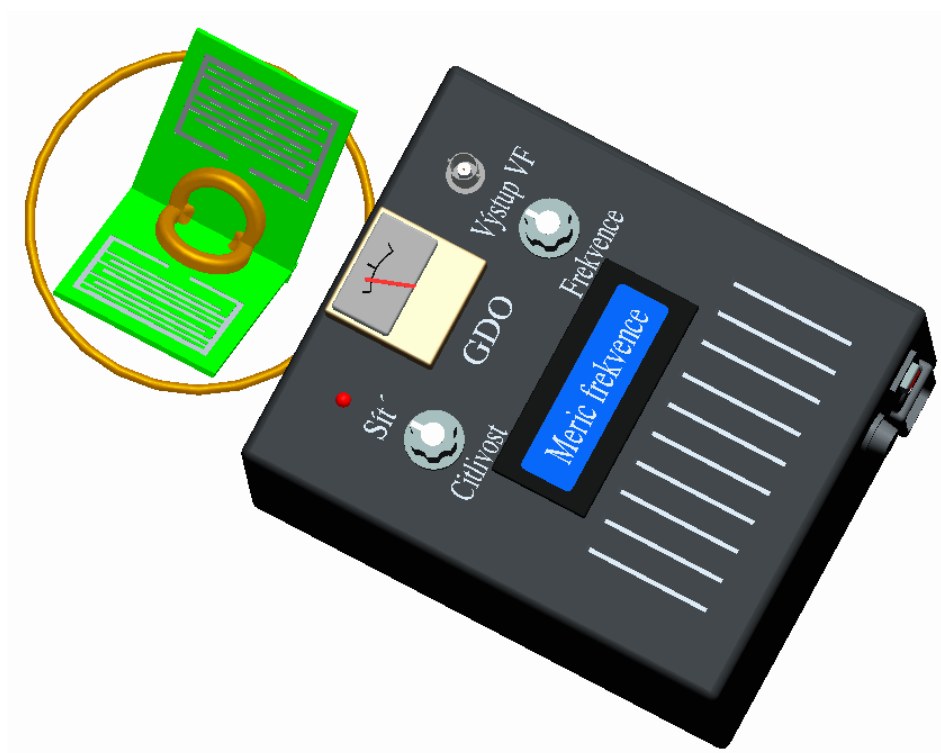
frekvence [kHz]	napětí při použití 1 varikapu [V]	frekvence [kHz]	napětí při použití 2 varikapů [V]
722,94	0,6	614,14	0,5
750	1,2	650	1,5
800	2,8	700	2,9
850	6,1	750	5,1
900	9,5	800	7,81
950	13,6	850	11,3
1000	30	900	15,2
1032,14	32	950	19,1
		1000	29,5
		1060,13	32,3



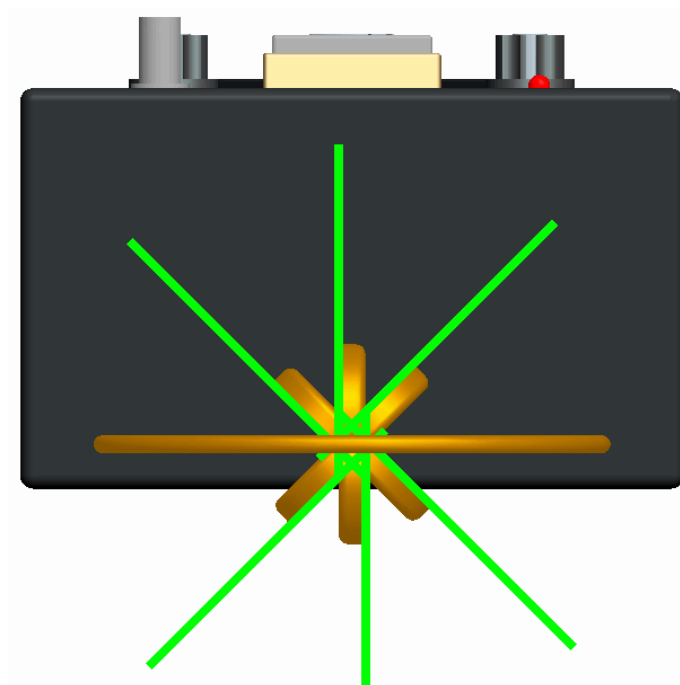
Obr. 28 Graf závislosti frekvence na napětí varikapu



Obr. 29 První způsob měření množství odsáté energie, kde je měřený obvod umístěný ve středu měřicí cívky



Obr. 30 Druhý způsob měření množství odsáté energie,
kde se měřený obvod otáčí kolem své osy



Obr. 31 Druhý způsob měření množství odsáté energie,
kde se měřený obvod otáčí kolem své osy

9. Seznam součástek

9.1 Seznam součástek zdroje

Tabulka 5: Seznam použitých součástek na zdroji

Součástka	Množ.	Jednotka	Název	Typ
C1	1	2200 μ F/16 V	Kondenzátor	Elektrolytický
C2, C3	2	1000 μ F/25 V	Kondenzátor	Elektrolytický
C4	1	220 μ F/100 V	Kondenzátor	Elektrolytický
C5	1	47 μ F/63 V	Kondenzátor	Elektrolytický
R1	1	3k3 Ω	Rezistor	
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	8		Dioda	1N4007
D9	1	33 V	Zenerova dioda	BZX83V033
U1	1	L7809	Stabilizátor	
U2	1	L7812	Stabilizátor	
J1, J2, J3, J4	4		MTA konektor	

9.2 Seznam součástek měřiče rezonance

Tabulka 6: Seznam použitých součástek pro sací měřič rezonance

Součástka	Množ.	Jednotka	Název	Typ
R1, R9	2	5k6 Ω	Rezistor	SMD
R2	1	2k2 Ω	Rezistor	SMD
R3	1	390 Ω	Rezistor	SMD
R4	1	4k7 Ω	Rezistor	SMD
R5	1	10 k Ω	Rezistor	SMD
R6	1	39 k Ω	Rezistor	SMD
R7	1	1k2 Ω	Rezistor	SMD
R8	1	47 k Ω	Rezistor	SMD
R10	1	120 Ω	Rezistor	SMD
R11	1	100 k Ω	Rezistor	SMD
P1	1	25 k Ω	Potenciometr	Lineární
P2	1	50 k Ω	Potenciometr	Logaritmický
C1	1	22 nF	Kondenzátor	Keramický SMD

C2, C7, C8	3	100 nF	Kondenzátor	Keramický SMD
C3	1	2,2 nF	Kondenzátor	Svitkový
C4	1	33 pF	Kondenzátor	Keramický SMD
C5	1	10 pF	Kondenzátor	Keramický SMD
C6	1	20 pF	Kondenzátor	Keramický SMD
C9	1	1,5 nF	Kondenzátor	Keramický SMD
C10, C11, C12, C13	4	1 nF	Kondenzátor	Keramický SMD
C14	1	68 µF/16 V	Kondenzátor	Elektrolytický SMD
D1, D2	2	5V1	Zenerova dioda	BZV55C 5.1 SMD
D3, D6	2	20 – 230 pF	Varikapy	
D4, D5	2		Dioda	BAT48 SMD
T1, T2	2	BC546	Tranzistor	SMD
T3	1	BF 961	Tranzistor	DG MOSFET
J5, J6, J7, J8, J9, J10, J11	7		SPOX konektor	
L1 L2 L3		16 z. / Ø 11 cm 20 z. / Ø 7 cm 26 z. / Ø 4 cm	Cívka	Ø drátu 0,375 mm
Transformátor	1			230V / 1x40V 1x12V
Vypínač	1			230V / 3A
Síťový konektor	1			GSD781
Konektor	1		BNC	BNC-Z 75
Panelové měřidlo	1		Analogové panelové měřidlo	
Plastová krabice	1		U-KP10	149x178x90

10. Závěr

V úvodní části své diplomové práce se věnuji přístroji nazývaný sací měřič rezonance neboli v anglické literatuře často označován jako GDO. Jeho praktickým využitím pro radioamatéry i profesionály. Jeho principem měření a možnými komplikacemi při vlastním měření či naopak jeho využití v běžné praxi nebo pro výuku. Samostatnou částí diplomové práce jsou oscilátory, protože i základem měřiče rezonance je oscilátor. Nejpoužívanějšími typy zapojení oscilátorů a jejich rozdělení, vlastnostmi a principem činnosti. Zmínka je i o cívkách, jejich typech, základním rozdělení a vlastnostech. Přiloženy jsou i orientační výpočty indukčnosti cívky, která je odvozena pomocí Thomsonova vztahu za předpokladu známé kapacity varikapů.

Diplomová práce obsahuje kompletní návrh měřiče rezonance, desky plošných spojů zdroje a měřiče rezonance. Nechybí ani jejich základní popis činnosti. Vhodná krabička obsahuje vlastní transformátor s izolační pevností testovanou na 3 kV. Dále je v krabičce umístěný zdroj pro napájení sacího měřiče rezonance +12 V a napětí +30 V pro napájení varikapů, určené pro přeladování rezonančního kmitočtu. Vedle zdroje je umístěna deska plošného spoje s vlastním měřičem rezonance (obr. 37). Vrchní kryt krabičky obsahuje dva potenciometry pro přeladování frekvence a pro nastavení citlivosti. Mezi těmito potenciometry je umístěny analogový měřicí přístroj pro měření množství odsáté energie z oscilátoru při sladění rezonančních kmitočtů měřené a měřicí cívky. Krabička obsahuje BNC konektor pro připojení externího čítače. Zároveň je krabička vhodná pro zabudování stavebnice interního měřiče frekvence, který je napájený +9 V a toto napětí zdroj měřiče rezonance obsahuje. Červená LED indikuje stav „zapnuto“.

Po osazení DPS zdroje a po důkladné kontrole jednotlivých spojů se připojil transformátor. Výstupní usměrněné a stabilizované napětí se přeměřilo. Zdroj fungoval na první zapojení bez problémů.

Po zhotovení DPS, osazení SMD součástkami a zkontrolování se vyzkoušel měřič rezonance. Pro větší zesílení tranzistoru byla hodnota kondenzátoru C6 zvýšena z 1 pF na 20 pF. Potenciometr pro přeladování frekvence se musel použít logaritmický z důvodu nelineární charakteristiky varikapů. Tím se dosáhlo zlinearizování přeladované frekvence. Další úpravy nebyly potřeba a sací měřič rezonance pracoval okamžitě. Fotografie sacího měřiče rezonance jsou přiloženy v příloze, obrázky 34 až 37.

Sací měřič rezonance je užitečný přístroj pro zjištění rezonančního kmitočtu laděného obvodu. Jeho výhodou je jednoduchá obsluha a malé rozměry, které jej předurčují k rychlému a pohodlnému měření při zachování dostatečné přesnosti.

Jednotlivá měření provedená s různými cívkami pěkně znázorňují grafy, ze kterých je patrné, že čím je velikost měřicí cívky podobná s měřenou, tím lepe dojde k odsátí části energie z větší vzdálenosti a dosáhneme většího poklesu, „dipu“.

Většího možného frekvenčního přeladění se bohužel nedosáhlo. S porovnáním profesionálních GDO zařízení, je ale tento výsledek očekávatelný a uspokojivý. Na takto nízkých kmitočtech není prakticky možné dosáhnout lepších výsledků. Pro větší frekvenční rozsah by byla minimálně nutná velikost kapacity 1500 pF.

Seznam použité literatury

- [1] Dobeš Josef, Žalud Václav. Moderní radiotechnika. Praha, BEN, 2006. 767 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [2] Doršic Petr. Amatérské rádio. Generátor, vlnoměr, dip-meter 0,4 až 200 MHz. A1/84, s. 14-16.
- [3] Drozda Miroslav. Elektus 99. Sací merač rezonance 80 až 120 MHz, s. 60-61
- [4] Faktor Zdeněk. Transformátory a cívky. Vlastnosti materiálů a efektivní návrh transformátorů. Praha, BEN, 2002. 393 s. ISBN 80-86056-49-X
- [5] Hellebrand Jiří. Amatérské rádio. Tranzistorový měřič rezonance. A8/76, s. 308 - 310
- [6] Nobilis Jiří. Teorie elektronických obvodů III. Napájecí zdroje. Pardubice, 2000. 131 s.
- [7] Praktické konstrukce. Sací měřič rezonance. 7/94, s. 254-255.
- [8] Škácha Jiří. Radioamatér. K čemu je dobrý měřič rezonance. 2003, 1, s. 8-9.
- [9] Winkler Jaroslav. Amatérské rádio. Měřič rezonance pro krátké vlny. A5/92, s. 197-198.
- [10] Zrůst Jiří. Amatérské rádio. Sací měřič rezonance pro VKV. A4/82, s. 151.

Seznam použitých zkratek a symbolů

A_u	[-]	napět'ové zesílení
B	[T]	magnetická indukce
C	[F]	elektrická kapacita
f	[Hz]	kmitočet
G	[S]	elektrická vodivost
H	[A.m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
L	[H]	indukčnost
M	[H]	vzájemná indukčnost
Q	[-]	činitel jakosti
R_p	[Ω]	ztrátový odpor
T	[s]	perioda
U	[V]	elektrické napětí
Z	[Ω]	impedance
β	[-]	zpětnovazební přenos
Φ	[Wb]	magnetický indukční tok
ω	[rad.s ⁻¹]	omega
δ	[°]	ztrátový úhel cívky
φ_A	[°]	fázový posun
$s(\varepsilon)$	[-]	stabilita kmitočtu

Seznam příloh

- Příloha A: *Obr. 32 Vyhotovený model měřiče rezonance ve 3D programu Pro/Engineer*
- Příloha B: *Obr. 33 Vyhotovený model měřiče rezonance ve 3D programu Pro/Engineer*
- Příloha C: *Obr. 34 Fotografie sacího měřiče rezonance zepředu*
- Příloha D: *Obr. 35 Fotografie sacího měřiče rezonance zezadu*
- Příloha E: *Obr. 36 Fotografie sacího měřiče rezonance ze shora*
- Příloha F: *Obr. 37 Fotografie vnitřního prostoru krabice měřiče rezonance*



Obr. 32 Vyhotovený model měřiče rezonance ve 3D programu Pro/Engineer



Obr. 33 Vyhotovený model měřiče rezonance ve 3D programu Pro/Engineer



Obr. 34 Fotografie sacího měřiče rezonance zepředu



Obr. 35 Fotografie sacího měřiče rezonance zezadu



Obr. 36 Fotografie sacího měřiče rezonance ze shora



Obr. 37 Fotografie vnitřního prostoru krabičky měřiče rezonance