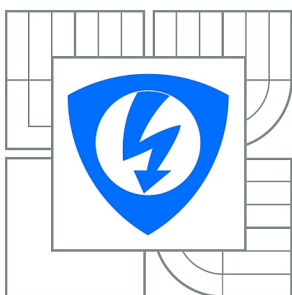


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

FUNKČNÍ MODEL JEVU MAGNETICKÉ REZONANCE

FUNCTIONAL MODEL OF MAGNETIC RESONANCE PHENOMENON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

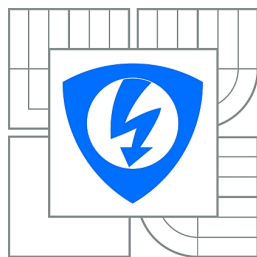
TOMÁŠ SVOBODA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ALEŠ DRASTICH, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Tomáš Svoboda

ID: 133986

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Funkční model jevu magnetické rezonance

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Seznamte se s problematikou fyzikálního jevu magnetické rezonance. Zabývejte se zejména obecnou konfigurací systému, pomocí kterého je možno jev vybudit a detekovat- generovat a prezentovat FID resp. ECHO signál. Definujte požadavky na jednotlivé články zařízení a zhodnoťte jejich realizovatelnost z pohledu konstrukce výukové pomůcky. 2) Navrhněte optimální, finančně co nejméně náročnou konfiguraci zařízení, které bude sloužit jako výuková pomůcka k názornému objasnění vzniku a detekce jevu magnetické rezonance. 3) Proveďte teoretický a konstrukční návrh magnetu, RF cívky vysílače/přijímače a předzesilovače systému. 4) Realizujte celý systém a ověřte jeho základní funkce. 5) Proveďte zhodnocení dosažených výsledků s ohledem na technická omezení realizovaného zařízení a navrhněte inovační trendy jeho konstrukce. 6) Součástí práce bude návrh laboratorních cvičení realizovatelných pomocí navrženého zařízení v rámci výuky předmětu Tomografické zobrazovací systémy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BUSHBERG, J. The Essential Physics of Medical Imaging. Lippincott Williams and Wilkins, 2002.
- [2] ZANG-HEE CHO. Foundations of Medical Imaging. John Wiley and Sons. Inc., 1993.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Drastich, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Projekt se zabývá konstrukcí měřícího přípravku pro prezentaci jevu nukleární magnetické rezonance. V textu je popsána realizace jednotlivých komponent systému. Každá komponenta je testována jako samostatná jednotka i bylo provedeno testování celkové sestavy systému. Práce obsahuje i návrh laboratorních úloh pro využití této učební pomůcky při výuce.

KLÍČOVÁ SLOVA

- Jev magnetické rezonance
- Vysokofrekvenční zesilovač
- Magnetické pole
- Výuková pomůcka

ABSTRACT

This thesis deals with construction of measurement device for presentation of nuclear magnetic resonance phenomenon. There is described realization of every parts of the system. Each component is tested as itself and there is also described testing of whole system. This thesis contains the proposal of laboratory exercises to use this aid in classes.

KEYWORDS

- Magnetic resonance phenomenon
- High frequency amplifier
- Magnetic field
- School aid

SVOBODA, T. *Funkční model jevu magnetické rezonance*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 74 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Aleš Drastich, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Funkční model jevu magnetické rezonance“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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 práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Aleši Drastichovi, CSc. za odbornou pomoc a poskytnutí rad a materiálů, které mě pomohly v realizaci práce. Dále děkuji panu doc. Ing. Milanu Chmealřovi, CSc. a Ing. Petru Zatloukalovi za konzultace při stavbě VF obvodů.

Děkuji společnosti CVVI a.s. a ENERGOKLASTR o.p.s. za poskytnutí prostorů a vybavení, které jsem mohl využít při realizaci bakalářské práce. A v závěru děkuji společnosti Claris Investment & Consulting s.r.o. za darování vybraných elektronických součástí.

OBSAH

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	viii
Úvod	11
1 Teoretický rozbor	12
1.1 SR metoda buzení	14
1.2 Budící impulzy.....	14
2 Realizace měřícího přípravku	18
2.1 Generátor RF impulzu	18
2.1.1 Předzesilovač signálu.....	18
Výstupní filtr	19
Frekvenční charakteristika	19
Převodní charakteristika.....	20
Konstrukční provedení	20
2.1.2 Generátor obdelníku	21
2.1.3 Modulace signálu.....	23
2.1.4 Výkonový zesilovač.....	26
2.1.5 Realizace výkonového zesilovače	28
Napájecí zdroj	28
Zesilovač	29
Frekvenční charakteristika zesilovače.....	30
Převodní charakteristika.....	31
Impedanční přizpůsobení zátěži	31
Konstrukční řešení.....	32
2.1.6 Výstupní diody a ochranné diody	34
2.2 Pracovní cívka.....	35

2.3	Přijímač FID/ECHO signálu	37
2.3.1	Ochrana předzesilovače	37
2.3.2	Snímací zesilovač	37
3	Testování systému jako celku	39
4	Nedostatky technického řešení	42
4.1	Tlumené kmity po vypnutí RF impulzu.....	42
4.2	Nehomogenita magnetického pole.....	42
4.3	Úzkopásmovost výkonového zesilovače	42
4.4	Úzkopásmovost snímacího zesilovače.....	43
4.5	Nedostatečné zesílení snímacího zesilovače.....	43
5	Návrh Laboratorní úlohy	44
6	Finanční rozvaha projektu	44
7	Závěr	45
	Literatura	47
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	49
8	Přílohy	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Pohyb vektoru magnetizace M po aplikaci RF signálu – převzato z [1]	12
Obrázek 2: Průběh FID signálu – převzato z [1]	13
Obrázek 3: Graf Fourierovy transformace obdélníkové funkce, převzato z [23]	16
Obrázek 4: Schéma předzesilovače	19
Obrázek 5: Předzesilovač RF signálu	21
Obrázek 6: Schéma generátoru obdélníkového signálu	21
Obrázek 7: Frekvenční charakteristika neinvertujícího zesilovače, převzato z [18]	25
Obrázek 8: Signál na výstupu modulátoru	26
Obrázek 9: Schéma výkonového zesilovače, převzato z [8]	27
Obrázek 10: Převodní charakteristika IRF640, převzato z [21]	27
Obrázek 11: Úprava MOT pro nízké výstupní napětí	29
Obrázek 12: Schéma napájecího zdroje zesilovače	29
Obrázek 13: Laditelný výstupní filtr	32
Obrázek 14: Zkreslení výstupního signálu	32
Obrázek 15: Výkonový zesilovač zabudovaný do boxu	33
Obrázek 16: Pohled na kompletní zakrytovaný výkonový zesilovač	34
Obrázek 17: Ochranné diody	34
Obrázek 18: Úchyt pracovní cívky	36
Obrázek 19: Zakrytovaná pracovní cívka	36
Obrázek 20: Signál na vstupu a výstupu snímacího zesilovače	38
Obrázek 21: Tlumené kmity po skončení RF impulsu	39
Obrázek 22: Snížení amplitudy a doby trvání tlumených kmitů	40
Obrázek 23: Tlumené kmity po přidání dalších výstupních diod	40
Obrázek 24: Tlumené kmity na snímacím zesilovači	40
Obrázek 25: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od jednoho z magnetů	52
Obrázek 26: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu – s regresní křivkou	53
Obrázek 27: Držák jednoho magnetu o rozměrech 50x50x20mm	54
Obrázek 28: Deska s vodícími lištami	55

Obrázek 29: Frekvenční charakteristika předzesilovače bez výstupního filtru	56
Obrázek 30: Frekvenční charakteristika se zátěží a výstupním filtrem	57
Obrázek 31: Převodní charakteristika předzesilovače	58
Obrázek 32: Krabička pro předzesilovač	59
Obrázek 33: Výstupní filtr předzesilovače	59
Obrázek 34: Realizace generátoru obdélníkového signálu	62
Obrázek 35: Realizace tvarovače signálu (operační zesilovače jsou ze spodní strany DPS).....	62
Obrázek 36: Schéma tvarovače signálu	63
Obrázek 37: Graf frekvenční charakteristiky AM modulátoru.....	64
Obrázek 38: Převodní charakteristika AM modulátoru	65
Obrázek 39: Schéma výkonového zesilovače.....	66
Obrázek 40: Převodní charakteristika výkonového zesilovače	67
Obrázek 41: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače bez výstupního filtru	68
Obrázek 42: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače bez výstupního filtru	69
Obrázek 43: Realizace výstupního filtru.....	69
Obrázek 44: Schéma snímacího zesilovače	70
Obrázek 45: Snímací zesilovač – horní strana	71
Obrázek 46: Snímací zesilovač – spodní strana.....	71
Obrázek 47: Frekvenční charakteristika snímacího zesilovače	72

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Finanční rozvaha projektu	44
Tabulka 2: Hodnoty magnetické indukce ve vzdálenosti x	52
Tabulka 3: Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky předzesilovače bez výstupního filtru.....	56
Tabulka 4: Frekvenční charakteristika se zátěží a výstupním filtrem	57
Tabulka 5: Převodní charakteristika předzesilovače	58
Tabulka 6: Frekvenční charakteristika AM modulátoru.....	64
Tabulka 7: Převodní charakteristika AM modulátoru	65
Tabulka 8: Převodní charakteristika výkonového zesilovače.....	66
Tabulka 9: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače s výstupním filtrem.....	67
Tabulka 10: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače s výstupním filtrem...	68
Tabulka 11: Frekvenční charakteristika snímacího zesilovače.....	71

ÚVOD

Nejúčinnější pro vytvoření paměťové stopy je danou informaci vnímat co nejvíce smysly. V rámci výuky máme kvalitní přísun zvukových informací, vizuálních informací, ale je stále těžší u řady témat dodat i „hmatovou informaci“ či lidově si danou informaci osahat. U některého učiva je snadné vytvořit učební pomůcku (rovnováha na páce, tření, elektromotor, měření pH, apod.). Bohužel se vyvíjí stále složitější a hůře pochopitelné přístroje, které však student musí pochopit a naučit se jejich princip. Oním příkladem je právě nukleární magnetická rezonance. Protože se jedná o jev velmi důležitý pro dnes velmi významný zobrazovací systém, je nutné, aby studenti toto téma znali a měli možnost si jej „osahat“.

Při výběru tématu pro bakalářskou práci jsem se rozhodl realizovat systém pro prezentaci jevu nukleární magnetické rezonance. Jedná se o přístroj principem podobný NMR spektrometrům, avšak s mnohem skromnějšími parametry. Hlavním účelem zařízení je umožnit studentům lépe pochopit technické řešení přístrojů využívajících jev nukleární magnetické rezonance a díky přímému sledování systému pochopit i onen jev.

Zařízení se skládá z několika částí, které jsou schválně realizovány jako samostatné jednotky. Umožňuje to jednak budoucí vylepšení systému a zároveň je zařízení více informativní, protože samo zobrazuje i blokové schéma daného systému. V rámci semestrální práce byly jednotlivé komponenty navrženy po teoretické stránce. V rámci bakalářské práce budou komponenty realizovány a otestovány. Po zprovoznění všech částí přístroje bude přístroj testován i jako celek a budou zjištěny parametry systému. V případě funkčnosti systému budou i nasnímány data pro různé vzorky. K zařízení bude vypracován návrh laboratorní úlohy, která by měla sloužit pro cvičení k předmětu Zobrazovací systémy v lékařství.

Cílem bakalářské práce je sestavit všechny komponenty, které jsou nezbytné pro systém umožňující budít a měřit jev magnetické rezonance. Zároveň je cílem zkompletovat celé zařízení a ověřit jeho parametry. Cílem je také navrhnout možnou laboratorní úlohu a připravit její zadání.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

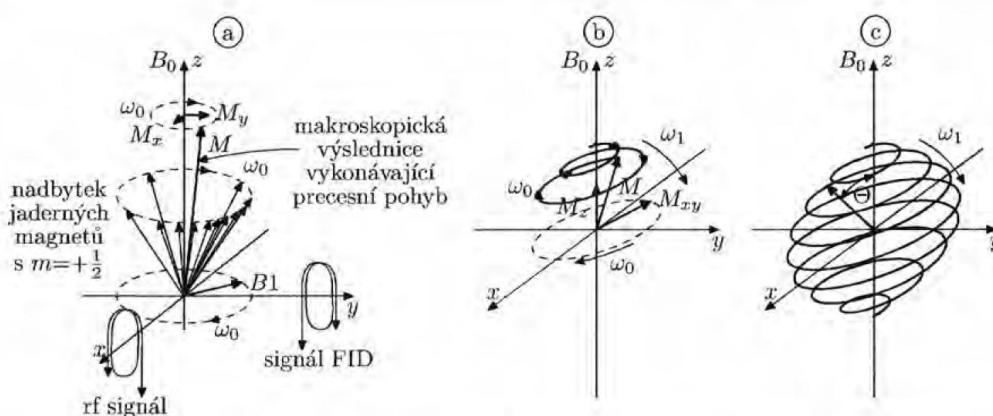
Teoretickým popisem jevu magnetické rezonance se zabývá mnoho autorů. V této kapitole na začátek zmíním základní informace potřebné k sestavení funkčního modelu tohoto jevu, dále se budu věnovat základní metodě buzení SR a nakonec určím potřebné parametry RF impulsu.

Jev magnetické rezonance nastává, pokud vložíme atomy s nenulovým spinovým číslem do vnějšího magnetického pole. V tom okamžiku se uspořádají vektory magnetizace jednotlivých protonů v jádrech atomů ve směru magnetického pole. Vektory potom vykonávají tzv. precesní pohyb, jehož úhlová frekvence je přímo úměrná hodnotě intenzity magnetického pole [1]. Tato úhlová frekvence se nazývá Larmorova frekvence a spočítá se dle následujícího vztahu:

$$\omega_0 = \gamma * B_0 \quad (1)$$

Larmorova frekvence ω_0 je přímo úměrná velikosti B_0 a gyromagnetické konstantě γ , která je odlišná pro různé atomy (pro vodík $\gamma_H = 267519000 \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) [16].

Hlavním jevem, kterého se využívá při praktickém použití jevu magnetické rezonance, je, že pokud působíme magnetickým polem B_1 , které je kolmé na B_0 a má sinusový průběh s frekvencí shodnou s Larmorovou frekvencí, tak se vektory magnetizace daných precesujících protonů vychýlí do směru B_1 . Lépe je to vidět z obrázku:



Obrázek 1: Pohyb vektoru magnetizace M po aplikaci RF signálu – převzato z [1]

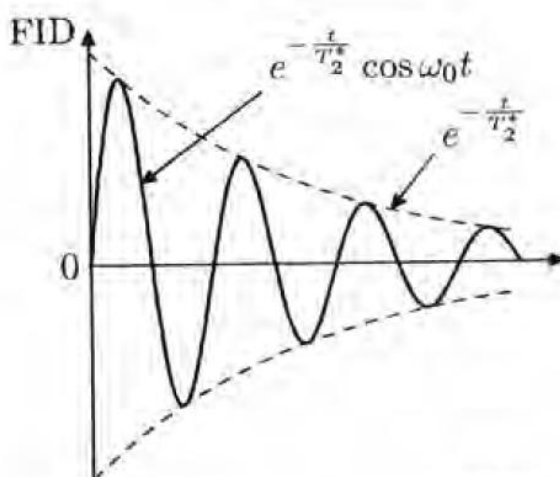
Pokud magnetické pole B_1 přestane působit, vektory magnetizace mají tendenci se vrátit do původního stavu, který je ve směru B_0 [1]. Vektor magnetizace se vychyluje

buď o 90° , nebo o 180° . Pro zjištění jak dlouho musí magnetické pole působit pro dané vychýlení při dané hodnotě B_1 lze využít následující vzorec [1]:

$$\theta = \gamma * B_1 * \tau \quad (2)$$

Kde τ reprezentuje délku impulsu, θ je úhel vychýlení (v praxi tedy 90° nebo 180°), γ je již zmíněná gyromagnetická konstanta a B_1 je velikost magnetické indukce, kterou působíme ve směru kolmém na B_0 .

Ve chvíli, kdy se vektor magnetizace vrací zpět do směru B_0 (dále v ose Z) lze měřit v ose bývalého B_1 (dále v ose XY) magnetickou indukci měnící se na Larmorově frekvenci. Tato magnetická indukce postupně snižuje maximální hodnotu s tím, jak se vrací vektor magnetizace do směru osy Z [2] a také rozfázováním vektorů magnetizace [14]. Cívkou, kterou jsme původně budili B_1 můžeme tuto indukci i snímat. Získáme pak tzv. FID signál:



Obrázek 2: Průběh FID signálu – převzato z [1]

Ve vzorcích v obrázku 2 jsou uvedeny časy T_1 a T_2 . Pro moji práci nejsou tyto časy až tak moc důležité (o T_1 bude zmínka v následující kapitole), ale hlavní význam hrají v MR zobrazovacích systémech, protože R. Damadian zjistil, že se liší u různých typů tkáně. Tím umožňují identifikovat různé tkáně v MR obraze [3].

Výše popsané vztahy a principy jsou podstatné pro konstrukci. Na základě hodnoty magnetického pole B_0 se spočítá Larmorova frekvence. Podle ní bude navržen zesilovač, výkonový zesilovač i přijímací zesilovač. Vztah (2) je nezbytný pro časovací obvody, aby bylo možné nastavit, jak dlouho bude působit magnetické pole B_1 .

1.1 SR metoda buzení

SR metoda buzení, někdy označovaná STE [1] je nejjednodušší metodou buzení v NMR technice. Budící sekvence je složená jen z 90° pulzů, které se opakují s danou repetiční dobou TR (Time Repetition). „Okamžitě po ukončení prvního 90° RF budícího impulsu lze snímat FID signál“ [1]. V praxi je však nutné snímat větší počet repeticí, aby bylo možné redukovat šum pomocí například kumulačních technik. „Odezvu na následné 90° RF impulzy bývá zvykem označovat pojmem Hahnovo echo resp. stimulovaný echo-signál“ [1].

U SR metody je potřeba vhodně zvolit repetiční dobu. Magnetické vektory protonů se po doznění RF budícího impulsu vrací do stavu termodynamické rovnováhy. Na to však potřebují daný čas (T1 relaxace – detailně popsáno například v [1]). Pokud je repetiční doba TR kratší než doba relaxace vektorů magnetizace, systém není ve stavu termodynamické rovnováhy (je částečně saturován) a tedy při vybuzení se část signálu ztratí.

V níže uvedeném technickém řešení je zavedena možnost regulace repetiční doby, což otevírá možnosti zkoušet vliv repetiční doby na velikost FID signálu.

1.2 Budící impulzy

Pro buzení je potřeba výkonový RF impuls o správné délce trvání a správné amplitudě. V rámci semestrální práce jsem prováděl některé výpočty, v této podkapitole bych chtěl popsat výpočet požadovaného výkonu a doby trvání.

Pro buzení se v mém systému budou používat obdélníkové RF impulzy. Výstupní spektrum obdélníkových impulzů je sinc funkce. V profesionálních zařízeních se používá pro modulaci RF impulsu sinc funkce, protože výsledné spektrum je pak obdélníkové [15]. Šířka impulsu je v nepřímé úměře k šířce výsledného spektra. „Čím kratší je doba trvání RF impulsu, tím je požadovaná šířka přenášeného pásma $\Delta\omega$ větší a naopak.“ [1]. Proto, abych získal ze vzorku co nejsilnější FID signál, by bylo potřeba budit co největší objem vzorku.

V příloze v tabulce 2 a na obrázku 25 je zobrazena závislost magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu. Hodnoty jsou spočítané dle následujícího vzorce [4]:

$$B_x = \frac{B_{mag}}{\pi} * \left(\tan^{-1} \frac{A*B}{2*X*\sqrt{4*X^2+A^2+B^2}} - \tan^{-1} \frac{A*B}{2*(2*L+X)*\sqrt{4*(2*L+X)^2+A^2+B^2}} \right) \quad (3)$$

Kde A a B značí výšku a šířku a L tloušťku magnetu. Výpočty je nutné provádět

v radiánech. Magnetická indukce má exponenciální pokles se zvyšující se vzdáleností od magnetu. Hodnoty jsem počítal až do vzdálenosti 70mm. Při přibližování se k magnetu magnetická indukce exponenciálně stoupá. Mezi permanentními magnety, které jsou sériově spojené, je symetrické magnetické pole. Vytváří v podstatě přirozený gradient ve směru B_0 .

Zkumavka, ve které je vzorek umístěn má průměr 10mm. Uvažuji, že objem, který bych chtěl budít, bude mít kolem 8mm (když odečtu stěny zkumavky). Frekvenci, na které budu budít vzorek je 4MHz (kvůli účinnosti zesilovače). Z těchto údajů můžu zjistit šířku frekvenčního pásma.

Jak jsem zmiňoval výše, B_0 je symetrické magnetické pole. Pokud nastavím vzdálenost magnetů na 80mm. Budu mít ve středu vzdálenosti mezi magnety magnetickou indukci cca 0,093T. Protože je vzorek 8mm široký a rád bych měl co největší signál, tak budu chtít budít celý objem vzorku. Tím si můžu vymezit frekvenční pásmo. Od středu se na obě strany bude magnetická indukce zvyšovat. Ve vzdálenosti 4mm od středu je magnetická indukce 0,11T. Výhodou je, že na obě strany by teoreticky měl být gradient magnetického pole stejný. To značně ulehčí nároky na výkonový zesilovač, protože bude stačit užší spektrum budícího RF impulsu a tedy RF impuls může mít delší trvání.

Larmorova frekvence je funkcí magnetické indukce a ta je funkcí vzdálenosti:

$$\omega_0(B_0(x)) \quad (4)$$

Pro daný případ tedy:

$$\omega_0(B_0(36)) = 4,68526682\text{MHz} \quad \text{pro } H$$

$$\omega_0(B_0(40)) = 3,924235324\text{MHz} \quad \text{pro } H$$

Vymezené pásmo je široké přibližně 0,761MHz.

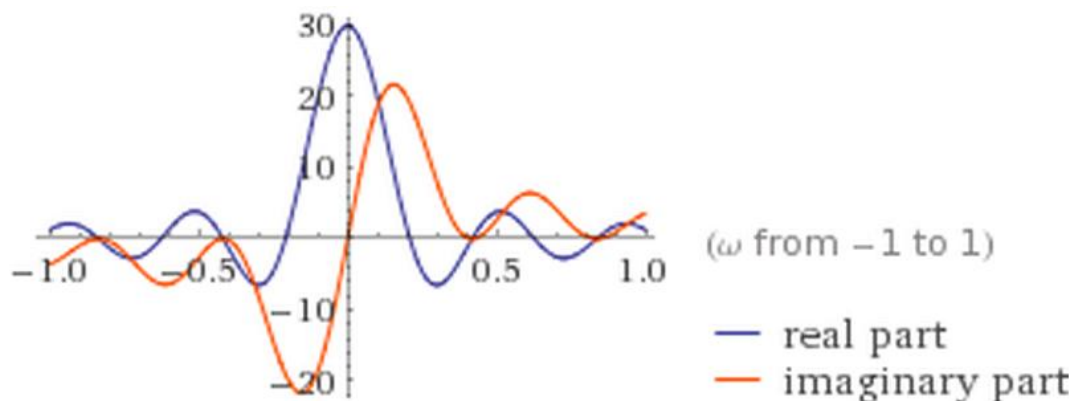
Na internetové stránce [23] je popsána matematická funkce pro obdélníkový signál. Vzorec funkce je následující:

$$f(x) = A * \left[H\left(\frac{x}{L}\right) - H\left(\frac{x}{L} - 1\right) \right] - d \quad (5)$$

Kde $H(x)$ je Heavisidova skoková funkce, A je amplituda pulzu, L je polovina délky obdélníkového impulsu a d je posuv na horizontální ose. Pokud provedu Fourierovu transformaci [23] této funkce dostávám následující vztah (neuvažuji posuv d):

$$FT\{f(x)\} = -\frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}}ALe^{-i\omega L}\delta(L\omega)}{\operatorname{sgn}(L)} + \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}}AL\delta(L\omega)}{\operatorname{sgn}(L)} - \frac{iAe^{-i\omega L}}{\sqrt{2\pi}\omega\operatorname{sgn}(L)} + \frac{iA}{\sqrt{2\pi}\omega\operatorname{sgn}(L)} \quad (6)$$

Graf funkce pro $A=5$ a $L = 15$ je následující:



Obrázek 3: Graf Fourierovy transformace obdélníkové funkce, převzato z [23]

Reálná část hodnot tvoří sinc funkci. Fourierovou transformací sinc funkce dostáváme obdélníkovou funkci. Tedy spektrum obdélníkové funkce má tvar sinc funkce a naopak. Pro ideální buzení vzorku by mělo být spektrum obdélníkové. Budící harmonický signál by tedy měl být modulován sinc funkcí. Konstrukčně jednodušší variantou je modulovat harmonický signál pomocí obdélníku, ale spektrum pak bude mít tvar sinc funkce, což povede k buzení i nechtěných částí vzorku a to sníží poměr signálu k šumu. Pro pásmo 0,76MHz bych potřeboval šířku impulsu kolem 10 μ s. Pokud bych měl délku impulsu 20 μ s, měla by být šířka spektra kolem 0,3MHz. To by odpovídalo šířce vzorku přibližně 4mm. Tyto hodnoty jsou po oříznutí všech laloků sinc funkce, kromě hlavního. „V praxi se používá většinou oříznutí funkce $\sin(at)/at$ na 3 až 7 laloků“ [1] (*sinc funkce je definována jednoduše jako $\sin(at)/at$, vzorec (6) dá také jako výstupní průběh sinc funkci, ale jeho zápis je složitější díky vzniku Fourierovou transformací obdélníkového signálu*). Pokud se tedy použije více laloků funkce, lze využít ještě širší impuls. Toto je však již mimo rozsah této práce. Pro mé výpočty a nastavení systému budu uvažovat délku RF impulsu 20 μ s.

Pro návrh systému je potřeba stanovit výkon impulsů. Ze vztahu (2) vyplývá vztah mezi úhlem vychýlení magnetického vektoru protonu, časem a velikostí magnetické indukce. Úhel vychýlení mám pevně stanovený na 90°, tedy $\pi/2$ v radiánech. V předešlém odstavci jsem si pevně stanovil délku RF impulsu na 20 μ s. Variabilní složka bude velikost magnetické indukce. Tu můžu regulovat pomocí velikosti amplitudy budícího RF harmonického signálu. Pro výpočet musím uvažovat dané parametry aparátu, který bude generovat magnetické pole RF budících impulsů. V mém

případě se jedná o solenoid – válcovou cívku bez jádra. Cívka má 18 závitů, délka je 35mm, průměr 12mm a její indukčnost je kolem 1,7μH (stanoveno výpočtem dle [5] a [24]). Pro frekvenci 4MHz je impedance j42,7Ω.

Ze vztahu (2) vyplývá, že magnetické pole při době trvání RF impulsu 20μs je 294μT. Pro výpočet hodnoty proudu protékající solenoidní cívku dle požadované magnetické indukce a parametrů cívky lze použít následující vztah:

$$I = \frac{B_1 * l}{N * \mu_0 \mu_r} \quad (7)$$

Dle tohoto vztahu (s výše specifikovanou cívku na dané frekvenci) vychází hodnota proudu 0,45A (tuto hodnotu považuji za efektivní hodnotu proudu). Pro danou impedanci je efektivní napětí 19,41V. Amplituda harmonického signálu na pracovní cívce by měla být 27,37V. Potřebný výkon je 17,53W. *Výkon je mnohonásobně nižší, než, který jsem uváděl v semestrálním projektu. Je to z důvodu nalezení chyby ve vzorci, kdy jsem místo π/2 ve vzorci (2) použil 2π. Navíc jsem zjistil, že díky symetričnosti magnetického pole můžu mít větší šířku budícího RF Impulzu.*

2 REALIZACE MĚŘÍČÍHO PŘÍPRAVKU

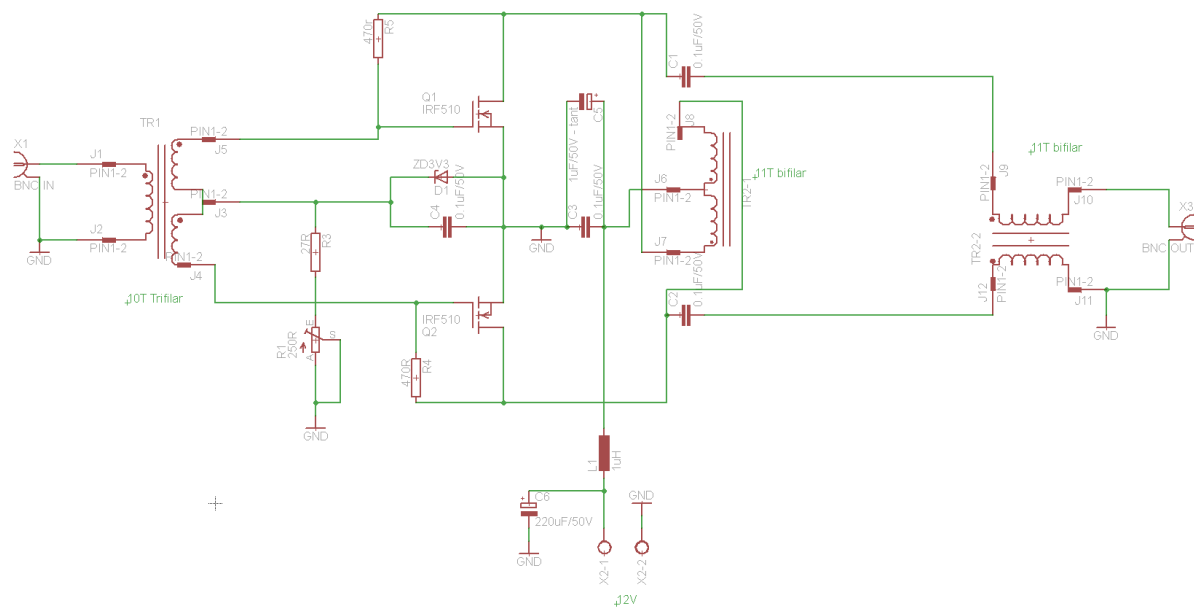
V této kapitole se budu zabývat popisem konstrukce měřícího přípravku. Popíšu způsob realizace jednotlivých komponent a zhodnotím jejich vlastnosti.

2.1 Generátor RF impulzu

Prvně je nutné si stanovit, jak velké musí být magnetické pole v pracovní cívice, aby vytvořilo budící RF impulz. Tuto otázku jsem řešil v kapitole 1. Potřebný výkon je 17,53W. Z důvodu možnosti laboratorního použití přípravku je nutné zajistit širší rozsah výkonů a frekvencí budící části, takže generátor by měl být koncipován minimálně na dvojnásobný výkon.

2.1.1 Předzesilovač signálu

Předzesilovač signálu má za úkol zesílit výstupní signál z modulátoru pro potřeby buzení výkonového zesilovače. Signál, který je potřebný pro buzení výkonového zesilovače by měl mít 1W až 5W. Předzesilovač musí pracovat ve stejném pásmu, jako výkonový zesilovač, tedy v pásmu od 1MHz do cca 10MHz. V semestrální práci jsem uvažoval předzesilovač konstruovaný s bipolárním tranzistorem v pracovní třídě A. V simulátoru Multisim fungoval obvod spolehlivě, ale po realizaci jsem se setkal s řadou problémů (nízké zesílení, vysoká teplota tranzistoru, apod.), takže jsem od této verze upustil. Na webových stránkách [22], jsem našel schéma na konstrukci zesilovače signálu od 1,8MHz do 10,1MHz s výkonem 5W. Jeho schéma je na následujícím obrázku:



Obrázek 4: Schéma předzesilovače

Zesilovač je buzen přes vstupní transformátor. Primární vinutí má 10 závitů a sekundární má také 10 závitů, ale s vyvedeným středem. Vinutí je vinuto trifilárně, aby bylo dosaženo co nejlepší vazby [6]. Z vstupního transformátoru je signál veden na gate MOSFET tranzistorů IRF510. Klidový proud tranzistory se nastavuje trimrem R1. Obě vinutí na výstupním transformátoru i vstupní tlumivce mají 11 závitů a jsou vinuty bifilárně. Zesilovač je realizován na plošném spoji, jehož motiv i osazovací plán je v elektronické příloze ve složce „Předzesilovač RF impulzu“.

Zesilovač je napájen z externího zdroje. V původním zapojení je uvedeno napájecí napětí 13V a odběr proudu při maximálním buzení má být 1A. V praxi se mě osvědčilo buzení i trochu větší výkonem a zesilovač pracuje dobře i s odběrem kolem 1,5A. Hlavním důvodem je dle mého názoru to, že mám tranzistory chlazené aktivně a tím si můžu dovolit větší výkonové ztráty, aniž by došlo k destrukci tranzistorů.

Výstupní filtr

Pro správnou funkci je potřeba mít na výstupu výstupní filtr. Ten má v obvodu dvě funkce. Jednak vytváří obvod impedančního přizpůsobení a za druhé propouští pouze potřebné pásmo, takže nežádoucí vyšší a nižší harmonické jsou utlumeny [7]. Filtr je 7. řádu. Hodnoty součástek jsou převzaty z originálního schématu.

Frekvenční charakteristika

U předzesilovače jsem provedl měření frekvenční charakteristiky. Naměřené

údaje vypovídají o zesílení na určitém frekvenčním pásmu. Při měření jsem se pohyboval v pásmu od 0,5MHz do 20MHz. Při měření nebyla na výstupu žádná zátěž a nebyl připojen výstupní filtr. Vstup byl připojen na signální generátor, který měl pevně nastavenou amplitudu signálu během celého měření. Předzesilovač byl napájen napětím 13V. Naměřené hodnoty jsou v následující tabulce:

Z grafu na obrázku 29 vyplývá, že předzesilovač má vyšší zesílení pásma od 3MHz do 20MHz s maximem na frekvenci 14MHz. Naměřené zesílení je kolem 24dB. Pro maximální buzení výkonového zesilovače je potřeba amplituda zhruba 15V. Při zesílení 24dB by měl mít vstupní signál amplitudu kolem 1V.

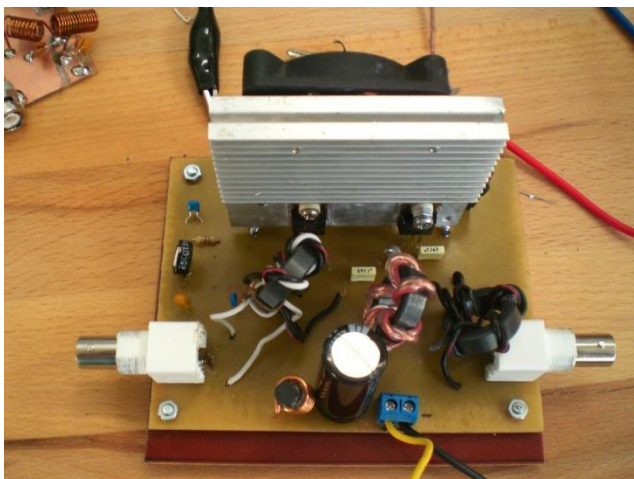
Druhá frekvenční charakteristika je již měřena s výstupním filtrem pro pásmo kolem 4MHz. Frekvenční charakteristika je měřena s umělou zátěží 50Ω. Frekvenční charakteristika je v příloze v tabulce 4 a na obrázku 30. Frekvenční charakteristika má 3 maxima: na 0,7MHz, na 4MHz a na 7MHz. Pro frekvence nad 10MHz je útlum přes 20dB.

Převodní charakteristika

Převodní charakteristika byla měřena s umělou zátěží 50Ω. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 5 v příloze. Graf je na obrázku 31 v příloze. Maximální dosažené zesílení je 5,1x. Účinnost předzesilovače je 36%. Převodní charakteristika je téměř lineární.

Konstrukční provedení

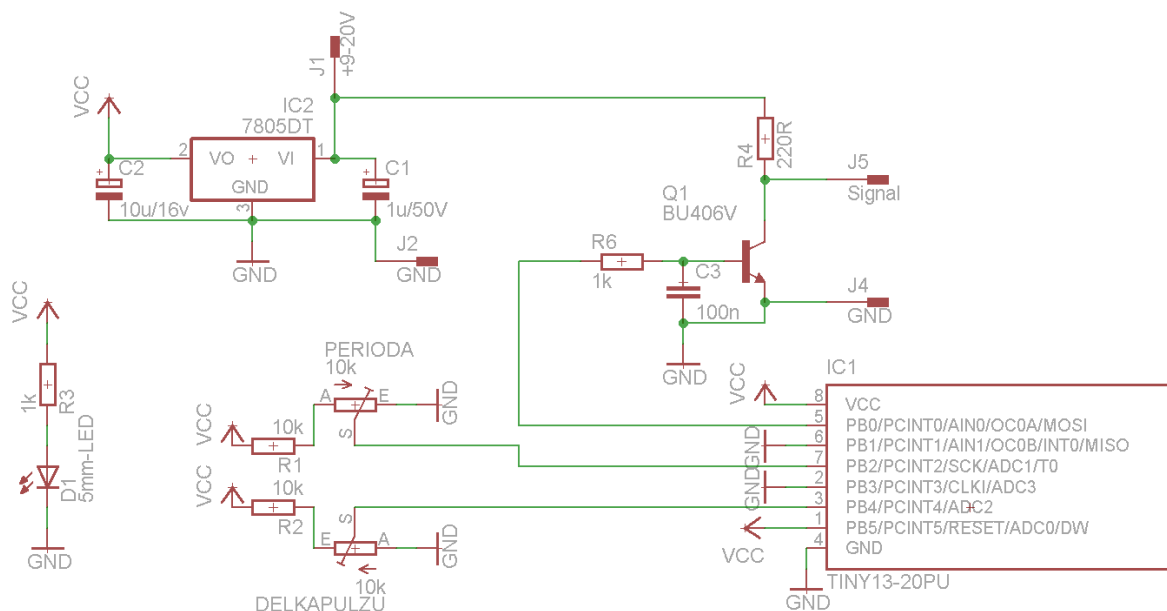
Zesilovač je umístěn do plechové krabičky. Tranzistory musí být opatřeny chladičem, který je pro případ dlouhodobějšího provozu nutné opatřit ventilátorem. Krabička tedy musí být přizpůsobena použití aktivního chlazení. Z konstrukčního hlediska musí být v krabičce otvor pro přitah a otvor pro odtah. Ten by měl být proveden tak, aby byl proud vzduchu co nejefektivnější. Krabička také musí umožňovat přístup pro případné opravy. Výkres krabičky je přiložen v přílohách na obrázku 32. Na následujícím obrázku je hotový předzesilovač:



Obrázek 5: Předzesilovač RF signálu

2.1.2 Generátor obdelníku

Pro vytvoření RF impulsu je potřeba „vyříznout“ pouze krátký časový úsek (kolem $23\mu\text{s}$). K tomu slouží generátor obdelníkového signálu, kterým se moduluje sinusový signál.



Obrázek 6: Schéma generátoru obdelníkového signálu

Generátor obdelníkového signálu (dále generátor), je řízen mikroprocesorem. U generátoru lze řídit šířku pulzu i mezeru za pulzem (tedy frekvenci i střídu). Řídícím

prvkem je potenciometr, který umožňuje citlivou regulaci. Potenciometr funguje jako dělič napětí. Spolu s rezistorem zapojeným v sérii vytváří další dělič. Ten dělí napájecí napětí 5V napůl, protože vnitřní reference v ATtiny13 je 2,56V [20]. Výstup z děliče je přiveden na A/D převodník mikroprocesoru. Ten neustále čte hodnotu, na jejímž základě nastavuje délku pulzu, nebo periodu. Výstup mikroprocesoru je přiveden na výstupní spínací tranzistor. V obvodu lze použít jak MOSFET, tak NPN tranzistor. Pokud je zapojený C3 a do kolektoru se přidá rezistor a výstup bude vyveden přes kapacitní vazbu, je možné generovat i různé signály (například sinusový signál). Stačí vytvořit program, který bude periodicky měnit střídu PWM signálu. Protože R6 a C3 spolu tvoří integrační článek, bude napětí na kondenzátoru postupně klesat a pak stoupat (vytvoří sinusový průběh). Možnost generovat různé průběhy modulačního signálu jsem uvažoval pro možné modulování RF signálu SINC funkcí, při které bude mít výstupní spektrum RF impulzů obdélníkový tvar. Pro modulaci by se ale musel použít kruhový modulátor. To samé lze provést s MOSFET. Pokud se oddělá C3 (a ideálně nahradí 33kΩ rezistorem) a hodnota R6 se změní na cca 22R, bude MOSFET pouze spínat. Napětí pro mikroprocesor zajišťuje integrovaný stabilizátor 7805. Poskytuje až 5W výkon (1A při 5V). Pro výkony nad 2W se doporučuje připevnit chladič. V mém případě je odběr minimální, takže není potřeba stabilizátor chladit. Vstupní napětí může být v rozmezí od 7 do 30V.

Generátor v mém případě nakonec nevytváří signál, ale ukázalo se, že je lepší a jednodušší použít jej jako spínač. Původně jsem uvažoval modulaci signálu v kruhovém modulátoru, nebo jiném podobném schématu. Pro danou aplikaci se ukázalo výhodnější pouze spínat signál (bude popsáno v následující kapitole).

Ke schématu jsem vytvořil plošný spoj, který je připojen v elektronické příloze včetně osazovacího plánu pro Eagle 6.3.

Obslužný program pro generátor je velmi jednoduchý. Kód jsem psal v jazyku C a ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR [19], které mě zapůjčila společnost Energoklastr o.p.s. Program pouze kontroluje jaká je hodnota na vybraných kanálech A/D převodníku. Na jejich základě vytvoří hodnotu, po kterou se čeká při sepnutém výstupu a jak dlouho se čeká při vypnutém výstupu. Celý kód je přiložen v přílohách a kompilovatelná verze a *.hex soubor jsou v elektronické příloze. Nejdůležitější částí kódu je kód umístěný v hlavní smyčce programu:

```
for(;;)
{
    perioda = read_adc(1)*50;           //read A/D
    delkapulzu = read_adc(2)/10;       //read A/D
```

```

PORTB.0 = 0;                //set 0 on out
if (delkapulzu < 2) delkapulzu = 2; //set minimal length of pulse
for (a = 0; a < delkapulzu; a++); //wait for whole pulse

PORTB.0 = 1;                //wait for period
if(perioda < 3) perioda = 3; //set minimal length of period
for (a = 0; a < (perioda); a++) //wait for whole period
{
    delay_us(10);
}
}

```

V kódu je ošetřeno, aby byla vždy nastavena alespoň minimální hodnota délky pulzu. Při práci se zařízením se totiž vždy bude nastavovat délka pulzů pokusně.

Při testování jsem změřil následující parametry:

Vstupní napětí: 12V

Vstupní proud: 50mA

$f_{\min} = 3,3\text{Hz}$

$f_{\max} = 58,8\text{Hz}$

$t_{\text{on-min}} = 2,96\mu\text{s}$

$t_{\text{on-max}} = 95\mu\text{s}$

$t_{\text{off-min}} = 17\text{ms}$

$t_{\text{off-max}} = 300\text{ms}$

$U_{\text{out}} = 5,12\text{V}$.

U výstupních impulzů lze nastavit střídu i periodu v rámci široké škály hodnot. Použité potenciometry nejsou úplně ideální. Lepší variantou by bylo použít například Aripot (víceotáčkový potenciometr), aby bylo možné jemněji nastavovat parametry generátoru, nebo doplnit hlavní potenciometr o druhý potenciometr s hodnotou například $1\text{k}\Omega$. Jedním by se regulovalo hrubě a druhým by bylo možné doladit přesný čas periody nebo šířky pulzu.

2.1.3 Modulace signálu

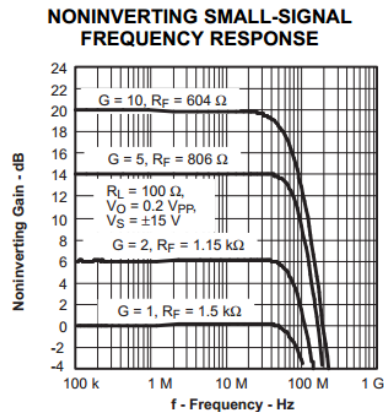
Pro vytvoření RF budících impulzů je nutné modulovat harmonický signál obdélníkovým signálem. Pro konkrétní modulaci lze využít v zásadě dva principy:

spínání signálu nebo modulaci klasickým modulátorem.

Z pohledu účinnosti je lepší variantou spínání pomocí spínacího prvku. Například kruhové modulátory nemají dostatečnou izolaci nežádoucího signálu a musí se tedy používat v kombinaci s dalšími izolačními prvky [25]. Ve chvílích, kdy by měl být signál v nule, tak zde bude poměrně velká amplituda nosného signálu (při měření byla amplituda kolem stovek mV). Oproti tomu pomocí spínacího prvku (speciální integrovaný obvod) lze dosáhnout velkého útlumu nežádoucího signálu (při měření byla amplituda kolem jednotek mV). Pro modulaci je tedy lepší a konstrukčně jednodušší použít integrovaný spínací prvek.

Spínací prvky vyrábí například firma Texas Instruments (dále TI) nebo Maxim Integrated (dále MI). Od firmy MI jsem měl k dispozici obvod MAX358CPE+. Jedná se o multiplexer pro analogové signály s 8 vstupy. Pomocí adresy je možné nastavit, ze kterého vstupu se budou data přenášet na výstup. Pro mou aplikaci stačí pouze jeden vstup a ostatní vstupy jsou připojené na zem. V případě, že potřebuji vytvořit RF pulz, tak na danou dobu spustím čtení z konkrétního kanálu. Nevýhodou tohoto obvodu je celkem velká impedance kanálu. Typicky je kolem $1,5\text{k}\Omega$ [17]. Protože taková impedance utlumí signál, je potřeba jej poté zesílit. Výhodou u tohoto obvodu je velký útlum při vypnutém stavu, kde datasheet [17] udává hodnotu útlumu až 66dB. Výhodou je možné pozdější doplnění o 180° pulzy. Na druhý kanál se jednoduše přivede harmonický signál s dvojnásobnou amplitudou a při buzení se bude vždy přepínat mezi jednotlivými kanály.

Pro zesílení jsem volil zesilovač s operačními zesilovači THS3110. Zesilovač je dvoustupňový a každý kanál má umožněnou regulaci pomocí odporového trimru. THS3110 je operační zesilovač určený pro distribuci video signálu [18]. Má velký výstupní výkon (výstupní proud je až 260mA). Díky tomu, že je operační zesilovač určen pro přenos videosignálu, velmi dobře zvládá přenos na frekvencích v požadovaném pásmu, tedy mezi 1-10MHz.



Obrázek 7: Frekvenční charakteristika neinvertujícího zesilovače, převzato z [18]

Na obrázku je vidět, že zesílení je až do cca 30MHz konstantní. Zesilovač lze ladit přes velké pásmo zesílení, protože až na zesílení 10x dochází k omezení frekvenčního pásma na cca 20MHz.

Schéma celého obvodu je přiloženo v příloze na obrázku 36 a plošný spoj a osazovací plán jsou v elektronických přílohách. Obvod je napájen symetrickým zdrojem do napětí $\pm 15V$, v mém případě to bylo $\pm 12V$. Výstup spínače signálu je zapojen na vstup předzesilovače. Indukčnost vstupu předzesilovače je $7,8 \mu H$. Vstupní impedance předzesilovače na frekvenci 4MHz je 196Ω . S touto zátěží byla proměřena Převodní charakteristika a frekvenční charakteristika. Obě tabulky jsou v příloze, tabulka 6 a 7. Na obrázku 37 lze vidět, že u vyšších frekvencí dochází k poklesu zisku. Je to způsobeno obvodem MAX358, pro který se jedná o už moc velké frekvence, na kterých má špatný přenos. Zesílení v rámci daného frekvenčního pásma se nijak výrazně nemění. Až na vyšších frekvencích je pozorovatelné zvýšení zesílení, avšak to zřejmě způsobila chyba měření u tak malé amplitudy vstupního signálu. U signálů pod 2MHz se vyskytovalo vyšší zkreslení signálu, pravděpodobně vlivem impedančně nepřizpůsobené zátěži. Převodní charakteristika je na obrázku 38. Je téměř lineární, což odpovídá teoretickým předpokladům.

Na obrázcích níže jsou průběhy na výstupu modulátoru při vstupním nosném signálu 4MHz a modulačním signálu ve tvaru obdélníkových impulzů o délce $20\mu s$.



Obrázek 8: Signál na výstupu modulátoru

2.1.4 Výkonový zesilovač

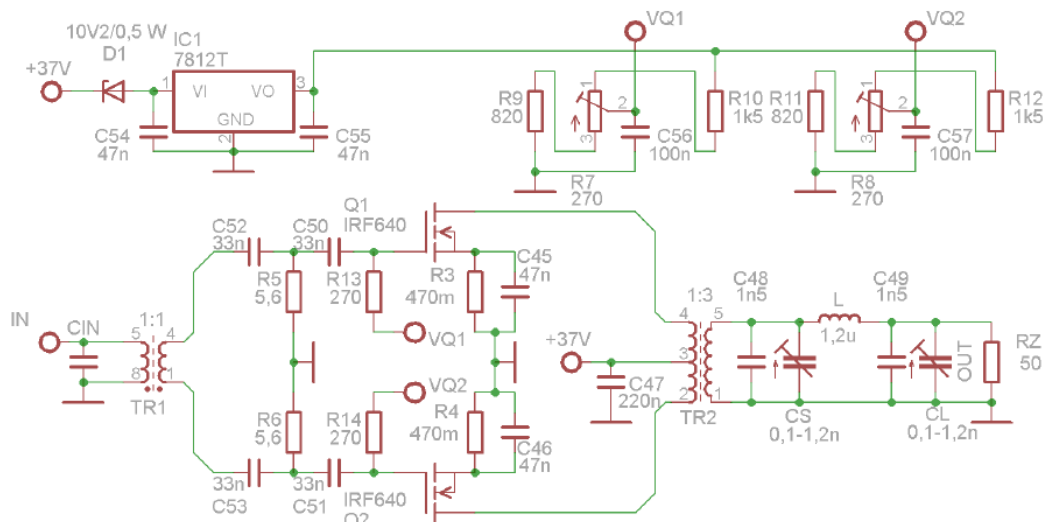
Pro buzení pracovní cívky je potřeba větší výkon (do 60W). Z toho důvodu je potřeba sestavit výkonový zesilovač pro dané frekvenční pásmo. Pracovní frekvenční pásmo zesilovače by mělo být kolem 1-10MHz. Jedná se tedy o širokopásmový zesilovač.

Výkonové zesilovače pro pásmo krátkých vln lze realizovat buď jako laděné zesilovače nebo širokopásmové. Laděné zesilovače mají velkou výhodu v jednoduchosti zapojení, avšak problémem je úzké frekvenční pásmo. Mimo naladěnou frekvenci se rapidně snižuje výstupní výkon. Pro mou aplikaci je potřeba sestavit širokopásmový zesilovač. Zesilovač lze sestavit s třemi druhy aktivního prvku: s elektronkou, bipolárním nebo unipolárním tranzistorem. Původně bylo v semestrální práci uvažováno zapojení s bipolárním tranzistorem. Tyto zapojení mají řadu nevýhod. Hlavní nevýhodou je cena výkonových bipolárních tranzistorů, které zvládají vyšší frekvence. Protože by zesilovač musel pracovat v pracovní třídě B, byly by potřeba dva tranzistory, což by se ještě více promítlo do výsledné ceny zesilovače. U zapojení s bipolárními tranzistory se rozšiřování pásma dělá zpětnou vazbou, která ale snižuje zesílení. Je tedy možné, že pro požadované zesílení by bylo potřeba zesilovač udělat vícestupňový. Podstatně jednodušší řešení je použít zapojení s unipolárními tranzistory. Obvod má jednoduché zapojení, MOSFET tranzistory jsou velmi levné a dokáží pracovat s vysokými frekvencemi a velkými výkony. Z těchto důvodů jsem se rozhodl realizovat výkonový zesilovač s unipolárními tranzistory.

Abych nevymýšlel již vymyšlené, provedl jsem si rešerši již realizovaných zesilovačů pro dané pásmo. Při hledání jsem našel diplomovou práci pana Bc. Petra Zatloukala [8]. Zabývá se v ní návrhem a realizací výkonového zesilovače pro krátkovlnné pásmo. Ve své práci popisuje celkem dvě verze zesilovače. Obě verze jsou si systémem zapojení stejné. U první verze autor vytýká špatné impedanční přizpůsobení vstupu zesilovače a vysokou teplotu tranzistorů při vyšších výkonech. Proto autor konstruoval druhou verzi, kde je použit obvod pro impedanční přizpůsobení v širším frekvenčním pásmu a jsou zde jiné tranzistory, kterých je zapojeno několik paralelně pro snížení tepelné zátěže. Protože výkon, který potřebuji já, je zhruba poloviční oproti zesilovači, který je konstruován v [8], rozhodl jsem se použít první variantu zesilovače. Špatné impedanční přizpůsobení mě nevádí, protože bude zesilovač určen pro aplikaci pouze s jedním typem předzesilovače, u kterého bude vhodně zvolena výstupní impedance.

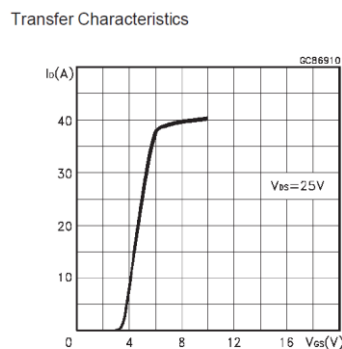
Jako problém by se mohlo jevit přehřívání tranzistorů. Autor při konstrukci používal pouze pasivní chlazení, v čemž mohl být onen problém. U pasivních chladičů je mnohem nižší účinnost odvodu tepla. Autor používal rozměrově velmi velké chladiče se snahou zvýšit odvod tepla z tranzistorů. Bohužel distribuce tepla v chladiči je pomalá, tím pádem se stejně teplo bude akumulovat nejvíce v okolí tranzistoru. Tento konstrukční problém lze vyřešit jednoduše pomocí aktivního chlazení. Tímto jsem eliminoval nevýhody první verze zesilovače a díky jednoduché konstrukci jsem se rozhodl realizovat tuto verzi.

Zesilovač pracuje v režimu push-pull. Schéma je na následujícím obrázku:



Obrázek 9: Schéma výkonového zesilovače, převzato z [8]

Zesilovač pracuje na jednoduchém principu. Kladné půlvlny otevírají jeden tranzistor a záporné druhý tranzistor. Tranzistory mají nastavený pracovní bod na začátek přenosové charakteristiky, která má následující průběh:



Obrázek 10: Převodní charakteristika IRF640, převzato z [21]

Tranzistor má nastavený pracovní bod kolem 3,7V. V případě, že na gate přijde kladná půlvlna, dojde k postupnému otevření a převedení vstupního sinusového půlvlnného napětí na stejný průběh proudu výstupním transformátorem. Stejný děj probíhá i na druhém tranzistoru, ale s opačnou půlvlnou. Výstupní transformátor má za cíl složit tyto půlvlny opět do jednoho sinusového signálu.

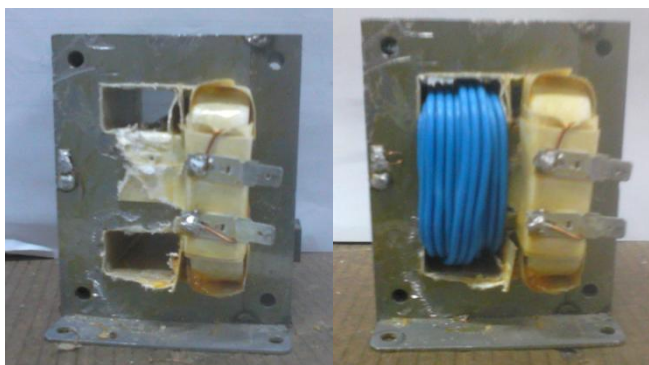
Zesilovač musí mít napájecí zdroj o dostatečném výkonu. Tento zdroj bylo nutné vyrobit. V semestrálním projektu byl navrhován zdroj, který by měl pro toto zapojení vysoké napětí. Proto je potřeba vytvořit zdroj nový, který bude mít výstupní napětí kolem 38V. Důležitý je maximální výkon zdroje. Dle mnou prováděné rešerše měli výkonové zesilovače v krátkovlnném pásmu většinou účinnost kolem 50%. Z toho vyplývá, že pokud požadují výstupní výkon do 100W, potřebují napájecí zdroj, který zvládne dodat výkon 200W, ideálně lépe.

2.1.5 Realizace výkonového zesilovače

Realizaci výkonového zesilovače lze rozdělit na celkem tři části: část napájecího zdroje, část zesilovače a mechanické konstrukční části.

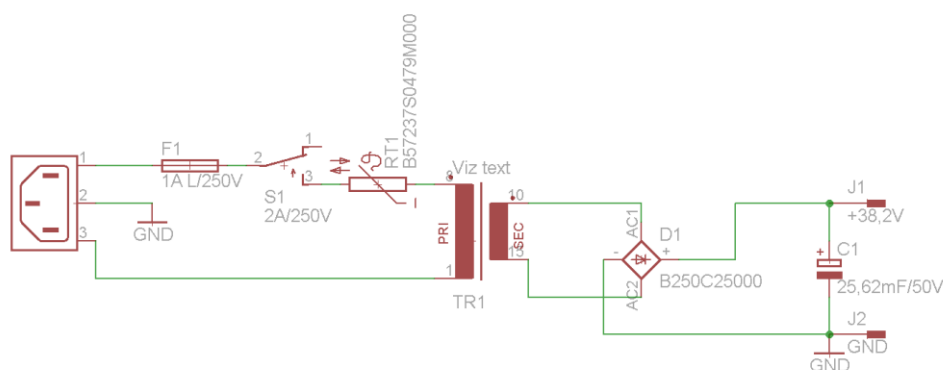
Napájecí zdroj

Pro zajištění dostatečného výkonu jsem musel použít velký transformátor. Protože nákup nového by byl dosti nákladnou záležitostí, rozhodl jsem se převinout transformátor z mikrovlnky. Ten se mně už dříve osvědčil jako výkonný zdroj malých napětí. Transformátor v mikrovlnce (MOT – Microwave oven transformer) slouží pro napájení magnetronu. Ten vyžaduje vysoké napětí a velký výkon. MOT je většinou stavěn na krátkodobý výkon, který přibližně odpovídá udávanému výkonu na mikrovlnce (v mém případě 800W). V praxi je ale lepší ho používat maximálně na poloviční hodnotu výkonu, než bylo na mikrovlnné troubě. Primární vinutí je na 230V a sekundární na několik jednotek kV. Pro předělání na zdroj nízkého napětí je potřeba úplně odstranit sekundární vinutí a navinout nové.



Obrázek 11: Úprava MOT pro nízké výstupní napětí

Na obrázku 11 vlevo je transformátor s odstraněným sekundárním vinutím. Na snímku vpravo je transformátor s již nově navinutým sekundárním vinutím. Vinutí má celkem 5 vrstev vinutí. Celkový počet závitů je 28 závitů (dle vrstev 1. - 5.: 8z, 9z, 8z, 3z). Za transformátorem je napojen usměrňovací můstek B250C25000. Ve zdroji je filtrační kondenzátor složený z různých elektrolytických kondenzátorů celkem z 26 kusů. Všechny musí být na napětí minimálně 50V. Celková kapacita je 25620 μ F. Schéma zdroje je na obrázku:



Obrázek 12: Schéma napájecího zdroje zesilovače

Při napájení na zesilovači je při nulové zátěži zesilovače napětí na zdroji 38,6V a zvlnění je 150mV. Při odebíraném proudu kolem 2A se sníží napětí na 35V.

Zesilovač

Vlastní zesilovač je postaven podle schématu první verze zesilovače popsaném v [8]. Schéma je uvedeno na obrázku 39. Plošný spoj jsem prvně vyrobil pouze pro účely otestování funkce, avšak kvůli funkčnosti a ekonomickým výhodám jsem se rozhodl nechat zapojení na testovací desce. Plošný spoj jsem překreslil v software Eagle, aby byla deska zdokumentovaná. Plošný spoj je přiložen v elektronických přílohách a na přiloženém CD.

Při stavbě jsem musel vyrobit vstupní a výstupní transformátor. Vstupní transformátor je na jádře AMIDON FT82-43. Primární i sekundární vinutí má 5 závitů vinutých bifilárně. Výstupní transformátor musí zvládnout výkony kolem 100W. Výstupní transformátor je na jádře AMIDON FT140-43. Primární vinutí má 2x5 závitů a sekundární vinutí má 15 závitů. Vinutí jsou vinuta trifilárně a zbytek sekundárního vinutí je navinut do mezer. Vstupní a výstupní transformátor by neměli být blízko sebe,

jinak hrozí vznik zpětné vazby, která může vést v krajním případě i k destrukci zesilovače.

Tranzistory použité pro realizaci zesilovače jsou umístěny na chladiče, které jsou původně pro pouzdro TO3, ale lze je použít i pro TO-220. Pro lepší přenos tepla z pouzdra tranzistoru je tranzistor umístěn přímo na chladič. Tím je chladič spojen s drainem tranzistoru. Tranzistory tedy nemůžou být na společném chladiči. Chladiče jsou uchyceny na společné destičce pomocí plastových distančních sloupcích a je zajištěno, aby se nedotýkali. Chlazení zajišťují dva PC ventilátory. Jeden má průměr 120mm a druhý 90mm. Menší ventilátor je umístěn u napájecího konektoru a zajišťuje přítah vzduchu a zároveň ofuk jednoho tranzistoru. Druhý tranzistor je ofukován primárně větším ventilátorem. Oba ventilátory mají napájecí napětí 12V (velký může být napájen i více, maximálně však 15V). Abych nemusel přidávat další stabilizátor, vyřešil jsem napájení srážecím odporem. Výpočet srážecích odporů je níže:

$$R_{120mm} = \frac{38V - 14V}{0,06A} = 400\Omega$$

$$P_W = 0,06A * 14V = 1,44W$$

$$R_{120mm} = \frac{38V - 12V}{0,12A} = 216\Omega$$

$$P_W = 0,12A * 12V = 3,12W$$

Nejbližší hodnotám jsou v řadě 220 Ω a 390 Ω . Použité rezistory jsou na 5W a 2W.

Frekvenční charakteristika zesilovače

Zesilovač je širokopásmový. Hlavním prvkem, který určuje přenášené pásmo je materiál jader transformátorů. Pro mou práci jsem použil materiál 43, který je určen pro pracovní frekvence od 0,5 do 20MHz pro výkonové aplikace. Rozsah pásma jsem otestoval. Na vstup zesilovače jsem připojil generátor signálů a výstup jsem snímal osciloskopem. Na výstupu zesilovače nebyla připojena zátěž. Na vstupu zesilovače byla vstupní amplituda 1V. Naměřené charakteristiky jsou v přílohách.

Z naměřené charakteristiky vyplývá, že největší zesílení je v pásmu od 0,6MHz do 0,8MHz. Druhé pásmo s relativně velkým zesílením je 11MHz až 17MHz s maximem na 15MHz. Zesílení se pohybuje v rámci celého pásma nad 12dB. Pro buzení vzorku stačí výkon kolem 30-40W, takže není potřeba velké zesílení. Předzesilovač má výstupní výkon do 5W, takže je jedno, v kterém pásmu bude

zesilovač používán.

Protože je výstup zesilovače nepřizpůsoben impedanci, je nutné přidat výstupní filtr, který je zde realizován π -článkem. Přidáním filtru se výrazně změní frekvenční charakteristika. Naměřená charakteristika je v tabulce XX a graf je na obrázku XX v přílohách. Oproti charakteristice bez filtru se charakteristika s filtrem podobá úzkopásmovému zesilovači. Má to svou výhodu, protože filtr ořeže nepotřebné vyšší či nižší harmonické, které by vytvářeli zkreslení signálu. Nevýhodou je, že filtr je úzkopásmový a je třeba jej přeladit v případě změny frekvence harmonického signálu.

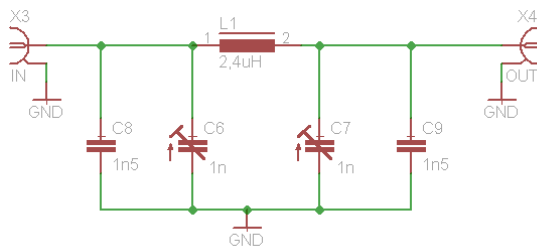
Převodní charakteristika

U každého zesilovače je důležité zjistit přenosovou charakteristiku. Převodní charakteristika říká, jaká výstupní amplituda je při dané vstupní amplitudě signálu. Měření jsem prováděl na frekvenci 3,7 MHz. Naměřené charakteristiky jsou v přílohách. Na obrázku 40 je vidět, že převodní charakteristika je téměř lineární do výkonu kolem 10W. Nelinearita charakteristiky se od 10W zvyšuje, ale není výrazně omezující pro funkci zesilovače až do výkonů kolem 40W, kde již začíná zesilovač zakmitávat, což je způsobeno konstrukčním provedením. V kapitole 1 jsem dospěl k výkonu 17W, což se již nachází v nelineární části charakteristiky, ale je to v oblasti, kdy ještě pracuje zesilovač spolehlivě.

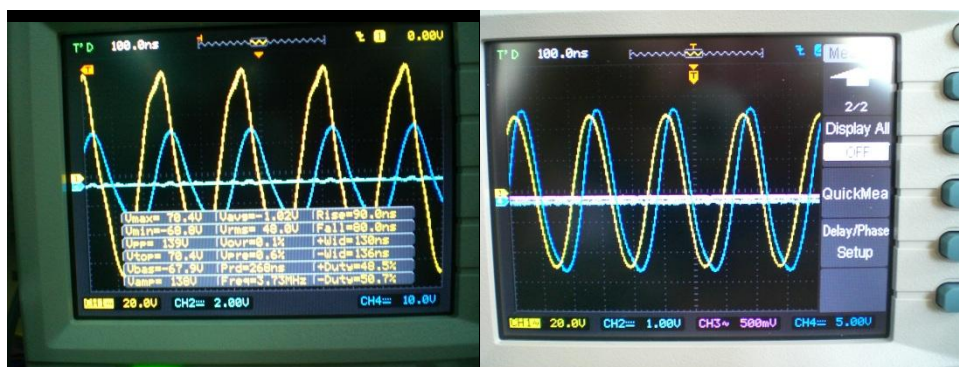
Impedanční přizpůsobení zátěži

Výstupní pracovní cívka má indukčnost kolem $1,7\mu\text{H}$. Na frekvenci 4MHz je impedance $42,73\Omega$. Indukčnost sekundárního vinutí výstupního transformátoru je $153\mu\text{H}$. Výstupní impedance je 3845Ω . Pro přizpůsobení impedancí se používají různá zapojení RLC obvodů. Ing. Zatloukal ve své práci [8] uvádí, že výstupní filtr má též funkci impedančního přizpůsobení. „Dalším úkolem výstupního filtru může být finální výkonové přizpůsobení (rezonance, stejné reálné části impedance zátěže a výstupní impedance zesilovače) výstupního obvodu zesilovače a antény“ [8].

Prvně jsem měl zesilovač bez výstupního filtru a výkon byl velmi malý. Maximální výkon byl kolem 10W. Po přidání výstupního filtru se najednou zvýšil výkon až na cca 60W. Výstupní filtr je tvořen π -článkem. První realizace (se kterou jsem prováděl měření) měla vzduchovou cívku. Druhá realizace má cívku na železoprachovém jádře Amidon T94-2. Kondenzátory jsou laditelné (ze starých radií). S železoprachovým jádrem jsem dosáhl sice menšího výstupního výkonu, ale čistšího výstupního spektra.



Obrázek 13: Laditelný výstupní filtr



Obrázek 14: Zkreslení výstupního signálu

Na levém snímku je vidět výstupní signál s filtrem, který měl cívku bez jádra a na snímku vpravo je vidět signál po průchodu filtrem s železoprachovým jádrem.

Konstrukční řešení

Protože je zesilovač složen z několika dílčích obvodů, musel jsem vyřešit, v jakém krytu bude zesilovač zabudován, aby byl mechanicky odolný a zároveň bezpečný, protože pracuje se síťovým napětím. Nákup nebo výroba boxu přímo na míru by byly drahou záležitostí, proto jsem využil dostupné díly. Nejvhodnější pro výrobu boxu bylo použít starý PC box. Zesilovač zabudovaný do PC boxu je na následujícím obrázku:



Obrázek 15: Výkonový zesilovač zabudovaný do boxu

Box je rozdělen na dvě části: napájecí a zesilovací. Napájecí část se nachází ve spodní části boxu. Je zde umístěn výkonový transformátor, usměrňovací můstek a filtrační kondenzátor, který je složený ze dvou desek s kondenzátory. Termistor a pojistka jsou uchyceny u vypínače na předním panelu.

V horní části boxu je vlastní zesilovač. Blíže k zadní straně boxu jsou umístěny tranzistory s chladiči. Pro zajištění maximálního chlazení nejsou tranzistory od chladičů izolované. Proto byla potřeba konstrukčně zamezit možnému dotyku chladičů, protože jinak by se zkratovaly driny obou tranzistorů. Oba chladiče jsou uchyceny na plechové destičce pomocí plastových distančních sloupků. Bakelitová destička je uchycena na bocích boxu pomocí šroubů. Jeden ventilátor je umístěn na mřížce původního napájecího PC zdroje, vedle přívodního síťového konektoru. Druhý ventilátor je umístěn nad tranzistorem pomocí L profilu. Protože je box určen pro počítač obsahuje řadu otvorů pro konektory a další součásti, takže jsem nemusel řešit odtaž z boxu, protože je dostatečně perforovaný.

Obvod výkonového zesilovače je umístěn blíže k přední straně boxu, aby byl co nejkratší přívodní kabel vstupního a výstupního signálu. Obvod výkonového zesilovače je uchycen na plechové destičce, která je pro izolaci překryta bakelitovou destičkou. Vstupní konektor je typu BNC a výstupní konektor je typu UHF. Oba konektory jsou umístěny na hlavním panelu zesilovače. Mezi konektory je umístěna ještě dioda, která indikuje zapnutí zesilovače.

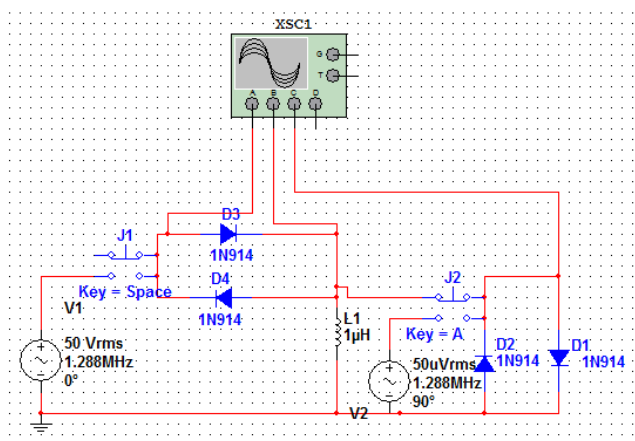
Zesilovač je zakrytován pomocí krytu z pocínovaného plechu o síle 0,35mm. Pohled na kompletní zesilovač je na obrázku 7:



Obrázek 16: Pohled na kompletní zakrytovaný výkonový zesilovač

2.1.6 Výstupní diody a ochranné diody

Jako ochranné diody jsem zvolil 1N914. Jsou zapojeny, tak jak bylo popsáno již v rámci semestrálního projektu. Schéma zapojení je na následujícím obrázku:



Obrázek 17: Ochranné diody

Na schématu je pracovní cívka L_1 , Výkonový zesilovač je reprezentovaný zdrojem V_1 poskytujícím sinusový průběh napětí o amplitudě 50V. Dále je v obvodu zdroj V_2 , který poskytuje sinusové napětí o amplitudě $50\mu\text{V}$ a reprezentuje FID signál. Spínač J_1 připojuje k pracovní cívce napětí z výkonového zesilovače a spínač J_2 simuluje vznik FID signálu. S pracovní cívkou jsou v sérii zapojené diody D_3 a D_4 . Tyto diody slouží k zamezení šíření FID signálu zpět do výkonového zesilovače a také k odfiltrování signálu mezi budícími sekvencemi, který by překryl FID signál. FID signál je totiž natolik malý, že neotevře diody, kdežto signál se zesilovače jej bez problému otevře. Pro ochranu vstupu snímacího předzesilovače slouží diody D_1 a D_2 . Opět platí, že FID

signál diody neotevře, ale signál z výkonového zesilovače je otevře a v podstatě se přesně uzemní v případě, že by se dostal na vstup snímacího zesilovače. Na schématu je použit vždy jen jeden pár diod. Protože proud, který bude protékat pracovní cívkou je kolem 0,5A, bude potřeba použít minimálně 5 párů diod, jak u oddělovacích, tak u ochranných diod, protože proud jednou diodou je maximálně 0,2A a k tomu radši počítám značnou rezervu, aby zbytečně nemohlo dojít k průrazu.

Diody musí zvládat vysoké frekvence, takže by měli mít co nejkratší zotavovací dobu. Ideální je použít diody pro malé signály, aby docházelo k co nejmenšímu ořezání hodnot výstupního výkonového signálu v oblasti kolem 0V. Diody se musí otevírat až nad amplitudou FID signálu. Dle informací uvedených na [9], bylo na podobném systému, jaký je předmětem mého návrhu, naměřen FID/ECHO signál u vzorku vody o amplitudě 100mV-200mV při zesílení snímaného signálu 10000x, takže amplituda FID signálu je kolem 10 μ V. Takto malé napětí neotevře prakticky žádnou běžně dostupnou diodu.

Pro tento účel se velmi hodí například diody 1N914, což uvádí i například [25], které stojí kolem 2,5Kč/kus. Zvládají pulzně až 1A, takže v případě použití 5 párů bude značná rezerva, aby se omezilo namáhání diod.

Pro diody nebyla dělána speciální deska a jsou zapojeny přímo na výstupní kabel v měřicí komoře. Ochranné diody jsou také zapojeny přímo na desce přijímacího zesilovače.

Zapojení použité v mém zařízení je nejjednodušší variantou sondy k NMR zařízením. Chen ve své publikaci [25] uvádí i další možné varianty zapojení, kdy pro nižší frekvence je například vhodné zařadit před ochranné diody snímacího zesilovače ještě π -článek, případně jsou zde i složitější varianty s dalšími laděnými obvody.

2.2 Pracovní cívka

Pracovní cívka byla z části realizována již v rámci semestrálního projektu. Sestrojil jsem držák magnetů, který jsem připevnil na nosnou dřevěnou desku. Pro finální verzi bylo potřeba: uchytit pracovní cívku, uchytit magnety, vyrobit stíněný kryt.

Pokud se bude manipulovat s magnetem, přesune se střed vzdálenosti obou magnetů mimo pozici pracovní cívkou. Tu je třeba přesunout do středu. Pracovní cívka tedy musí mít v určitém rozmezí možnost posuvu. Pracovní cívka je uchycena pomocí lišt, které v sobě mají drážku. Lépe je to vidět na obrázku:



Obrázek 18: Úchyt pracovní cívky

Na obrázku je nosná lišta. Celý úchytný systém je z pocínovaného plechu, aby bylo možné připojit vodiče měkkou pájkou. Vývod pracovní cívky je na malé kovové destičce s šrouby. Pomocí šroubů lze pracovní cívku povolit a posunout do jiné pozice. Následným utahením šroubů se provede aretace. Matky šroubů jsou na destičce fixovány, takže pro povolení a utahení stačí pouze šroubovák. Jedna lišta (ta na obrázku) má i ukazatel, aby bylo možné pomocí stupnice přesně nastavit vzdálenost od magnetu.

Při usazování magnetů ne nevyskytl žádný problém. Na zadní straně magnetu jsem umístil podložku z plastu, která usnadnila montáž a také chrání povrch magnetu. Magnet nebylo potřeba ničím fixovat, protože drží v kovovém držáku pomocí vlastního magnetického pole.

Protože je na pracovní cívce poměrně velký výkon, je potřeba komoru dostatečně odstínit, aby signál nerušil radiové vysílače pracující v daném pásmu (v pásmu kolem 1MHz vysílají stanice s amplitudovou modulací). Stínění je vyrobeno s pocínovaného plechu o síle 0,4mm. Plech je umístěn jak pod nosnou deskou, tak kolem celého prostoru pracovní cívky. V krytu je otvor pro přívod signálu z výkonového zesilovače a otvor pro výstup do snímacího zesilovače. Zakrytovaná pracovní cívka je na následujícím obrázku:



Obrázek 19: Zakrytovaná pracovní cívka

2.3 Příjímač FID/ECHO signálu

Příjímač FID/ECHO signálu (dále přijímač) slouží k zesílení a snímání FID či ECHO signálu z pracovní cívky. Skládá se z ochrany zesilovače a snímacího zesilovače.

2.3.1 Ochrana předzesilovače

Ochranu předzesilovače zajišťují ochranné diody, které byly popsány již v podkapitole 2.1.6.

2.3.2 Snímací zesilovač

Na snímací zesilovač je hlavním požadavkem velmi velké zesílení, až v řádu tisíců. Pro spolehlivou činnost operačního zesilovače je lepší volit menší zesílení a spojit více stupňů dohromady. Má to dvě opodstatnění. Za prvé u většiny operačních zesilovačů spolu s rostoucí frekvencí klesá maximální možné zesílení a za druhé v případě tak velkého zesílení by výstup ovlivňoval vstup zesilovače a celý obvod by se rozkmital, případně i zničil.

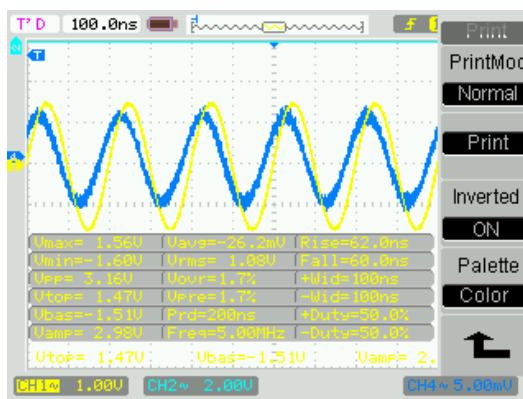
V semestrální práci byl navržen snímací zesilovač se dvěma stupni. Finální zapojení je inspirováno zapojením uvedeném v článku [9]. Oproti původnímu zapojení jsem doplnil regulaci zesílení posledního stupně. Musel jsem také přepočítat pásmové propusti mezi jednotlivými stupni a zvýšil jsem zesílení jednotlivých stupňů. Schéma obvodu je uvedeno v příloze na obrázku 44.

U prvních dvou stupňů je zesílení nastaveno pevně na 23x. U posledního stupně je možné regulovat jeho zesílení pomocí trimru R6 v rozmezí 1x až 11x.

Jako operační zesilovač jsem zvolil LMH6609, stejně jak uvádí [9]. Jedná se o operační zesilovač určený pro integrátory, aktivní filtry či video aplikace. Operační zesilovač se napájí pomocí symetrického ± 3 až ± 5 V. Další výhodou je široké frekvenční pásmo, které sahá až na 900MHz. Zisk v potřebném pásmu (1-10MHz) je od 40 do 20dB. V zesilovači je použito zesílení maximálně 23x (26,8dB), což splňuje frekvenční omezení operačního zesilovače, protože na frekvenci 4-5MHz je možné nastavit zisk na až 30dB [26].

U pásmových propustí je potřeba naladit rezonanční frekvenci. Laditelné pásmo lze měnit kapacitou kondenzátorů C_{17} a C_{18} . Pro pásmo kolem 4MHz je hodnota 68pF a pro pásmo kolem 5MHz je hodnota 33pF. Samozřejmě je možné naladit i jiné frekvenční pásma, ale pro ty jsem již hodnoty nedopočítával. Jemné doladění je možné provést pomocí laditelných kapacitních trimrů, které jsou v sérii s danými kondenzátory.

Pro zapojení jsem navrhl plošný spoj, který je přiložen v elektronické příloze. Po osazení jsem proměřil frekvenční charakteristiku a zkontroloval zesílení, jestli odpovídají stanoveným parametrům. Snímací zesilovač je velmi úzkopásmový, což ukazuje frekvenční charakteristika snímacího zesilovače na obrázku 47. Díky úzkopásmovosti zesilovače je výstupní spektrum velmi čisté, což ukazuje následující obrázek:



Obrázek 20: Signál na vstupu a výstupu snímacího zesilovače

Při měření jsem zjistil, že zesílení není takové, jaké jsem si volbou součástek nastavil. Pro zesílení u operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení platí:

$$U_{výstupní} = U_{vstupní} * \left(1 + \frac{R_{zpětnovazební}}{R_1}\right) \quad (8)$$

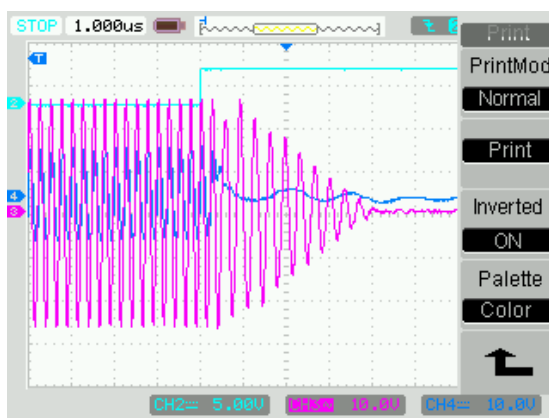
Pro hodnotu zpětnovazebního rezistoru 2200Ω a $R_1 = 100\Omega$ je hodnota zesílení 23 a zisk 26,85dB. Hodnota je v rozmezí, které by měl daný operační zesilovač zvládat. Při třech zesilovacích stupních, kdy první a druhý má zesílení 23 a třetí má zesílení 11 by mělo být celkové zesílení 5819x. Při pohledu na obrázek 20, lze spočítat, že zesílení je pouze 312x, což je velmi mimo teoretický předpoklad. Při zesílení 5819x by měla být výsledná hodnota napětí 29V. Jediné možné vysvětlení je, že filtry mezi jednotlivými stupni mají celkem velký útlum, takže eliminují zesílení jednotlivých stupňů.

Při dalším testování bude snímací zesilovač doplněn o další stupeň, aby bylo možné dosáhnout požadovaného zesílení. Tyto měření však jsou již nad rámec tohoto textu.

3 TESTOVÁNÍ SYSTÉMU JAKO CELKU

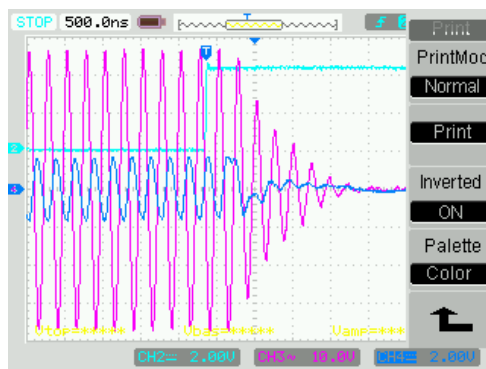
V současné podobě se nepodařilo dosáhnout kýženého výsledku. Jednotlivé součásti fungují správně (vycházím z naměřených charakteristik jednotlivých obvodů), ale jako celek zatím nebyl systém zprovozněn. Při testování se ukázalo, že má systém základní nedostatek kvůli doznění obvodu po buzení.

Při vypnutí RF impulsu dochází na cívce k tlumeným kmitům, které při daných parametrech ($f=4\text{MHz}$, $L=1,7\mu\text{H}$, $U_{\text{max}}=27\text{V}$) vypadají následovně:



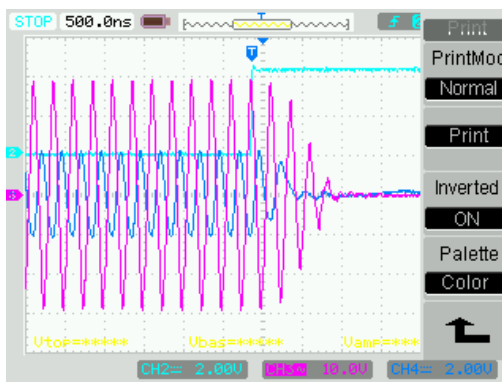
Obrázek 21: Tlumené kmity po skončení RF impulsu

Dle mého názoru jsou způsobeny tlumivkou a kapacitou v π -článku. Frekvence tlumených kmitů byla $2,6\text{MHz}$ a při propočtu jsem zjistil, že se jedná o rezonanční frekvenci tlumivky a výstupní kapacity π -článku. Vyzkoušel jsem změnit hodnotu kapacity a došlo ke změně frekvence tlumených kmitů a také ke změně doby trvání tlumených kmitů. Empiricky jsem zjistil, že nejkratší kmitů jsou s hodnotami π -článku: vstupní kapacita 1nF , výstupní kapacita 300pF a indukčnost: $5,88\mu\text{H}$. Změna délky sice není až tak rapidní, ale došlo ke zrychlení vybíjení kapacity. Délka sice byla stejná, ale už od cca $1\mu\text{s}$ byla velmi nízká amplituda kmitů. Přidáním dalších výstupních diod do série k pracovní cívce se mě podařilo ořezat kmitů s nízkou amplitudou tak, že tlumené kmitů na pracovní cívce dozní již do $1\mu\text{s}$. Předpokládaná délka FID signálu je kolem $20\mu\text{s}$.



Obrázek 22: Snížení amplitudy a doby trvání tlumených kmitů

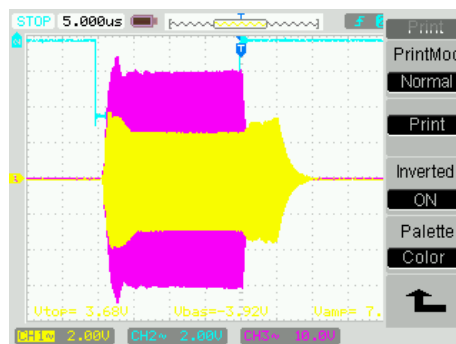
Na obrázku je detail tlumených kmitů po skončení RF impulsu. Vyladěním obvodu došlo k výraznému zlepšení především zkrácením doby trvání tlumených kmitů. Po přidání dalších výstupních diod do série s pracovní cívkou došlo k dalšímu zkrácení tlumených kmitů.



Obrázek 23: Tlumené kmity po přidání dalších výstupních diod

Po přidání diod již není zkrácení až tak markantní, avšak každé zkrácení je užitečné protože bude možné snímat dříve FID signál.

Tlumené kmity se přenáší i na snímací zesilovač, který je ještě zesílí i v části, kde jsou téměř utlumeny. Výstupní signál ze snímacího zesilovače vypadá následovně:



Obrázek 24: Tlumené kmity na snímacím zesilovači

Růžový průběh je měřen na pracovní cívce. Žlutý průběh je měřen na výstupu snímacího zesilovače. Při zapnutí a vypnutí RF impulzu dojde k zákmitům, které se na snímacím zesilovači ještě zesílí. Bohužel délka a tvar připomíná FID signál, takže pravý FID signál, je překryt těmito tlumenými kmity. Zatím jsem nedošel na to, jestli jsou tyto tlumené kmity na pracovní cívce (a pouze zesílené snímacím zesilovačem), nebo jestli vznikají i ve snímacím zesilovači, ale spíše se klaním k variantě, že jsou to zesílené tlumené kmity z pracovní cívky. Řešením by mohl být jiný způsob výstupní filtrace a impedančního přizpůsobení výstupu zesilovače pracovní cívce.

4 NEDOSTATKY TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ

Nyní se zaměřím na možné problémy, které se vyskytly během realizace. U každého bodu bude stručně shrnut jeho obsah a možné řešení.

4.1 Tlumené kmity po vypnutí RF impulzu

Tlumené kmity po vypnutí RF impulzu jsou jedním z hlavních nedostatků řešení. Jsou způsobeny π -článkem na výstupu výkonového zesilovače. Výstupní filtr není konstruovaný na okamžité vypnutí, protože jeho kapacity a indukčnost tvoří kmitavý obvod a energie uložená v kondenzátorech se po vypnutí ještě musí vybit. Správným naladěním filtru lze tento jev velmi eliminovat, ale nikdy nelze dosáhnout úplného odstranění. Tento jev bohužel znemožňuje měřit FID signál ihned po doznění RF impulzu.

Tlumené kmity i po výrazném potlačení nejsou eliminovány dostatečně. Částečně šly eliminovat pomocí výstupních diod, ale pro snímací zesilovač nebyly utlumeny dostatečně. Pro odstranění problému lze buď vyzkoušet jiné diody, které mají větší otevírací napětí, nebo lépe vyladit výstupní obvody, aby nedocházelo k tlumeným kmitům.

4.2 Nehomogenita magnetického pole

Nehomogenita magnetického pole byla diskutována již v rámci semestrálního projektu. V příloze na obrázku 25 a v tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty magnetické indukce, které jsem získal výpočtem. Je zde vidět, že magnetické pole se vzdáleností od magnetu snižuje. Tím se mění Larmorova frekvence a budí se menší část vzorku. Díky obdélníkovým budícím pulzům se spektrum rozšíří a tím je buzen větší objem vzorku, avšak s jinými frekvencemi. To zanáší nepřesnosti do výstupního signálu, protože signály se sčítají. Pro zařízení by bylo ideální homogenizovat magnetické pole například pomocí elektromagnetu, který by vyrovnával pokles magnetické indukce.

4.3 Úzkopásmovost výkonového zesilovače

V semestrálním projektu jsem chtěl dosáhnout co nejširšího frekvenčního pásma u všech zesilovačů. V praxi se ukázalo, že dané obvody, které jsem použil pro realizaci,

bylo nutné naladit pomocí výstupních filtrů, jinak obvody neměli patřičné parametry. Tím však došlo k výraznému zúžení frekvenčního pásma zesilovačů. Pro rozšíření pásma by museli být všechny výstupní filtry laditelné, nebo by se musely sestrojít jiné varianty zesilovačů, které jsou řešeny jako širokopásmové.

4.4 Úzkopásmovost snímacího zesilovače

Snímací zesilovač má velmi úzké přenášené frekvenční pásmo. V kapitole 1 jsem počítal šířku pásma a frekvence, na kterých bych chtěl vzorek budít. Pro RF impuls o délce trvání $20\mu\text{s}$ jsem získal hodnotu $0,3\text{MHz}$. V tomto pásmu ještě pracuje zesilovač s dostatečným zesílením. Při větším pásmu (například $0,7\text{MHz}$, jak by bylo potřeba pro buzení celého objemu vzorku) by již snímací zesilovač nezesílil celé frekvenční pásmo, takže by buzení celého objemu nemělo smysl.

Řešením by bylo navrhnout mezi zesilovací stupně širokopásmový filtr, který by měl šířku spektra například kolem 1MHz , aby bylo efektivní budít celý objem vzorku.

4.5 Nedostatečné zesílení snímacího zesilovače

Při měření charakteristik snímacího zesilovače jsem zjistil, že reálné zesílení neodpovídá nastavenému. Dosažené zesílení je o řád nižší, než požadované. Zatím jsem nedošel k závěru, z jakého důvodu je zesílení nižší.

Pokud se povede odstranit tlumené kmity a FID signál stále nebude možné měřit, bude nutné přidat ještě další zesilovací stupeň do snímacího zesilovače.

5 NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

I přes současnou nefunkčnost celé sestavy jsem se rozhodl navrhnout laboratorní cvičení. Předpokládám totiž další práci na projektu a zprovoznění celého zařízení. Laboratorní úloha bude kolektivní a bude se skládat ze dvou částí:

- Testování vlivu změny magnetické indukce a frekvence
- Testování různých vzorků

Pro obě varianty měření je v příloze vytvořen společný protokol, který by měl být předlohou pro tvorbu laboratorních cvičení.

6 FINANČNÍ ROZVAHA PROJEKTU

V tabulce níže jsou uvedeny náklady na jednotlivé obvody přístroje.

Název	Počet kusů	Cena celkem v Kč
Permanentní magnet 50x50x20mm	2	2650
Předzesilovač	1	350
Výkonový zesilovač	1	650
Snímací zesilovač	1	100
Modulátor	1	150
Generátor obdélníku	1	100
Ochranné diody 1N914	12	20
BNC konektory	20	300
Pasivní součástky (rezistory, kondenzátory, cívky)	X	100
Pocínovaný plech	1	160
Konstrukční materiál	X	100
Koaxiální kabel	X	238
Fotocuprexit A4	1	210
Cena celkem		5128Kč

Tabulka 1: Finanční rozvaha projektu

Oproti úvaze v semestrální práci jsem převýšil rozpočet nad stanovený limit o 128Kč. Navíc jsem použil mnoho součástek z „šuplíkových zásob“. Mezi nejdražší položky patří bezpochyby magnety, na které jsem navíc zajistil slevu 10% oproti maloobchodní ceně. Protože jsem nakonec použil jiné zapojení výkonového zesilovače, zůstal mě nevyužitý tranzistor 2N6341. Bude přidán do skladových zásob VUT, pro možné jiné aplikace, čímž se vyrovná překročení limitu (jeho cena je 146Kč).

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout laboratorní pomůcku pro prezentaci jevu nukleární magnetické rezonance po teoretické i praktické stránce. V rámci semestrální práce jsem se zabýval teoretickým návrhem jednotlivých komponent. Dílčí technická řešení se ukázala nedostatečná, a proto v rámci bakalářské práce byly některé části pozměněny či úplně přepracovány.

V rámci bakalářské práce jsem se zaměřil na konstrukci jednotlivých komponent. Stanovil jsem si konkrétní požadavky na obvody a jejich výstupní charakteristiky. Po rešerši dostupných řešení a obvodů pro podobné aplikace jsem sestrojil několik variant jednotlivých obvodů a po zjištění parametrů obvodu jsem vybral nejvhodnější řešení, které jsem prezentoval v rámci bakalářské práce. Pro každý obvod je vyhraněna samostatná podkapitola. V rámci ní je popsáno dané zapojení, jeho konstrukce i vlastnosti finální realizace.

Blokové schéma zůstalo téměř shodné s tím, které bylo uvedeno v rámci semestrálního projektu. Každý obvod nakonec prošel jistou změnou oproti původnímu návrhu. Výkonový zesilovač byl uvažován s bipolárním tranzistorem v pracovní třídě A, nakonec jsem využil MOSFET tranzistory v zapojení push-pull zesilovače. Předzesilovač pracuje také s MOSFET tranzistory. Amplitudovou modulaci neprovádím kruhovým modulátorem, ale pomocí multiplexeru, který přepíná mezi kanálem, na který je připojený harmonický signál z generátoru a kanálem, který je připojený na zem. Změna proběhla i u snímacího zesilovače, který byl rozšířen o další stupeň oproti původnímu návrhu a přibyly i pásmové propusti mezi jednotlivými stupni.

V rámci bakalářské práce jsem se seznámil s problematikou fyzikálního jevu magnetické rezonance. Již v rámci semestrální práce jsem si stanovil základní požadavky na systém a základní parametry jednotlivých součástí. Pomocí simulátoru jsem navrhl základní zapojení, které jsem při realizaci ve většině případů změnil a nahradil jiným konstrukčním řešením. Celý přístroj je koncipován tak, aby bylo dosaženo co nejnižší ceny (někdy možná na úkor vzhledu zařízení). Magnet byl realizován pomocí dvou sériově spojených permanentních magnetů. Držák magnetů umožňuje nastavit magnetickou indukci v širokém spektru. Hodnoty magnetické indukce jsou však jen spočítané a neměl jsem možnost je ověřit měřením. U každého elektronického obvodu jsem ověřil jeho vlastnosti měřením a všechny obvody splňují dané požadavky. Bohužel při spojení obvodů do celku se vyskytly problémy, které zamezují snímat FID signál. Základním nedostatkem řešení je vznik tlumených kmitů po vypnutí RF budícího impulsu. Tento jev byl diskutován v kapitole 3 a 4. Po doladění

obvodu se sice povedlo zkrátit co nejvíce tlumené kmity, avšak po zapojení snímacího zesilovače jsem zjistil, že tlumené kmity byly zkráceny nedostatečně a po velkém zesílení (pomocí snímacího zesilovače) jsou stále dominantním signálem v části, kde by se měl vyskytovat FID signál. Tento zásadní nedostatek bude předmětem dalšího ladění přístroje či dalšího výzkumu. Bude nutné přesně lokalizovat, kde tlumené kmity vznikají. Dle mého názoru vznikají na π -článku na výstupu výkonového zesilovače. V rámci řešení tohoto nedostatku pravděpodobně zkusím nahradit mnou postavený zesilovač nějakým komerčně dostupným zesilovačem, abych zjistil, jestli i s jiným zesilovačem budou tlumené kmity přetrvávat. Domnívám se, že dokud nedojde k jejich odstranění, nebude přístroj schopen FID signál zachytit. Součástí bakalářské práce je i návrh možných laboratorních úloh, i když zatím zařízení není pro výuku připravené.

Všechny součásti přístroje fungují dle daných požadavků. Při spojení do celku se vyskytují nedostatky, které zamezují snímání FID signálu. Odstranění těchto problémů bude předmětem dalšího ladění. Bude snaha přístroj zprovoznit do obhajoby a v případě neúspěchu budu obvod ladit během dalšího studia na VUT. Po zprovoznění přístroje bude možné systém dále vylepšovat. Prvním vylepšením by mohl být digitální akviziciční systém, který by umožnil snímat data do počítače a dále je zpracovávat například pomocí kumulačních filtrů. Dalším vylepšením by mohl projít generátor hlavního magnetického pole. Jak po stránce konstrukční (automatické udržování pracovní cívky ve středu mezi magnety) i po stránce výkonové (zvýšení magnetické indukce). U generátoru magnetického pole lze také vytvořit homogenizátor pole pomocí elektromagnetu, který bude vyrovnávat klesající magnetickou indukci se vzdáleností od magnetu.

V rámci bakalářské práce jsem nedosáhl kýženého výsledku a to vytvoření zařízení, které bude umožňovat generovat a snímat FID signál. Sestavil jsem všechny potřebné obvody a zjistil jejich charakteristiky. I přes funkčnost všech komponent, jsem po propojení zjistil, že jako celek systém nepracuje podle předpokladů. Již jsem však definoval chyby systému a v průběhu dalšího výzkumu budu nedostatky řešení odstraňovat až do dosažení stanoveného cíle.

LITERATURA

- [1] DRASTICH, A., Tomografické zobrazovací systémy, Učební text VUT v Brně, 2004, 208 stran.
- [2] HANZAR, V., Základní poznatky o nukleární magnetické rezonanci [elektronický dokument], studijní materiály IV praktika Matematicko-fyzikální fakulty UK, dostupné online: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_410.pdf.
- [3] VÁLEK, V., ŽIŽKA, J., Moderní diagnostické metody III., první vydání, Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví Brno, 1996, 45 stran, ISBN 80-7013-225-6
- [4] SCHROETER, K.-H., Magnetism [elektronický dokument]. IBS Magnet 13 vydání, Dostupné na www: http://www.ibsmagnet.com/pdf/en/ibs_e.pdf.
- [5] *Výpočty cívek* [ONLINE]. Pandatron Elektrotechnický magazín, Dostupné na www: http://pandatron.cz/?209&vypocet_civek.
- [6] MALINA, V., Poznáváme elektroniku V., Kopp, první vydání, 2000, 343 stran, ISBN 80-7232-114-5
- [7] BARTÁČEK, J., Jednoduché pásmové propusti [online], Stránky o elektronice a počítačích, aktualizace: 6.5.2012 [citováno dne: 16.9.2012], dostupné na www: <http://www.barts.cz/index.php/elektronika/obvody/7-pasmovepropusti>
- [8] ZATLOUKAL, P., Výkonový zesilovač pro krátkovlnné pásmo s inteligentním snímáním výkonu, 75 stran, Diplomová práce FEKT VUT v Brně ústav radioelektroniky, Vedoucí práce Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.
- [9] MARRET, D., Home built Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectrometer [online], Conspiraci of Light, aktualizace: 2010, [citováno dne: 24.7.2012], dostupné na www: <http://www.conspiracyoflight.com/NMR/NMR.html>
- [10] GEVA, T., Magnetic Resonance Imaging: Historical perspective [elektronický dokument], Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance (2006) 8, dostupné na www: http://www.scmr.org/assets/files/members/documents/JCMR/008/LCMR_i_008_04_tfj_a/LCMR_i_8_04_O/LCMR_A_175489_O.pdf
- [11] VLAS, J., Modulace – Amplitudová modulace, [online], Elektronika za okamžik [citováno dne 2.12.2012], dostupné na www: http://www.edunet.souepl.cz/EZO/zp_amplitud.htm
- [12] E-shop prodejce součástek Farnell, [online]. [citováno dne: 6.12.2012], dostupné na www: <http://cz.farnell.com/>.
- [13] Datasheet tranzistoru 2N6341 [elektronický dokument], MULTICOMP 2002, [citováno

- dne: 6.12.2012], , dostupné na [www](http://www.newark.com/pdfs/datasheets/spc/01H1390.pdf):
[\[http://www.newark.com/pdfs/datasheets/spc/01H1390.pdf\]](http://www.newark.com/pdfs/datasheets/spc/01H1390.pdf)
- [14] BUSHBERG, J. The Essential Physics of Medical Imaging. Lippincott Williams and Wilkins, 2002.
- [15] ZANG-HEE CHO. Foundations of Medical Imaging. John Wiley and Sons. Inc., 1993.
- [16] SAAD J., NMR Spectroscopy – Basic NMR theory – Lecture 1 [elektronický dokument], University of Alabama at Birmingham 2008, [citováno dne: 18.10.2012], dostupné na [www](http://www.microbio.uab.edu/mic774/lectures/saad10.8.08.pdf): <http://www.microbio.uab.edu/mic774/lectures/saad10.8.08.pdf>
- [17] Maxim Integrated, MAX358 Datasheet (elektronický dokument). Dostupné online: [\[http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/HI-508A-MAX359.pdf\]](http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/HI-508A-MAX359.pdf), 11 stran.
- [18] Texas Instruments, THS3110 Datasheet (elektronický dokument), 2009. Dostupné online: [\[http://www.ti.com/lit/ds/slos422e/slos422e.pdf\]](http://www.ti.com/lit/ds/slos422e/slos422e.pdf), 37 stran.
- [19] HAIDUC P., Codevision AVR User Manual (elektronický dokument), HP InfoTech S.R.L. 2003, dostupné online [\[https://instruct1.cit.cornell.edu/courses/ee476/codevisionC/cvavrman.pdf\]](https://instruct1.cit.cornell.edu/courses/ee476/codevisionC/cvavrman.pdf), 199 stran
- [20] Atmel, ATtiny13 datasheet (elektronický dokument), Atmel Corporation 2010 , dostupné online [\[http://www.atmel.com/Images/doc2535.pdf\]](http://www.atmel.com/Images/doc2535.pdf), 176 stran
- [21] STMicroelectronics, IRF640 Datasheet (elektronický dokument), STMicroelectronics 1999, 9 stran
- [22] ROSU I., YO3DAC – RF Technical Articles – internetová stránka, dostupné online [\[http://qsl.net/va3iul/\]](http://qsl.net/va3iul/)
- [23] Wolfram Alpha MathWorld, Fourier Series – Square Wave (webová stránka), Wolfram Research Inc. 2013, dostupné online [\[http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSquareWave.html\]](http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSquareWave.html)
- [24] BELZA J., Užitečné výpočty (webová stránka), Jaroslav Belza 2004, dostupné online [\[http://www.belza.cz/knowhow/form.htm\]](http://www.belza.cz/knowhow/form.htm)
- [25] CHEN C.-N., HOULT D.I., Biomedical magnetic resonance technology, IOP Publishing Ltd. 1989. 326 stran, ISBN 0-85274-118-9
- [26] Texas Instruments, LMH6609 Datasheet (elektronický dokument), Texas Instruments 2013, 26 stran

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- ω_0 – omega, označení úhlové frekvence (zde použito pro Larmorovu frekvenci)
- γ – gamma, zde označení gyromagnetické konstanty
- θ – Theta, zde označení úhlu vychýlení magnetického momentu vektoru magnetizace
- Ω - Ohm, jednotka odporu
- A – Ampér, jednotka proudu
- A/D – Označení pro Analogově Digitální převodník
- BNC – Typ konektoru pro jeden vodič se stíněním, používaný ve VF technice
- DIL8 – Označení pouzdra integrovaného obvodu s 8 vývody
- ECHO – Ozvěna vznikající sfázováním vektorů magnetizace při buzení metodou Spin Echo
- FID – Free Inducted Decay, volně indukovaný signál, signál, který měříme při relaxaci magnetických vektorů vybuzených do roviny XY
- H – Henry, jednotka indukčnosti
- h_{FE} – označení pro parametr proudového zesílení tranzistoru
- Hz – Hertz, jednotka frekvence
- I – Značka proudu
- ISP – Integrated Serial Programmer, typ programování mikroprocesorů
- L – Značka indukčnosti
- MR – Magnetická Rezonance
- MOSFET – Typ tranzistoru, zkratka vychází z konstrukčního řešení tranzistoru
- NdFeB – Chemická značka materiálu, ze kterého se vyrábí tzv. Neodymové magnety
- NPN – Typ tranzistoru, zkratka vychází z rozložení typů vodivosti ve vrstvách tranzistoru
- Rad – radián, jednotka pro úhel
- RF – RadioFrekvenční signál, budící sekvence impulzů
- s – sekunda, jednotka času
- SNR – Signal-Noise Ratio, zkratka pro poměr signálu k šumu

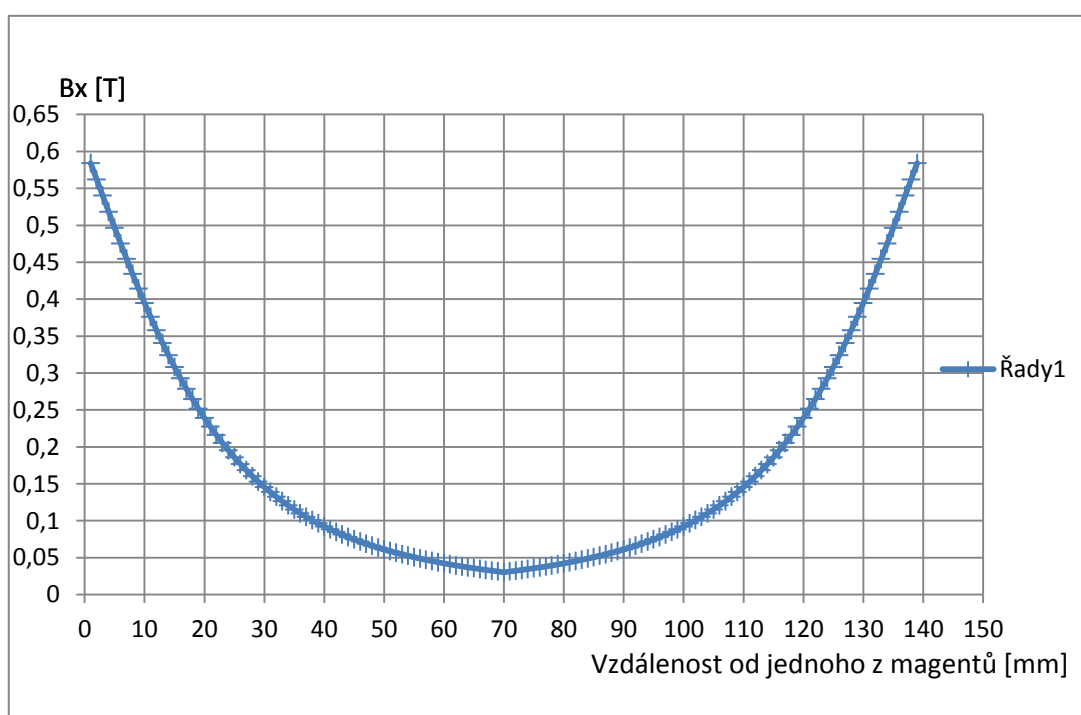
T – tesla, jednotka magnetické indukce
U_{be} – Úbytek napětí mezi bází a emitorem tranzistoru
U_{cb0} – Průrazné napětí mezi kolektorem a bází tranzistoru
V – Volt, jednotka napětí
VA – VoltAmpér, jednotka zdánlivého výkonu
VAr – jednotka jalového výkonu, VoltAmpér reaktanční
VF – Vysoko Frekvenční
VUT – Vysoké Učení Technické
W – Watt, jednotka činného výkonu
Z – Značka impedance
ZS MR – Zobrazovací Systém Magnetické Rezonance

8 PŘÍLOHY

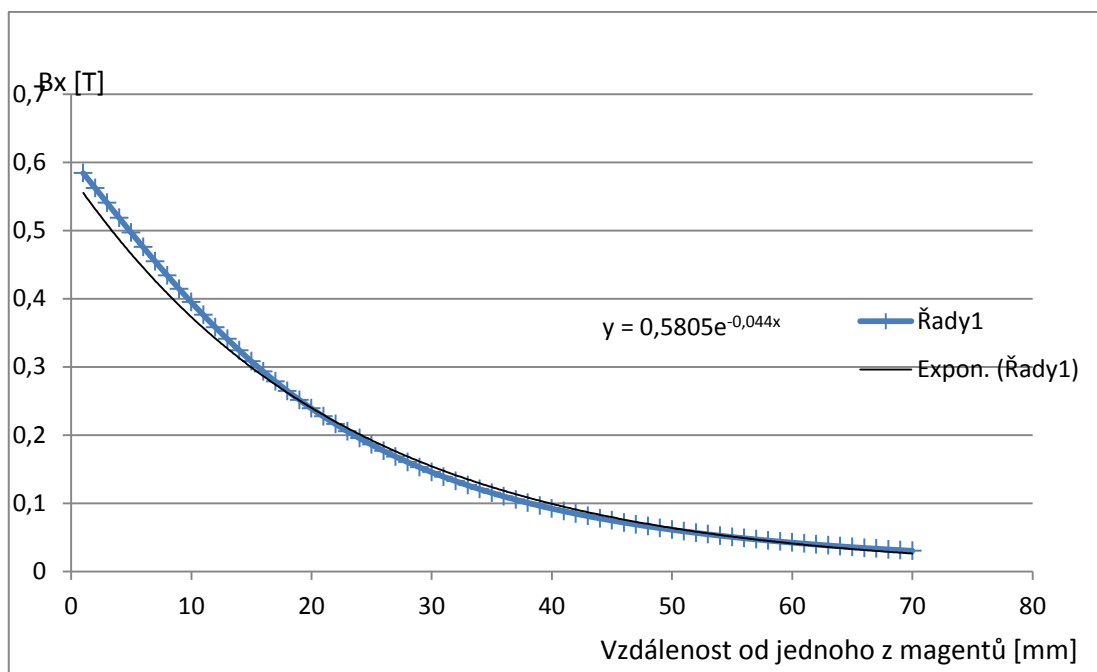
x [mm]	Br[T]	x [mm]	Br[T]	x [mm]	Br[T]
1	0,584068	47	0,068787	47	0,068787
2	0,562145	48	0,066089	46	0,071627
3	0,540211	49	0,063524	45	0,074617
4	0,518379	50	0,061084	44	0,077767
5	0,496753	51	0,058763	43	0,081086
6	0,475432	52	0,056554	42	0,084585
7	0,454501	53	0,054449	41	0,088275
8	0,434039	54	0,052445	40	0,092168
9	0,414111	55	0,050534	39	0,096277
10	0,394771	56	0,048712	38	0,100616
11	0,376065	57	0,046974	37	0,105200
12	0,358026	58	0,045315	36	0,110042
13	0,340678	59	0,043731	35	0,115161
14	0,324036	60	0,042218	34	0,120572
15	0,308108	61	0,040772	33	0,126295
16	0,292893	62	0,039390	32	0,132348
17	0,278385	63	0,038068	31	0,138751
18	0,264574	64	0,036803	30	0,145527
19	0,251445	65	0,035592	29	0,152696
20	0,238978	66	0,034433	28	0,160283
21	0,227153	67	0,033322	27	0,168311
22	0,215947	68	0,032258	26	0,176804
23	0,205334	69	0,031237	25	0,185789
24	0,195290	70	0,030258	24	0,195290
25	0,185789	69	0,031237	23	0,205334
26	0,176804	68	0,032258	22	0,215947
27	0,168311	67	0,033322	21	0,227153
28	0,160283	66	0,034433	20	0,238978
29	0,152696	65	0,035592	19	0,251445
30	0,145527	64	0,036803	18	0,264574
31	0,138751	63	0,038068	17	0,278385
32	0,132348	62	0,039390	16	0,292893
33	0,126295	61	0,040772	15	0,308108
34	0,120572	60	0,042218	14	0,324036
35	0,115161	59	0,043731	13	0,340678
36	0,110042	58	0,045315	12	0,358026
37	0,105200	57	0,046974	11	0,376065

38	0,100616	56	0,048712	10	0,394771
39	0,096277	55	0,050534	9	0,414111
40	0,092168	54	0,052445	8	0,434039
41	0,088275	53	0,054449	7	0,454501
42	0,084585	52	0,056554	6	0,475432
43	0,081086	51	0,058763	5	0,496753
44	0,077767	50	0,061084	4	0,518379
45	0,074617	49	0,063524	3	0,540211
46	0,071627	48	0,066089	2	0,562145
				1	0,584068

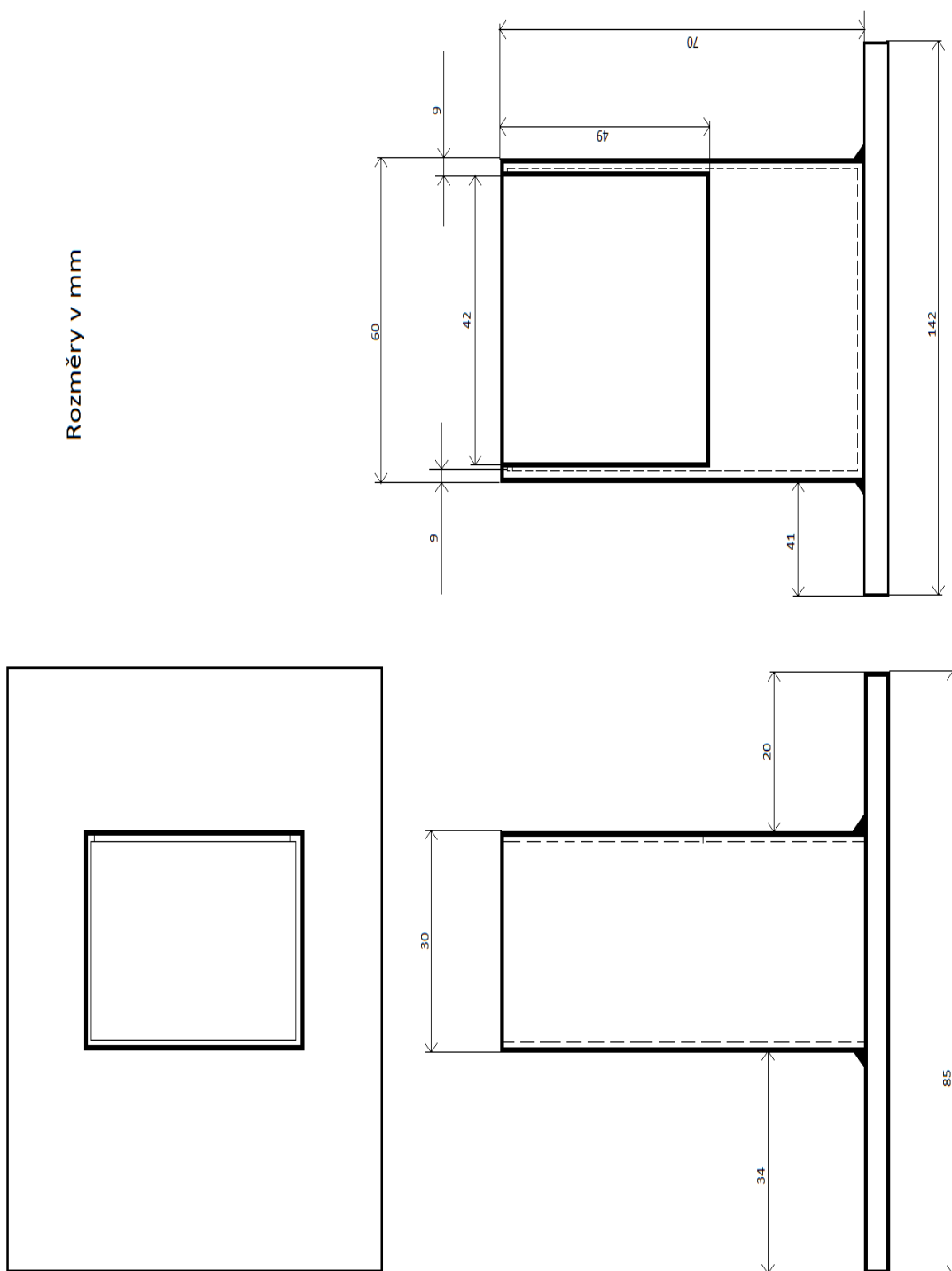
Tabulka 2: Hodnoty magnetické indukce ve vzdálenosti x



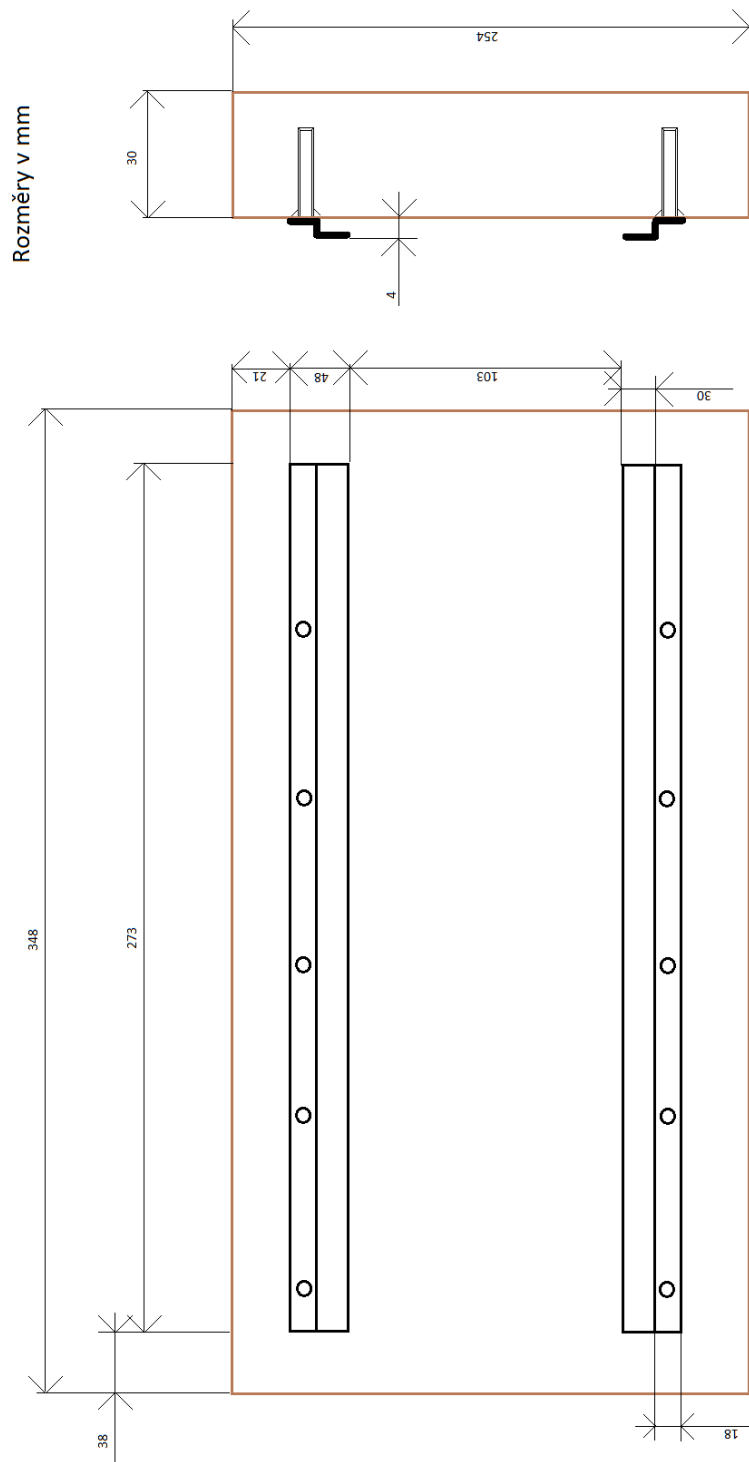
Obrázek 25: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od jednoho z magnetů



Obrázek 26: Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od magnetu – s regresní křivkou



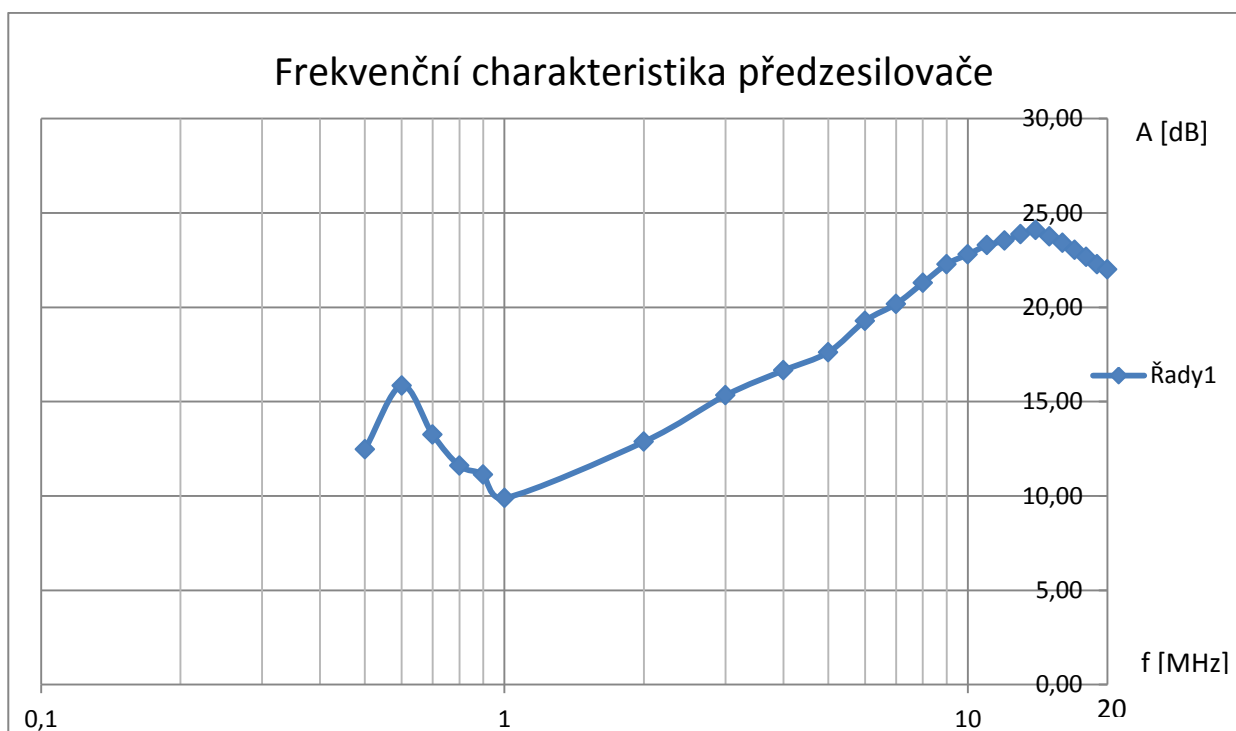
Obrázek 27: Držák jednoho magnetu o rozměrech 50x50x20mm



Obrázek 28: Deska s vodícími lištami

f [MHz]	U _{in} [V]	U _{out} [V]	A [dB]
0,5	1	4,20	12,46
0,6	1	6,20	15,85
0,7	1	4,60	13,26
0,8	1	3,80	11,60
0,9	1	3,60	11,13
1	1	3,12	9,88
2	1	4,40	12,87
3	1	5,84	15,33
4	1	6,80	16,65
5	1	7,60	17,62
6	1	9,20	19,28
7	1	10,20	20,17
8	1	11,60	21,29
9	1	13,00	22,28
10	1	13,80	22,80
11	1	14,60	23,29
12	1	15,00	23,52
13	1	15,60	23,86
14	1	16,00	24,08
15	1	15,40	23,75
16	1	14,80	23,41
17	1	14,20	23,05
18	1	13,60	22,67
19	1	13,00	22,28
20	1	12,60	22,01

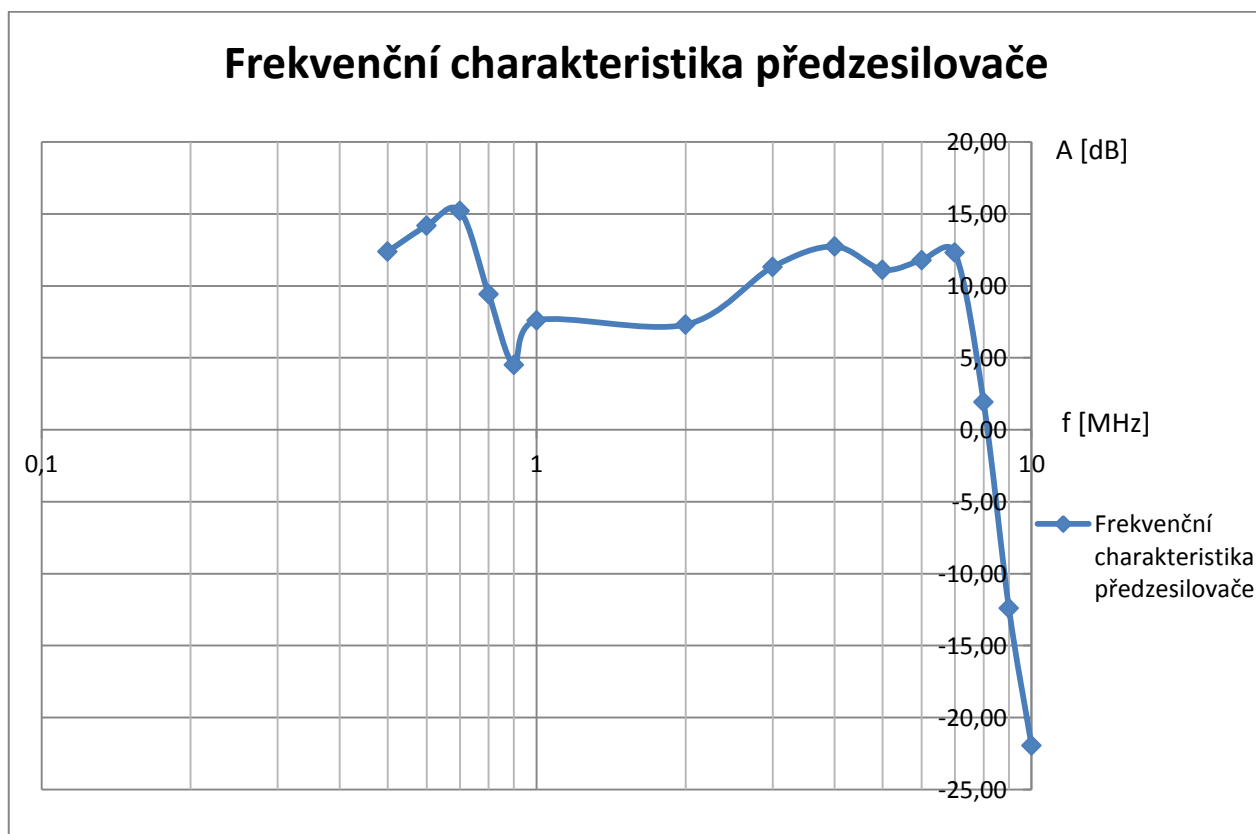
Tabulka 3: Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky předzesilovače bez výstupního filtru



Obrázek 29: Frekvenční charakteristika předzesilovače bez výstupního filtru

Frekvence [MHz]	Vstupní amplituda [V]	Výstupní amplituda [V]	Zesílení [dB]
0,5	0,5	2,08	12,38
0,6	0,5	2,56	14,19
0,7	0,5	2,88	15,21
0,8	0,5	1,48	9,43
0,9	0,5	0,84	4,51
1	0,5	1,20	7,60
2	0,5	1,16	7,31
3	0,5	1,84	11,32
4	0,6	2,60	12,74
5	0,7	2,52	11,13
6	0,7	2,72	11,79
7	0,6	2,48	12,33
8	0,8	1,00	1,94
9	1	0,24	-12,40
10	1	0,08	-21,94

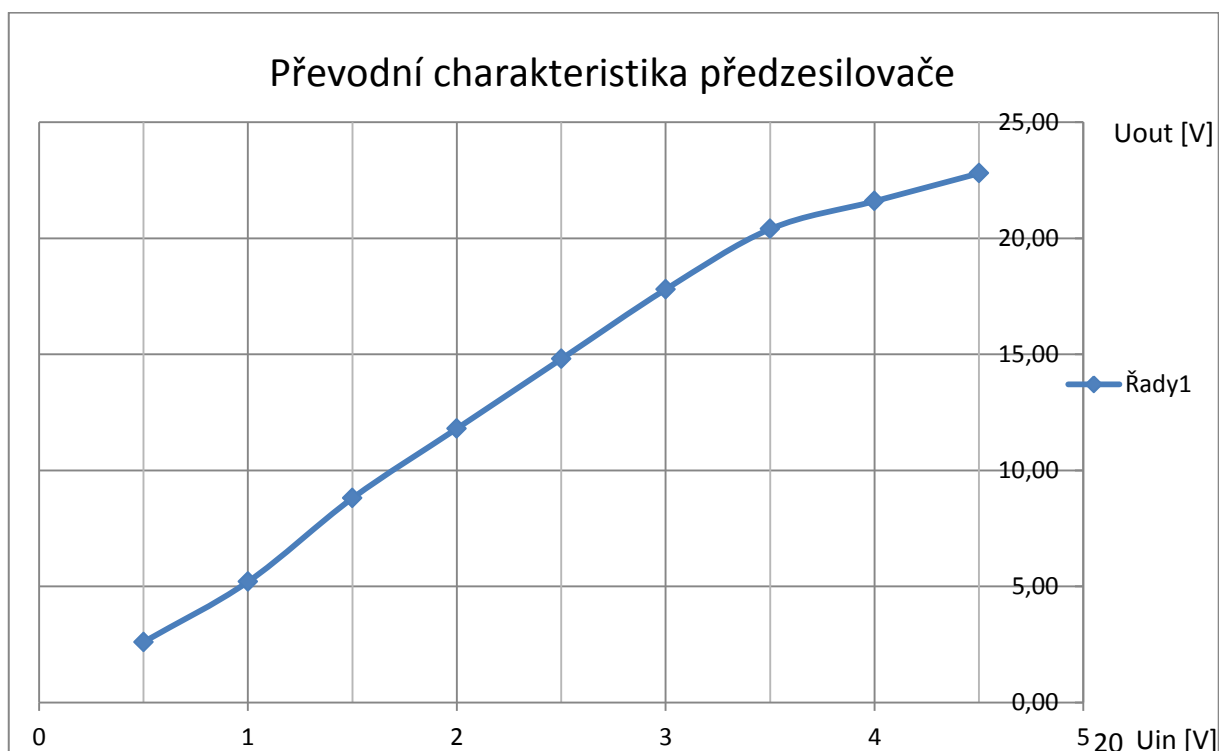
Tabulka 4: Frekvenční charakteristika se zátěží a výstupním filtrem



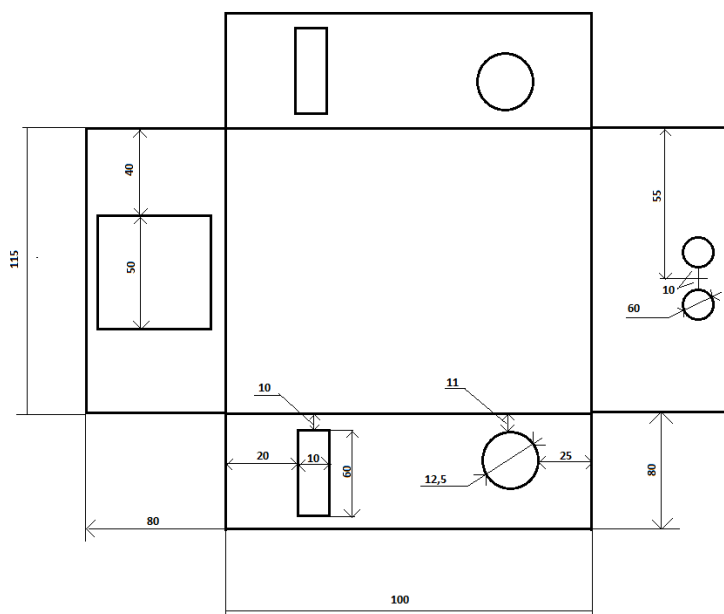
Obrázek 30: Frekvenční charakteristika se zátěží a výstupním filtrem

f [MHz]	U _{in} [V]	U _{out} [V]	A [dB]	I _{cc} [A]	U _{cc} [V]	P [W]	P _{out} [W]
3,7	0,5	2,60	14,32	0,24	13	3,12	0,0676
3,7	1	5,20	14,32	0,31	13	4,03	0,2704
3,7	1,5	8,80	15,37	0,42	13	5,46	0,7744
3,7	2	11,80	15,42	0,54	13	7,02	1,3924
3,7	2,5	14,80	15,45	0,66	13	8,58	2,1904
3,7	3	17,80	15,47	0,8	13	10,4	3,1684
3,7	3,5	20,40	15,31	0,91	13	11,83	4,1616
3,7	4	21,60	14,65	0,98	13	12,74	4,6656
3,7	4,5	22,80	14,09	1,06	13	13,78	5,1984

Tabulka 5: Převodní charakteristika předzesilovače



Obrázek 31: Převodní charakteristika předzesilovače



Obrázek 32: Krabička pro předzesilovač



Obrázek 33: Výstupní filtr předzesilovače

Generátor obdélíku:

Program pro procesor Attiny13 – frekvence interního oscilátoru 9,6MHz:

```
#include <tiny13.h>

#include <delay.h>

#define ADC_VREF_TYPE 0x00

// Read the AD conversion result
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
    // Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage
    delay_us(10);
    // Start the AD conversion
    ADCSRA|=0x40;
    // Wait for the AD conversion to complete
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCW;
}

// Declare your global variables here

void main(void)
{
    // Declare your local variables here
    int perioda,delkapulzu, temp;
    int a,b;

    // Crystal Oscillator division factor: 1
    #pragma optsize-
    CLKPR=0x80;
    CLKPR=0x00;
    #ifdef _OPTIMIZE_SIZE_
    #pragma optsize+
    #endif

    // Input/Output Ports initialization
    // Port B initialization
    // Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=Out
    // State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=0
    PORTB=0x00;
    DDRB=0x01;

    // Timer/Counter 0 initialization
    // Clock source: System Clock
    // Clock value: 1200,000 kHz
    // Mode: CTC top=OCR0A
    // OCOA output: Disconnected
    // OCOB output: Disconnected
    TCCR0A=0x00;
    TCCR0B=0x00;
    TCNT0=0x00;
    OCR0A=0x00;
    OCR0B=0x00;

    // External Interrupt(s) initialization
    // INTO: Off
```

```

// Interrupt on any change on pins PCINT0-5: Off
GIMSK=0x00;
MCUCR=0x00;

// Timer/Counter 0 Interrupt(s) initialization
TIMSK0=0x00;

// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
ACSR=0x80;
ADCSRB=0x00;
DIDR0=0x00;

// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 600,000 kHz
// ADC Bandgap Voltage Reference: Off
// ADC Auto Trigger Source: Free Running
// Digital input buffers on ADC0: Off, ADC1: On, ADC2: On, ADC3: Off
DIDR0&=0x03;
DIDR0|=0x28;
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
ADCSRA=0xA1;
ADCSRB&=0xF8;

// Global enable interrupts
#asm("sei")

temp = 0;

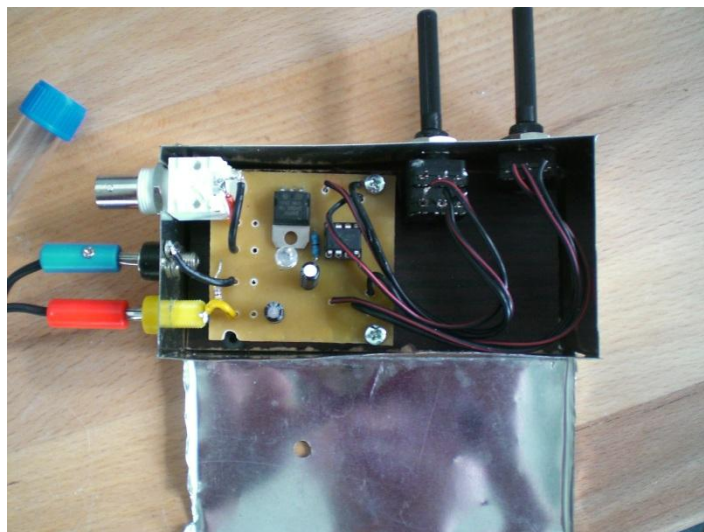
for(;;)
{
    // Place your code here

    perioda = read_adc(1)*50;           //read A/D
    delkapulzu = read_adc(2)/10;       //read A/D

    PORTB.0 = 0;                       //set 0 on out
    if (delkapulzu < 2) delkapulzu = 2; //set minimal length of pulse
    for (a = 0; a < delkapulzu; a++);   //wait for whole pulse

    PORTB.0 = 1;                       //wait for period
    if(perioda < 3) perioda = 3;        //set minimal length of period
    for (a = 0; a < (perioda); a++)     //wait for whole period
    {
        delay_us(10);
    }
}
}

```

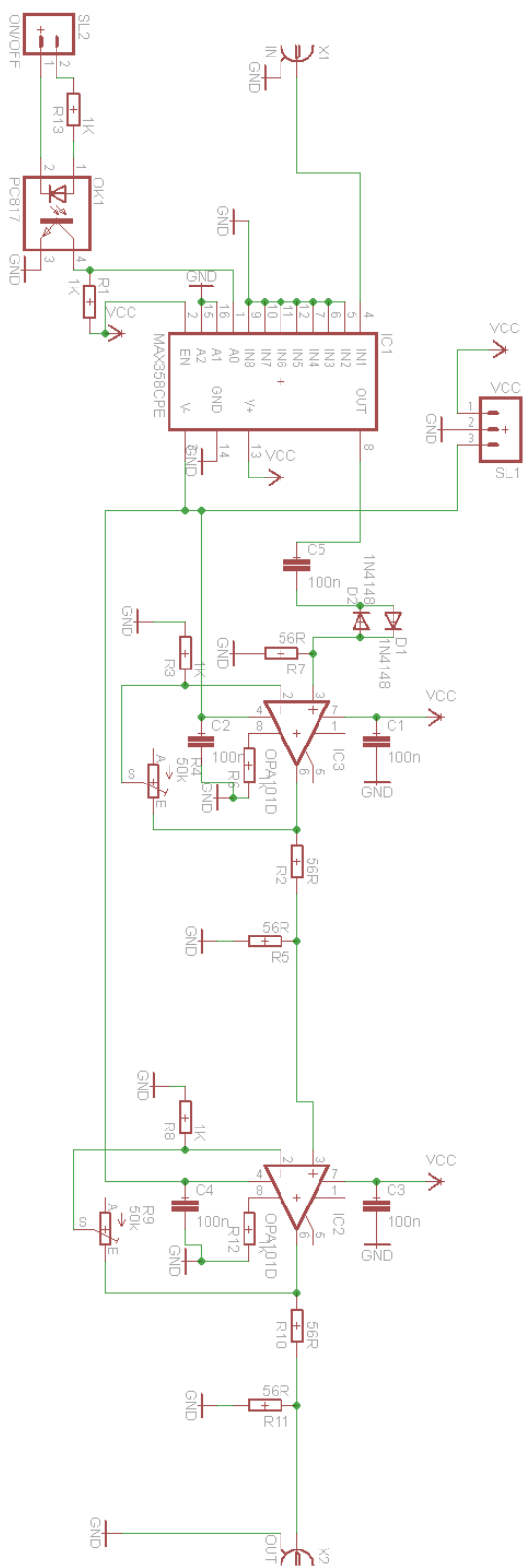


Obrázek 34: Realizace generátoru obdélníkového signálu

Tvarovač signálu:



Obrázek 35: Realizace tvarovače signálu (operační zesilovače jsou ze spodní strany DPS)

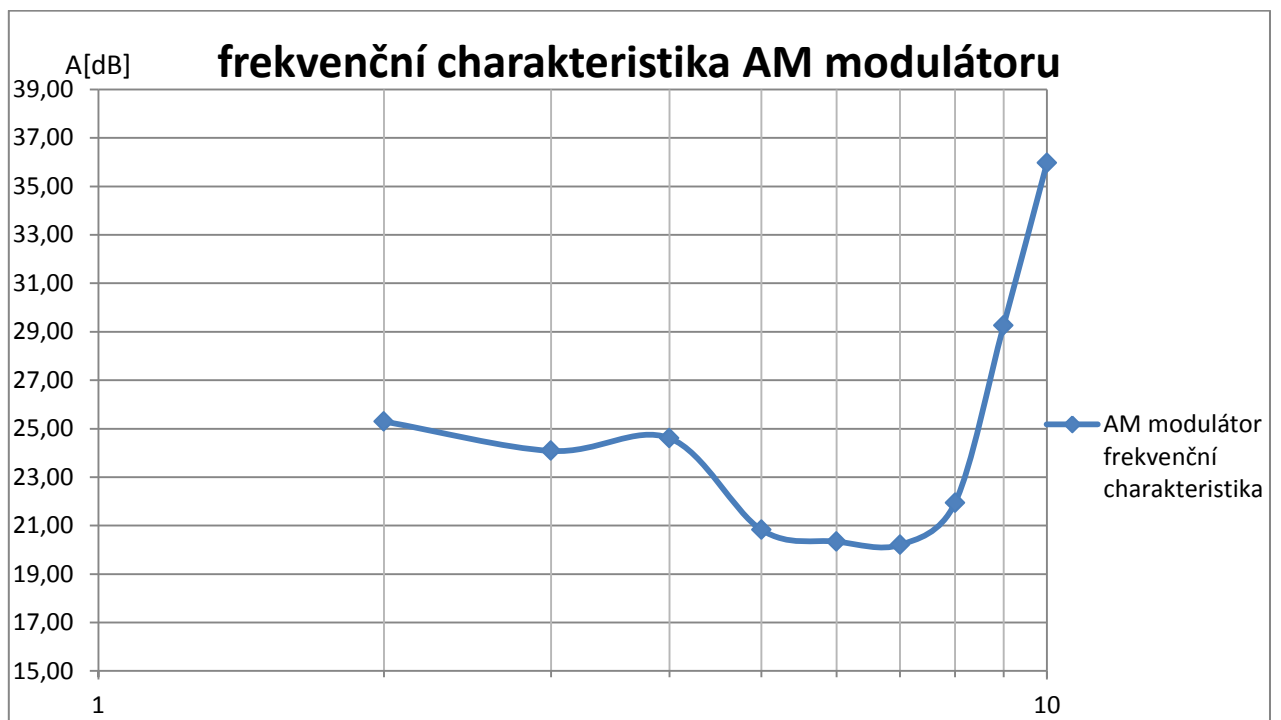


Obrázek 36: Schéma tvarovače signálu

Frekvenční a převodní charakteristika tvarovače signálu

Frekvence [MHz]	U _{in} [mV]	U _{out} [V]	A [dB]
2	200	3,68	25,30
3	200	3,20	24,08
4	200	3,40	24,61
5	200	2,20	20,83
6	200	2,08	20,34
7	168	1,72	20,20
8	112	1,40	21,94
9	40	1,16	29,25
10	14	0,88	35,97

Tabulka 6: Frekvenční charakteristika AM modulátoru

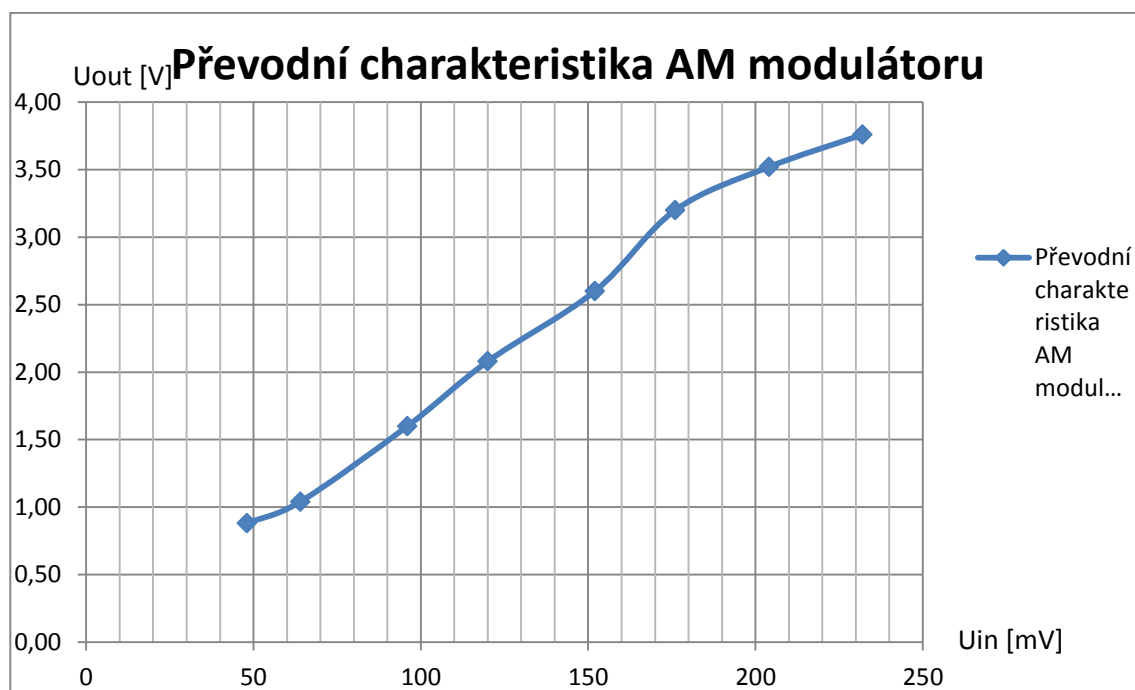


Obrázek 37: Graf frekvenční charakteristiky AM modulátoru

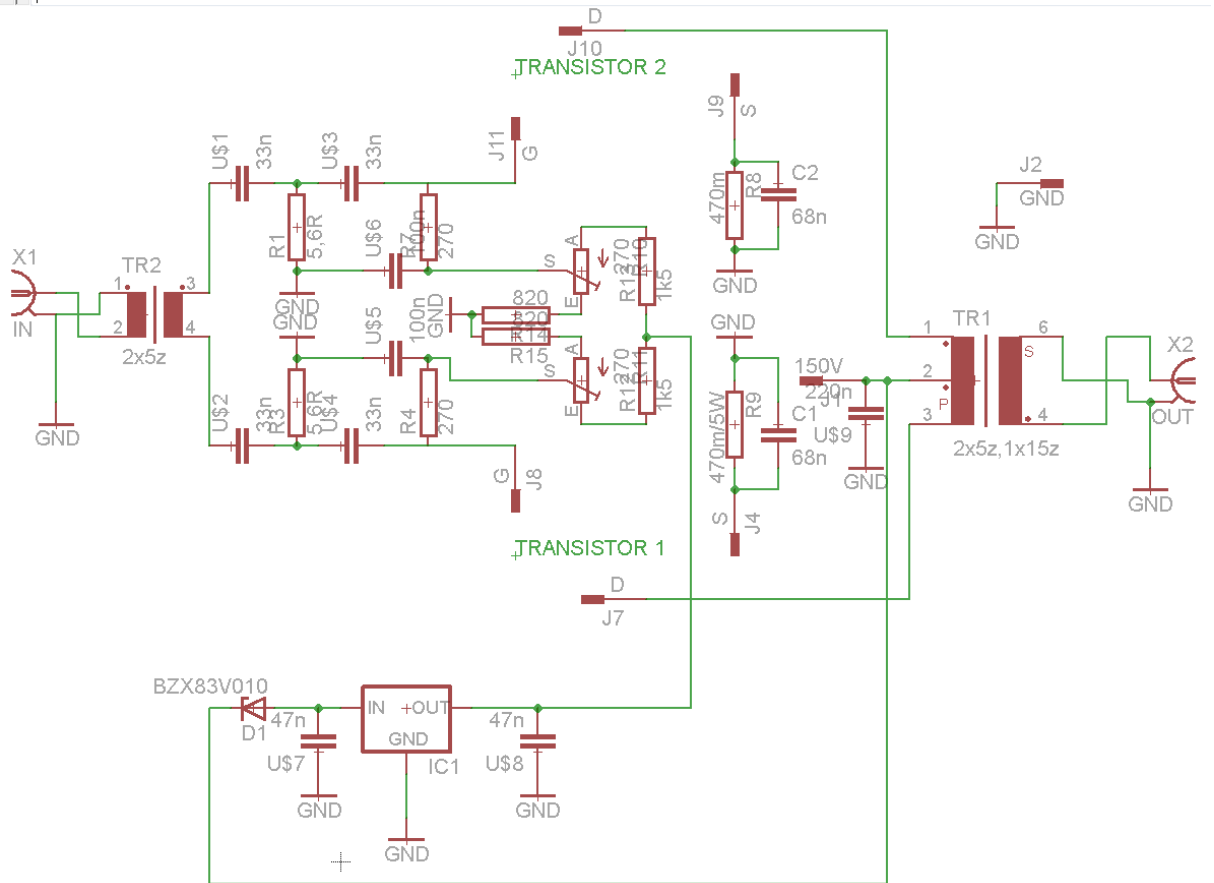
Frekvence [MHz]	U _{in} [mV]	U _{out} [V]	A [dB]
4	48	0,88	25,26
4	64	1,04	24,22
4	96	1,60	24,44
4	120	2,08	24,78
4	152	2,60	24,66
4	176	3,20	25,19

4	204	3,52	24,74
4	232	3,76	24,19

Tabulka 7: Převodní charakteristika AM modulátoru



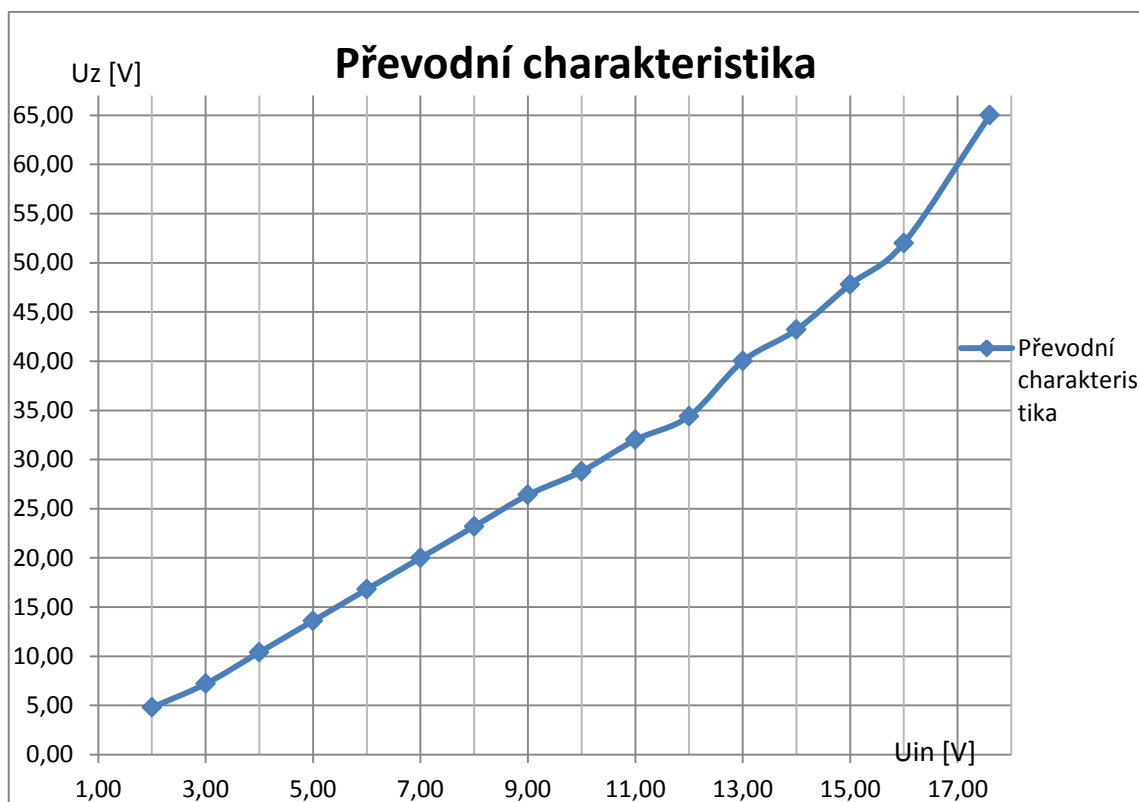
Obrázek 38: Převodní charakteristika AM modulátoru



Obrázek 39: Schéma výkonového zesilovače

f [MHz]	I_{cc} [A]	U_{cc} [V]	P [W]	U_{in} [V]	U_z [V]	Z [Ω]	Z_{in} [Ω]	P_{in} [W]	P_{out} [W]	A [dB]
3,70	0,78	37,40	29,17	2,00	4,80	54,00	237,13	0,008	0,21	7,60
3,70	0,82	37,20	30,50	3,00	7,20	54,00	237,13	0,019	0,48	7,60
3,70	1,03	36,80	37,90	4,00	10,40	54,00	237,13	0,034	1,00	8,30
3,70	1,20	36,50	43,80	5,00	13,60	54,00	237,13	0,053	1,71	8,69
3,70	1,42	36,40	51,69	6,00	16,80	54,00	237,13	0,076	2,61	8,94
3,70	1,62	36,40	58,97	7,00	20,00	54,00	237,13	0,103	3,70	9,12
3,70	1,91	36,50	69,72	8,00	23,20	54,00	237,13	0,135	4,98	9,25
3,70	2,12	38,00	80,56	9,00	26,40	54,00	237,13	0,171	6,45	9,35
3,70	2,34	40,00	93,60	10,00	28,80	54,00	237,13	0,211	7,68	9,19
3,70	2,52	40,00	100,80	11,00	32,00	54,00	237,13	0,255	9,48	9,28
3,70	2,76	40,00	110,40	12,00	34,40	54,00	237,13	0,304	10,96	9,15
3,70	3,12	37,00	115,44	13,00	40,00	54,00	237,13	0,356	14,81	9,76
3,70	3,47	34,30	119,02	14,00	43,20	54,00	237,13	0,413	17,28	9,79
3,70	3,66	33,10	121,15	15,00	47,80	54,00	237,13	0,474	21,16	10,07
3,70	3,70	32,80	121,36	16,00	52,00	54,00	237,13	0,540	25,04	10,24
3,70	3,76	35,80	134,61	17,60	65,00	54,00	237,13	0,653	39,12	11,35

Tabulka 8: Převodní charakteristika výkonového zesilovače



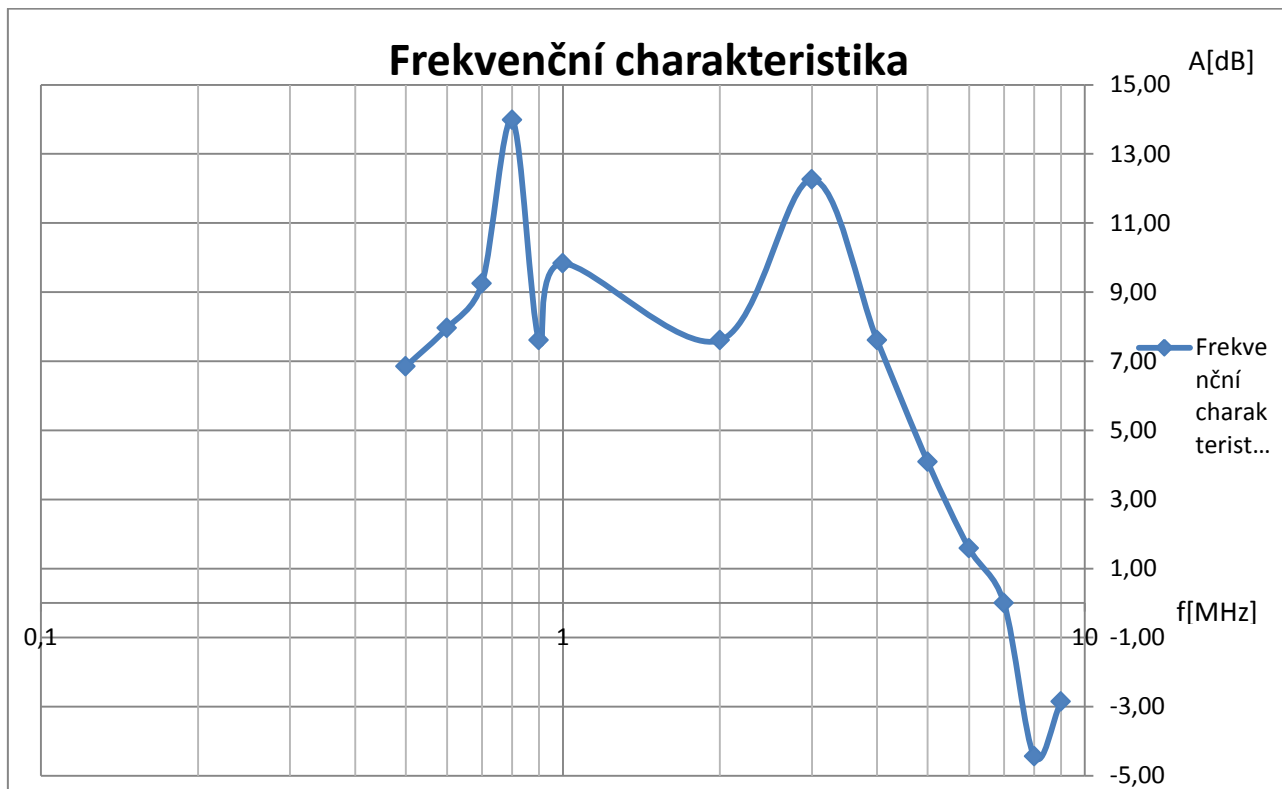
Obrázek 40: Převodní charakteristika výkonového zesilovače

f [MHz]	U_{in} [V]	U_{out} [V]	A[dB]
0,5	2	4,40	6,85
0,6	2	5,00	7,96
0,7	2	5,80	9,25
0,8	2	10,00	13,98
0,9	2	4,80	7,60
1	2	6,20	9,83
2	2	4,80	7,60
3	2	8,20	12,26
4	2	4,80	7,60
5	2	3,20	4,08
6	2	2,40	1,58
7	2	2,00	0,00
8	2	1,20	-4,44
9	2	1,44	-2,85

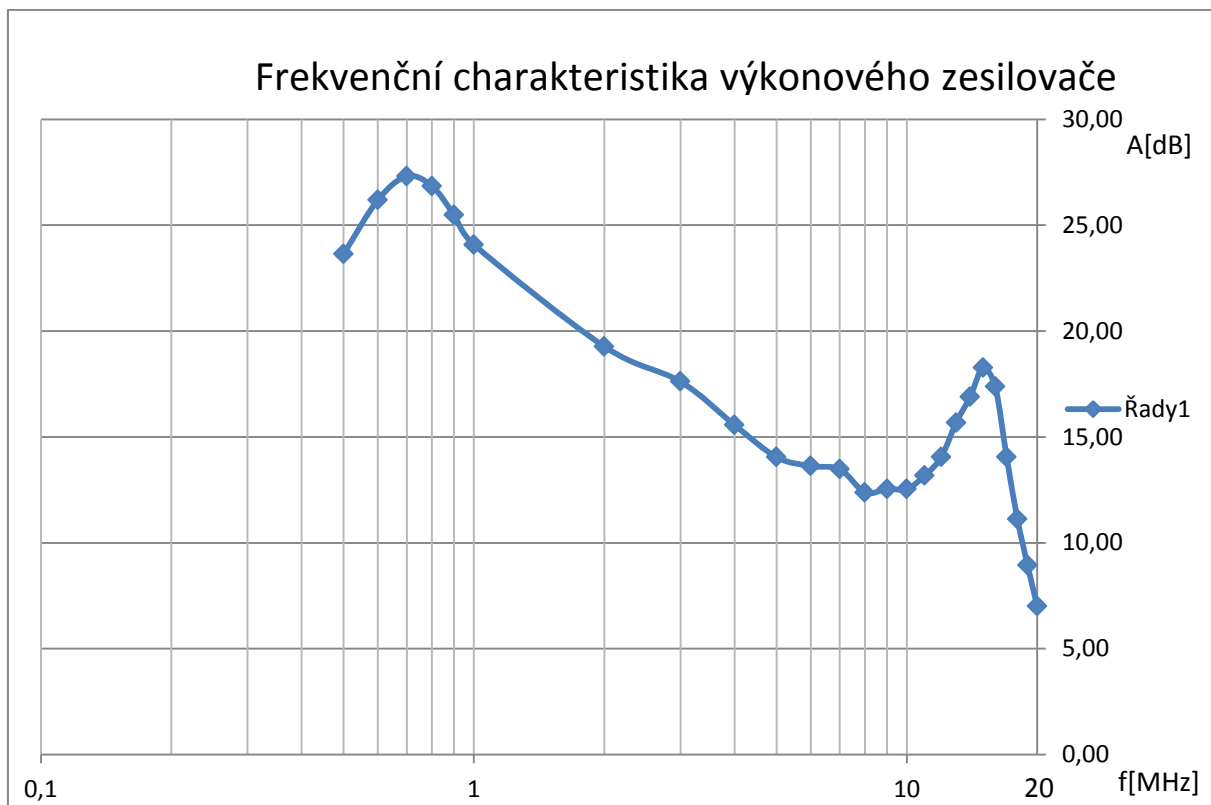
Tabulka 9: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače s výstupním filtrem

Frekvence [MHz]	U_{in} [V]	U_{out} [V]	A [dB]
0,5	1	15,20	23,64
0,6	1	20,40	26,19
0,7	1	23,20	27,31
0,8	1	22,00	26,85
0,9	1	18,80	25,48
1	1	16,00	24,08
2	1	9,20	19,28
3	1	7,60	17,62
4	1	6,00	15,56
5	1	5,04	14,05
6	1	4,80	13,62
7	1	4,72	13,48
8	1	4,16	12,38
9	1	4,24	12,55
10	1	4,24	12,55
11	1	4,56	13,18
12	1	5,04	14,05
13	1	6,08	15,68
14	1	7,00	16,90
15	1	8,20	18,28
16	1	7,40	17,38
17	1	5,04	14,05
18	1	3,60	11,13
19	1	2,80	8,94
20	1	2,24	7,00

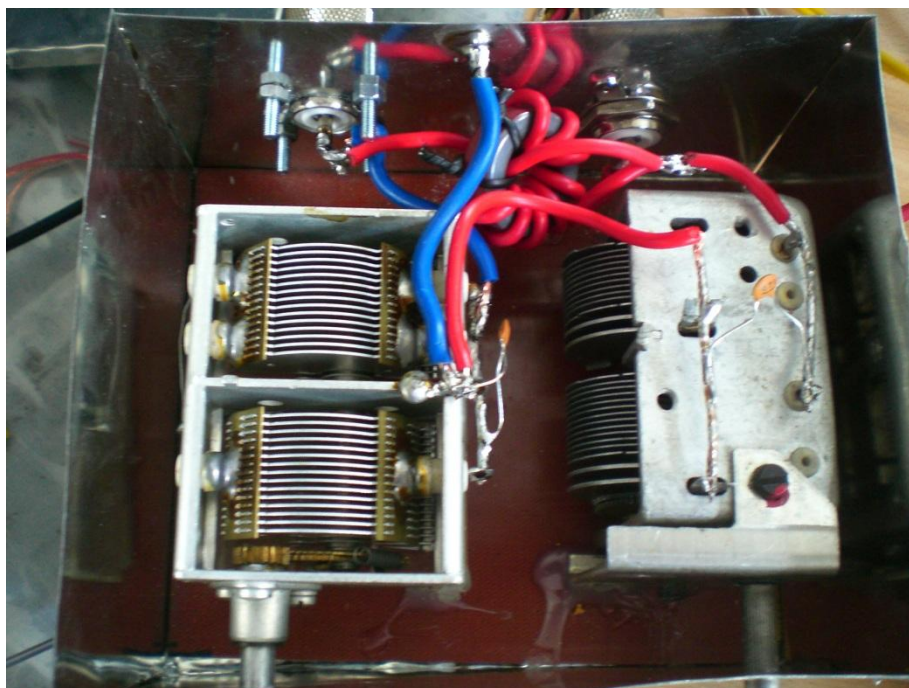
Tabulka 10: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače s výstupním filtrem



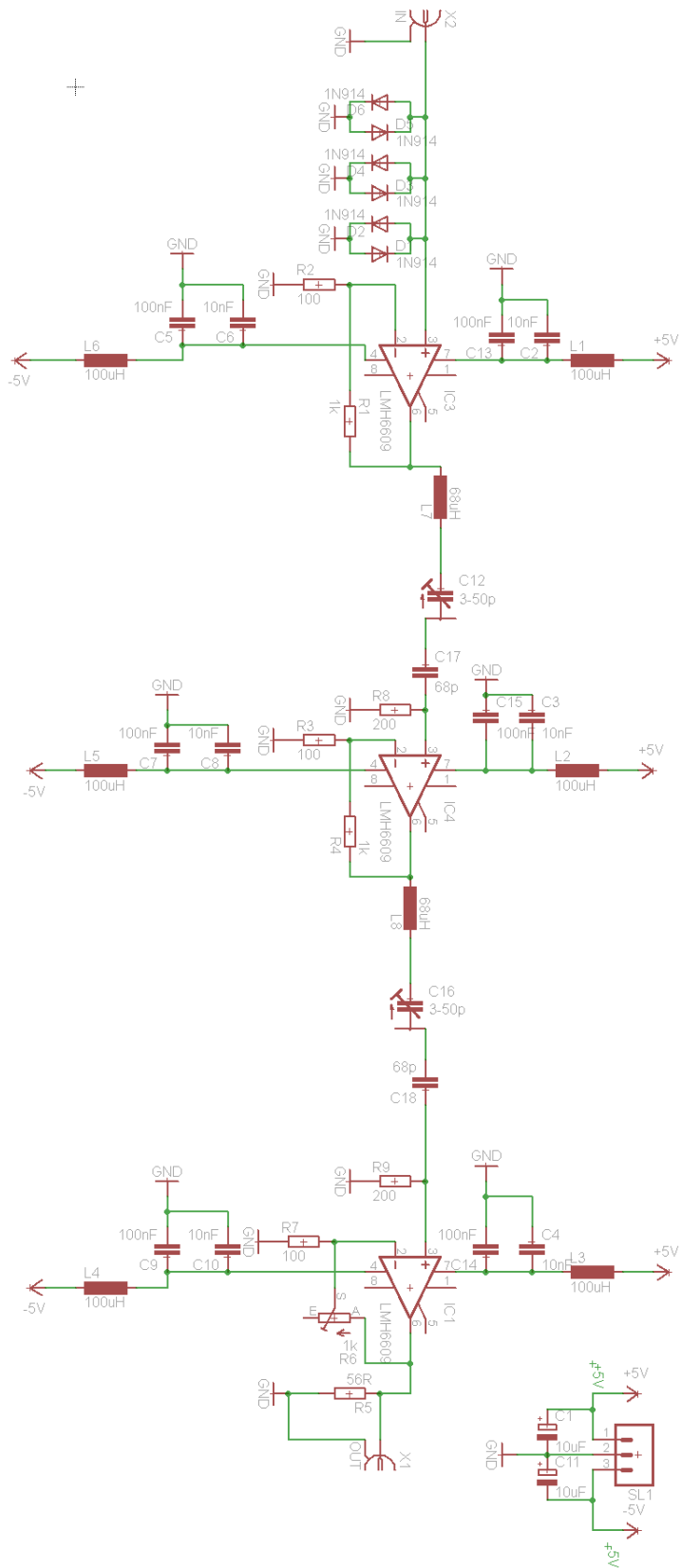
Obrázek 41: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače bez výstupního filtru



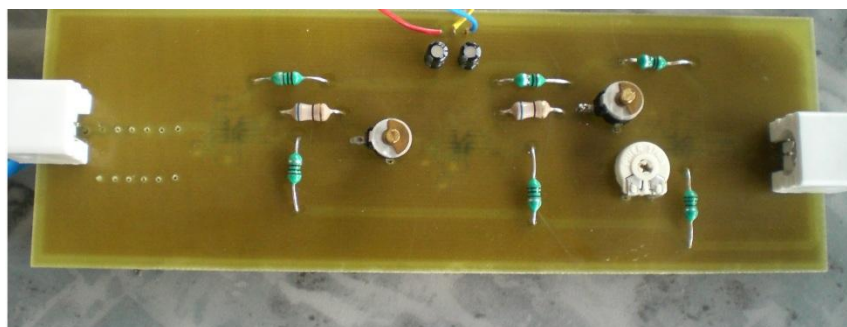
Obrázek 42: Frekvenční charakteristika výkonového zesilovače bez výstupního filtru



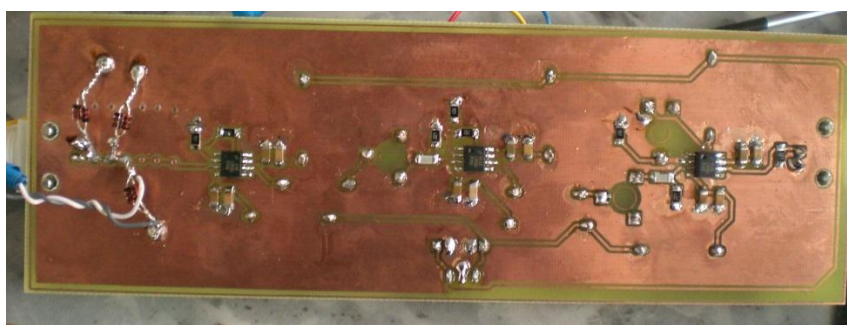
Obrázek 43: Realizace výstupního filtru



Obrázek 44: Schéma snímacího zesilovače



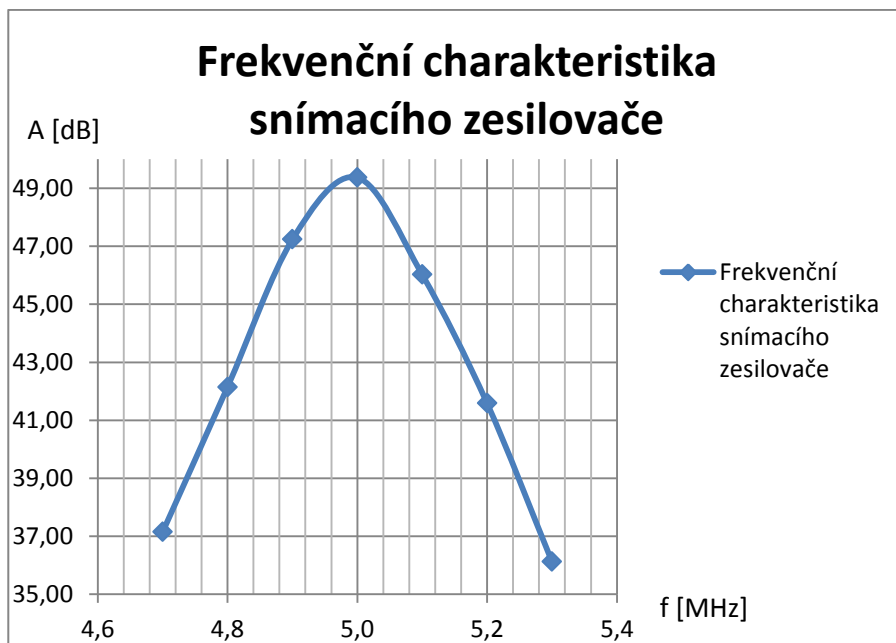
Obrázek 45: Snímací zesilovač – horní strana



Obrázek 46: Snímací zesilovač – spodní strana

f [MHz]	U _{in} [V]	U _{out} [V]	A [dB]
4,7	0,005	0,36	37,15
4,8	0,005	0,64	42,14
4,9	0,005	1,15	47,23
5,0	0,005	1,47	49,37
5,1	0,005	1,00	46,02
5,2	0,005	0,60	41,58
5,3	0,005	0,32	36,12

Tabulka 11: Frekvenční charakteristika snímacího zesilovače



Obrázek 47: Frekvenční charakteristika snímacího zesilovače

Zadání laboratorní úlohy

- Popište základní princip buzení sekvencí 90/90.
- Nakreslete blokové schéma jednoduchého NMR spektrometru
- Zapojte dle návodu (viz níže) celý systém pro prezentaci jevu NMR
- Vložte do měřicí komory vzorek vody
- Nastavte parametry zařízení tak, aby byl na osciloskopu vidět FID signál
- Zaznamenejte naměřený signál
- Změřte délku trvání FID signálu
- Zkuste změnit délku trvání RF budícího signálu a pozorujte, jestli došlo ke změně tvaru či délce trvání FID signálu a naměřená data diskutujte
- Nastavte konstantní parametry buzení a naměřte průběh pro vodu a pro olej, diskutujte rozdíly

Návod na zprovoznění systému pro prezentaci jevu NMR:

- 1) Umístěte vzorek do měřicí komory (cívku je dobré přidržet, aby nedošlo k její deformaci)
- 2) Nastavte vzdálenost magnetů do požadované vzdálenosti
- 3) Uzavřete kryt měřicí komory
- 4) Zkontrolujte, že jsou všechny části systému propojeny podle popisků na konektorech a kabelech
- 5) Zapněte osciloskop
- 6) Zapněte výkonový zesilovač
- 7) Zapněte napájecí zdroj předzesilovače, modulátoru, generátoru obdélníku a snímacího zesilovače
- 8) Zapněte generátor harmonického signálu
- 9) Zapněte snímací zesilovač
- 10) Nastavte na generátoru požadovanou frekvenci
- 11) Nastavte napájecí napětí předzesilovače (stejně jako pro generátor obdélníku) na +13V, modulátoru na +-12V a snímacího zesilovače na +5V
- 12) Nastavte na generátoru amplitudu ___V (*může být stanoveno až po zprovoznění systému*).
- 13) Proveďte nastavení osciloskopu tak, aby bylo možné pozorovat jednotlivé budící RF pulzy.
- 14) Po ukončení práce nejprve snižte amplitudu signálu z generátoru, poté zmenšete na nulu všechny napájecí napětí a následně vypněte výkonový zesilovač.

Obsah přiloženého CD

Simulace obvodů:

Soubory simulací elektronických obvodů realizovaných pro potřeby semestrální a bakalářské práce. Simulace byly prováděny v programu Multisim™ 11 od společnosti National Instruments.

Realizace obvodů:

Soubory schémat, plošných spojů a osazovacích plánů k jednotlivým finálním verzím obvodů. Obvody jsou tříděny podle názvů, které kolidují s názvy obvodů.

V rámci složky „Generátor obdélníku“ je umístěn i firmware pro procesor. Jednak jako projekt pro CodeVisionAVR V2, tak i jako *.hex soubor, který lze přímo nahrát do mikroprocesoru.