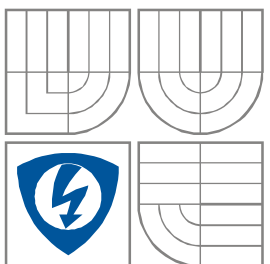


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČ-  
NÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

## VIZUALIZACE POHYBU HLASIVEK

VISUALIZATION OF VOCAL CORDS MOVEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LIBOR KUTÁLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří ROZMAN, CSc.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Biomedicínské a ekologické inženýrství

**Student:** Bc. Libor Kutálek

**ID:** 74893

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vizualizace pohybu hlasivek

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technickým řešením vizualizace pohybu hlasivek. Navrhněte obvodové řešení zařízení pro vizualizaci pohybu hlasivek. Konceptci zařízení s předpokládanými výstupy řešení konzultujte na klinickém pracovišti. Vybrané funkční bloky zařízení experimentálně ověřte.

Práce musí obsahovat :

- teoretickou studii možných řešení problematiky,
- obvodové řešení zařízení s rozpisem součástek,
- doložené výsledky experimentálního ověření vybraného funkčního bloku.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Hahn A. a kol.: Otorinolaryngologie a foniatrie v současné praxi. Grada Avicenum, Praha, 2007

[2] Hybášek I., Vokurka J.: Otorinolaryngologie. Karolinum, Praha, 2006

**Termín zadání:** 12.10.2009

**Termín odevzdání:** 21.5.2010

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

**prof. Ing. Jiří Jan, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Libor Kutálek  
Bytem: Kelč 80, Kelč, 756 43  
Narozen/a (datum a místo): 22.09.1985, Hranice

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Ing. Jiří Jan, CSc, předseda rady oboru Biomedicínské a ekologické inženýrství  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

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

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

Název VŠKP: Vizualizace pohybu hlasivek  
Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.  
Ústav: Ústav biomedicínského inženýrství  
Datum obhajoby VŠKP: 7.6.2010

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

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

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

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy

(z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne: 21. května 2010

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je objasnit funkci hlasivek a seznámit se s jejich vyšetřovacími metodami. V práci nalezneme možné obvodové řešení zařízení pro osvětlování rychle kmitajících hlasivek pomocí LED, která je méně energeticky náročná než běžné halogenové zdroje světla. Dále je zde řešena problematika zpracování, filtrace signálu a nalezení vlastní frekvence kmitání hlasivek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

hlasivky, videolaryngostroboskopie, zesilovač s kompresí, pásmová propust, zdroj proudu pro LED, FFT

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to clarify the function of the vocal cords and get familiarized with their investigative methods. In this work we find possible solutions to the peripheral device to illuminate the rapidly vibrating vocal cords using an LED that is less energy exacting than conventional halogen lamps. Then there are solved the problems of processing, signal filtering and finding the natural frequency of vibration of the vocal cords.

## **KEYWORDS**

vocal cords, videolaryngostroboscopy, amplifier with compression, bandpass, current source for LED, FFT

KUTÁLEK, L. *Vizualizace pohybu hlasivek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2010. 39 s., 10 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vizualizace pohybu hlasivek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/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 diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>ix</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xi</b>
<b>Úvod do problematiky</b>	<b>1</b>
<b>1 Anatomie</b>	<b>2</b>
<b>2 Technické řešení</b>	<b>3</b>
<b>3 Obvodové řešení</b>	<b>5</b>
3.1 Mikrofon.....	6
3.2 Mikrofonní předzesilovač .....	9
3.3 Pásmová propust .....	12
3.4 Kompresní zesilovač .....	16
3.5 Výstupní zesilovač a posunutí signálu .....	19
3.6 Zdroj proudu pro LED.....	19
3.7 LED dioda .....	23
3.8 Napájení .....	25
<b>4 Experimentální ověření</b>	<b>27</b>
4.1 Číslíkové zpracování .....	27
4.2 Vlastní experiment .....	29
4.3 Ověření algoritmu FFT v jazyku C .....	33
<b>5 Závěr</b>	<b>35</b>
<b>Literatura</b>	<b>36</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>38</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>39</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Hlasivky při fonaci a při dýchání.....	2
Obr. 2: Manuel García a první laryngoskop.....	3
Obr. 3 Videolaryngostroboskopický systém firmy KAYPENTAX.....	4
Obr. 4: Blokové schéma obvodového řešení.....	5
Obr. 5: Elektrické schéma elektretového mikrofonu .....	6
Obr. 6: Elektretový mikrofon MCE101 .....	6
Obr. 7: Zapojení CR filtru.....	10
Obr. 8: Přenos CR filtru .....	10
Obr. 9: Schéma mikrofonního předzesilovače .....	11
Obr. 10: Schéma pásmové propusti.....	14
Obr. 11: Kmitočtová modulová charakteristika filtru pásmová propust.....	15
Obr. 12: Graf závislosti výstupního odporu na proudu LED .....	16
Obr. 13: Volt - ampérová charakteristika LED v pouzdru optočlenu .....	17
Obr. 14: Zapojení vactrolu do smyčky zpětné vazby jako regulačního prvku.....	17
Obr. 15: Graf závislosti výstupního napětí $e_{out}$ na vstupním napětí $e_{in}$ .....	18
Obr. 16: Výstupní zesilovač s děličem napětí .....	19
Obr. 17: Vnitřní zapojení obvodu .....	20
Obr. 18: Typické zapojení obvodu.....	20
Obr. 19: Zapojení obvodu pro řízení jasu LED.....	22
Obr. 20: Graf závislosti šířky pulzů na proudu LED .....	22
Obr. 21: ATMOS Strobo 21 LED .....	23
Obr. 22: LED dioda firmy Luxeon.....	24
Obr. 23: Stabilizovaný zdroj MW-SYS1308-2412 .....	25
Obr. 24 Schéma zapojení lineárního regulátoru L7805C.....	25
Obr. 25: Schéma nábojové pumpy MAX660.....	26
Obr. 26: Schéma napěťového regulátoru LM317 .....	26
Obr. 27: Postup výpočtu algoritmu DFT pro délku posloupnosti $N = 4$ .....	28
Obr. 28: Grafická závislost počtu komplexních součinnů na délce posloupnosti $N$ .....	29
Obr. 29: Nastavení vzorkovací frekvence signálu .....	29
Obr. 30: Nastavení bitové hloubky signálu.....	30
Obr. 31: Nevhodná vzorkovací frekvence.....	30

Obr. 32: Optimální vzorkovací frekvence.....	31
Obr. 33: Kvantizace při 4-bitové hloubce .....	31
Obr. 34: Blokové schéma chodu programu.....	32
Obr. 35: Výsledek detekce spektrální čáry v jazyku C .....	33
Obr. 36: Výsledek detekce spektrální čáry v programu MATLAB .....	34
Obr. 37: Zapojení obvodu bez napájecí části .....	40
Obr. 38: Zapojení napájecí části obvodu.....	41
Obr. 39: Muž, 24 let, $f_{vz} = 2000$ Hz, 8-bit .....	44
Obr. 40: Žena, 47 let, $f_{vz} = 2000$ Hz, 8-bit.....	45
Obr. 41: Žena, 23 let, $f_{vz} = 2000$ Hz, 8-bit.....	46
Obr. 42: Muž, 22 let, $f_{vz} = 2000$ Hz, 8-bit .....	47
Obr. 43: Muž, 24 let, $f_{vz} = 2000$ Hz, 16-bit .....	48
Obr. 44: Přenosová charakteristika pásmové propusti .....	50

# SEZNAM TABULEK

Tab 1.: Přepočet akustického tlaku na SPL.....	8
Tab 2.: Hodnoty prvků pro různé konfigurace.....	21
Tab 3.: Seznam součástí.....	42
Tab 4.: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosu pásmové propusti.....	49

# ÚVOD DO PROBLEMATIKY

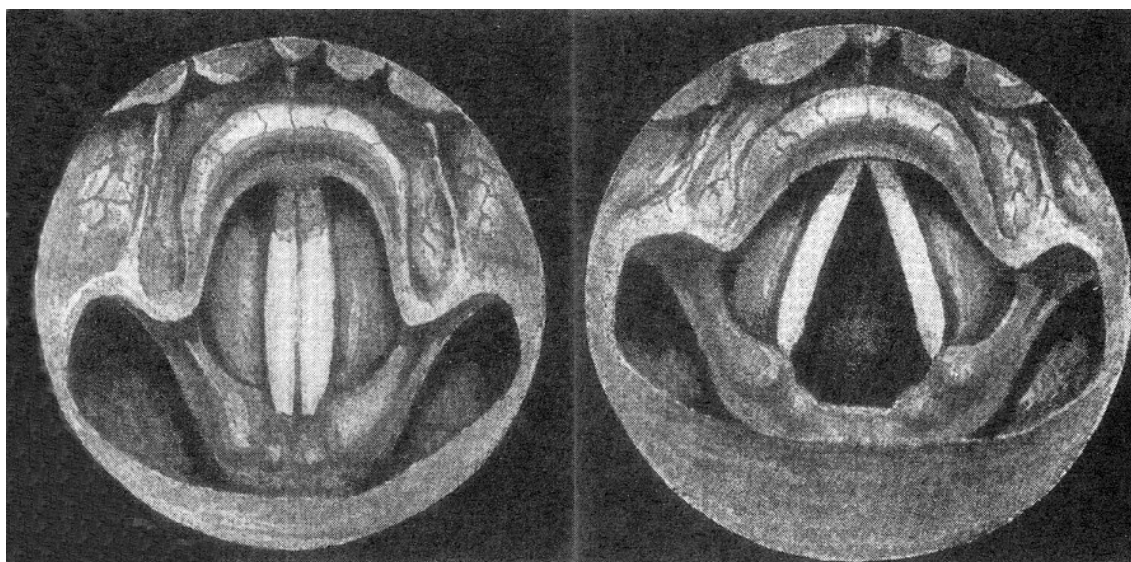
Lidský hlas hraje v životě člověka jednu z nejdůležitějších rolí. Díky němu se můžeme dorozumět mezi ostatními lidmi, změnou intonace člověkovu pohrozit, povzbudit, uklidnit a podobně. Hlas se stal běžným základem řeči, a když člověk z něčeho nic ztratí tento komunikační prostředek, jen těžko hledá vhodnou náhradu.

Proto člověk začal zkoumat lidský hlas, studovat příčiny vzniku hlasu a analyzovat ho. Přišlo se na to, že hlas vzniká kmitáním hlasivek. Proud vzduchu z plic působí na hlasivky, ty se rozpohybují a začínají kmitat svou vlastní frekvencí. Tento pohyb je velmi důležitý a pokud ho dokážeme zobrazit, můžeme mu porozumět a následně poškozené hlasivky léčit. Dnes klademe velký důraz na moderní zobrazovací systémy, abychom mohli jasně a jednoznačně posoudit stav hlasivek.

Nejmodernějším zobrazovacím systémem pro vyšetření hrtanu je videolaryngostroboskopie, která používá stroboskopického zdroje světla při osvětlení hlasivek a dále obraz snímá speciální CCD kamerou na monitor v reálném čase.

# 1 ANATOMIE

Hrtan je složité ústrojí, které slouží k dýchání, uzávěru průdušnice a především tvorbě hlasu. Kostra hrtanu je tvořena 9 chrupavkami. Základ tvoří prstencová chrupavka, dále chrupavka štítná, která především u mužů tvoří zepředu jasně viditelný ohryzek a chrupavka příklopky. Nitro hrtanu má na frontálním řezu tvar přesýpacích hodin a přibližně v místě jeho největšího zúžení se nacházejí hlasivky. Jsou to dva souměrné vazivové svaly, které mají zásadní podíl na tvorbě hlasu. Při dýchání jsou hlasivky rozevřené a vzniklým otvorem proudí vzduch ven. Při fonaci je vydechovaný vzduch pozastaven sevřenými hlasivkami a začíná se pod nimi hromadit, vzniklý tlak hlasivky od sebe na okamžik oddálí, vzduch unikne a postupuje dýchací cestou ven z úst. Tento děj se periodicky opakuje, hlasivky kmitají a vzniká hlas. Na obrázku níže vidíme hlasivky, ve svých krajních polohách při dýchání a fonaci.



Obr. 1: Hlasivky při fonaci a při dýchání

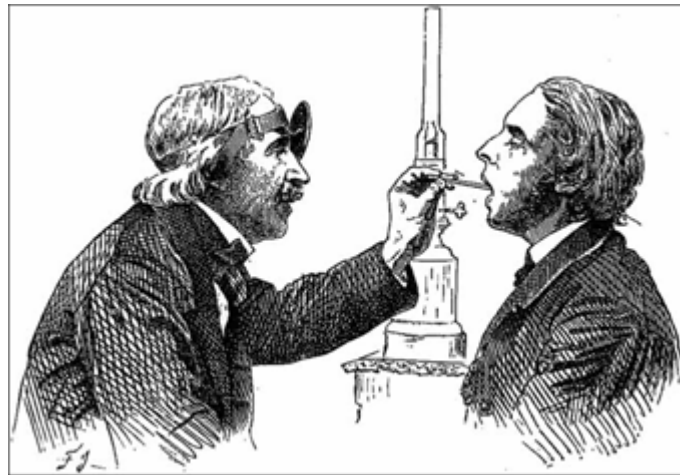
Kmitočtový rozsah základního hlasivkového tónu je v rozmezí 80 - 500 Hz, průměrně je to u mužů 100 - 150 Hz, u žen 200 - 300 Hz a u dětí kolem 300 Hz. Tento tón se dále šíří vzdušnými prostory dýchacích cest, hltanem, dutinou ústní a částečně též nosem. V rezonančních prostorách je hlas dynamicky formován a vzniká tak individuální charakteristická barva hlasu každého člověka. Proto také mnozí z nás jsou zvyklí na svůj hlas při každodenním dorozumíváním, ale když ho pak slyší v nějaké nahrávce, přijde nám obvykle poněkud odlišný, který neustále slyšíme, když mluvíme. Je to dáno právě šířením tohoto zvuku dutinami. Výsledný hlas obsahuje tedy více harmonických složek a jeho spektrum se nachází v rozmezí 80 Hz - 3 kHz. [1]

Síla hlasu je dána velikostí rozkmitu hlasivek a ten je určován velikostí vydechovaného proudu vzduchu. Při šepotu je hladina akustického tlaku asi 30 dB, hlasitá řeč 60 dB a křik přibližně 85 dB.

## 2 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ

Při neustálém vývoji zobrazovacích metod v lékařství je snaha zobrazit jednotlivé orgány a funkci lidského těla neinvazivní metodou stále větší a žádanější. Dnešní moderní počítačová tomografie či magnetická rezonance ještě nejsou schopny zobrazit dynamický vývoj pohybu hlasivek. Proto se pro diagnózu hlasivek stále používají invazivní metody vyšetření, které nejsou většinou z nás příjemné. Vývoj však pokročil a doba samotného vyšetření se snížila na několik málo vteřin, což umožňuje vyšetřit větší počet pacientů, i těch, kterým dávčí reflex dělá problém. Dnešním nejmodernějším systémem pro vyšetření hlasu je videolaryngostroboskopie, která poskytuje nejlepší zobrazovací techniku pro vyšetření hrtanu.

Úplně první zmínka o použití laryngoskopu se datuje k polovině 19. století. Manuel García, španělský zpěvák, hudební a hlasový pedagog, se zajímal o pohyby spojené z produkcí lidského hlasu. Roku 1854 publikoval vynález, kterým bylo možno pozorovat hrdlo a kmitající hlasivky pomocí malého ústního zrcátka a druhého většího zrcátka, které odráželo sluneční světlo přímo do hrtanu. V té době však nepředvídal, že by se tato metoda dala použít k diagnostice hlasového ústrojí. [8]



Obr. 2: Manuel García a první laryngoskop

Za posledních 30 let vývoje prodělala laryngologie velký skok kupředu díky znalosti anatomie a fyziologie. Metoda je nejvíce využívána pro klinické vyhodnocení stavu hrtanu a hlasivek.

Při klasických metodách vyšetření hrtanu (přímá laryngoskopie, zvětšovací laryngoskopie) se používá pevné světlo (např. žárovka), které osvětlí nitro hrtanu, takže vyšetřující lékař kmitání hlasivek nerozpozná. Principem stroboskopie je tento jev zobrazit, a proto se používá světlo, které periodicky osvětluje nitro hrtanu, ideálně při stejné frekvenci jako hlasivky. Pak se nám hlasivky jeví jako zastavené. Když záblesky osvětlují hlasivky s frekvencí o něco málo nižší, nastává iluze. Hlasivky se nám zdají, že se pohybují zpomaleně. Pohyby hlasivek však nejsou striktně periodické, takže iluze zpomaleného pohybu někdy nastává i při periodickém osvětlování.

Dnešní moderní videolaryngostroboskopický systém obsahuje mikrofon, kvalitní laryngoskop a videolaryngoskop, stroboskopický zdroj světla, PC propojené s citlivou CCD kamerou a software pro sběr a analýzu naměřených dat. Lékař vidí na monitoru aktuální obraz hrtanu pacienta a ovládacím prvkem na videolaryngoskopu spouští záznam. Součástí je nožní pedál, na kterém jsou vyvedeny další ovládací prvky [6].



Obr. 3 Videolaryngostroboskopický systém firmy KAYPENTAX

### 3 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ

Cílem této práce je navrhnout obvodové řešení zařízení, které by dokázalo osvětlovat hlasivky. Principiálně se bude jednat o LED stroboskop s řízením frekvence záblesků. Bude se skládat z mikrofону, zesilovače, pásmové korekce kmitočtu, bloku pro zpracování signálu a zdroje proudu pro LED.

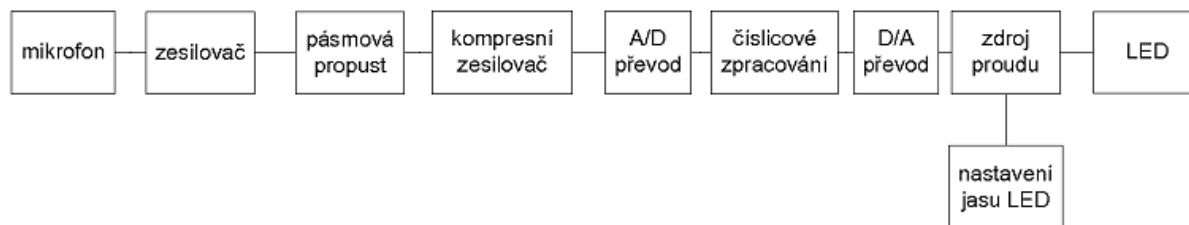
K návrhu a především k simulaci obvodu nám poslouží program OrCAD 10.0, v simulační prostředí Capture CIS. Je to program třídy SPICE (SPICE = Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), který umožňuje analýzu dějů v obvodech. Obsahuje základní tři typy analýz.

**Analýza v časové oblasti – Transient:** Jedná se o analýzu, kdy výsledkem jsou časové průběhy napětí, proudů a výkonů v obvodu. Odpovídá laboratornímu experimentu, kdy chování obvodu sledujeme pomocí osciloskopu. Kromě napájecích zdrojů musí být ve schématu i příslušné signální generátory (tj. nezávislé zdroje napětí a proudu).

**Stejnoseměrná analýza – DC:** Předpokládá se, že napětí a proudy se v čase nemění. Kromě napájecího zdroje může být na vstup připojen regulovatelný stejnosměrný zdroj. Výsledkem analýzy je závislost (stejnoseměrných) napětí a proudů na nějakém parametru – vstupním napětí/proudu, velikosti odporu rezistoru, teplotě, atd.

**Střídavá analýza – AC:** Na vstup obvodu je připojen harmonický (sinusový) generátor. Předpokládá se, že všechny napětí a proudy jsou harmonické, tj. v obvodu dochází pouze k zanedbatelnému zkreslení. Výsledkem jsou amplitudy a fázové posuny všech napětí a proudů (komplexní fázory) v závislosti na frekvenci signálu. Tato analýza umožňuje zjistit komplexní napěťové přenosy, impedance a admitance. Střídavá analýza je použitelná jen pro obvody, které pracují v lineárním režimu, tj. zesilovače, kmitočtové filtry, různé přenosové články. [10]

Pro modelování budeme používat především střídavou analýzu - AC, protože uvažujeme harmonický zdroj signálu a jeho kmitočtové charakteristiky.

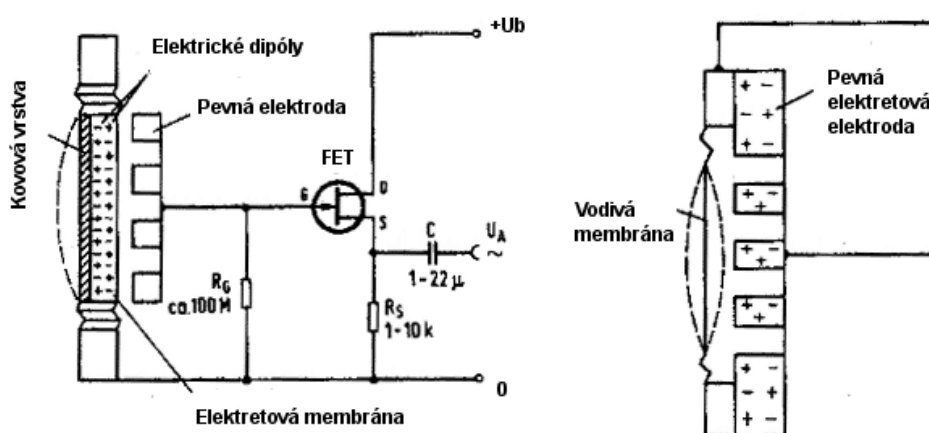


Obr. 4: Blokové schéma obvodového řešení



### 3.1 Mikrofon

Mikrofon je zařízení, které přeměňuje mechanické vlnění na elektrický signál. Existuje několik typů mikrofonů, ale jen některé z nich se dají použít jako příslušenství videolaryngostroboskopie. Vhodné se jeví mikrofony elektretové, kterých je několik druhů. Společné mají to, že elektrický signál zde vzniká pohybem vodivé membrány nikoli v magnetickém, ale v elektrickém poli. Umožňuje to vlastnost některých izolantů (elektretu), trvale udržet elektrickou polarizaci. Tím nutnost permanentního magnetu odpadá. U těchto mikrofonů je jedna elektroda opatřena vrstvou elektretu. Elektret je dielektrický materiál nesoucí permanentní elektrický náboj a není tedy potřeba zdroj polarizačního napětí. Většina elektretových mikrofonů obsahuje i FET tranzistor zesilující elektrický signál, proto tyto mikrofony potřebují napájení, jak je vidět na obrázku níže [5].



Obr. 5: Elektrické schéma elektretového mikrofonu

Některé moderní videolaryngoskopy v sobě integrují mikrofon, který snímá zvuk z hlasivek z bezprostřední blízkosti uvnitř hrtanu. My budeme však uvažovat o více používaném umístění mikrofonu a to na krku pomocí manžety co nejblíže v oblasti hlasivek. Z běžně dostupných modelů můžeme vybrat elektretovou kapsli MCE 101 se všesměrovou charakteristikou.



Obr. 6: Elektretový mikrofon MCE101

### Technické údaje

Frekvenční rozsah:	50 - 12 000 Hz
Citlivost:	5 mV/Pa/1 kHz
Impedance:	600Ω
Pracovní napájení:	1,5 - 10 V
Spotřeba:	1 mA
RL:	1,5 - 2,2 kΩ
C:	0,1 - 4,7 μF
Odstup signál/šum:	>40 dB
Provozní teplota:	0 - 40°C

### Volíme:

$$U = 5 \text{ V}$$

$$R_1 = 1,8 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 2 \text{ }\mu\text{F}$$

Je třeba zmínit, jaké hodnoty výstupního napětí je mikrofon schopen vybudit. Použitý mikrofon má citlivost 5 mV/Pa/1kHz, to znamená, že při nižších změnách tlaku než 1 Pa bude výstupní napětí na mikrofonu menší než 5 mV, a proto jej bude potřeba dostatečně zesílit. Předpokládáme, že průměrný zdravý člověk dokáže při laryngoskopii vybudit zvuk o hladině akustického tlaku v průměru 54 až 70 dB, ale člověk s poruchou hlasu vybudí mnohem méně. Proto je třeba si uvědomit, jak moc bude signál potřeba zesílit k dalšímu zpracování. Budeme potřebovat, aby velikost signálu vstupujícího na A/D převodník byla typicky v rozsahu 0 - 3,3V dle použitého A/D převodníku. Pro přibližný odhad zesílení signálu slouží tabulka na další straně.

Hladina akustického tlaku se vypočítá jako:

$$SPL = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} [dB] \quad (3.1)$$

kde  $p_0 = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$ .

Tab 1.: Přepočítání akustického tlaku na SPL

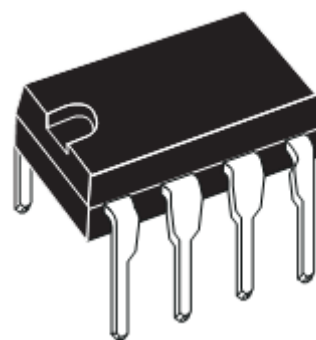
frekvence = 1kHz			zesílení
akustický tlak	SPL	U	100
[Pa]	[dB]	[mV]	$U_{\text{výstup}}$ [mV]
1	94	5,00	500,00
0,9	93	4,50	450,00
0,8	92	4,00	400,00
0,7	91	3,50	350,00
0,6	90	3,00	300,00
0,5	88	2,50	250,00
0,4	86	2,00	200,00
0,3	84	1,50	150,00
0,2	80	1,00	100,00
0,1	74	0,50	50,00
0,09	73	0,45	45,00
0,08	72	0,40	40,00
0,07	71	0,35	35,00
0,06	70	0,30	30,00
0,05	68	0,25	25,00
0,04	66	0,20	20,00
0,03	64	0,15	15,00
0,02	60	0,10	10,00
0,01	54	0,05	5,00
0,009	53	0,05	4,50
0,008	52	0,04	4,00
0,007	51	0,04	3,50
0,006	50	0,03	3,00
0,005	48	0,03	2,50
0,004	46	0,02	2,00
0,003	44	0,02	1,50
0,002	40	0,010	1,00
0,001	34	5,00E-03	0,50
0,0009	33	4,50E-03	0,45
0,0008	32	4,00E-03	0,40
0,0007	31	3,50E-03	0,35
0,0006	30	3,00E-03	0,30
0,0005	28	2,50E-03	0,25
0,0004	26	2,00E-03	0,20
0,0003	24	1,50E-03	0,15
0,0002	20	1,00E-03	0,10
0,0001	14	5,00E-04	0,05

## 3.2 Mikrofonní předzesilovač

Podle zvoleného typu mikrofonu je vhodné volit typ i předzesilovače. Ten má za úkol zesílit a vyfiltrovat vstupní signál z mikrofonu k dalšímu zpracování. Jako předzesilovač může být použit tranzistor nebo operační zesilovač (OZ). Operační zesilovač má však nespornou výhodu v tom, že nabízí větší komfort při návrhu, má lepší parametry a taky jeho cena je v dnešní době přijatelná. Na základě praktických zkušeností je vhodné použít například typ OP 07, který se vyznačuje minimálním šumem, driftem a ofsetem [19].

### OP 07

- malý proudový ofset
- nízký šum
- vstupní odpor:  $10^{12} \Omega$
- pracovní napájení:  $\pm 3V$  až  $\pm 18 V$
- vstupní rozdílové napětí:  $\pm 14 V$
- pracovní teplota: od  $-55$  do  $+125$  °C
- CMMR: min 110 dB



### CR článek

CR článek nám slouží jako pasivní horní propust. Jeho úkolem je potlačení nízkých frekvencí, které vznikají přeměnou akustické energie na elektrické napětí u mikrofonu.

Použitý mikrofon má frekvenční rozsah od 50 Hz a proto je vhodné všechny kmitočty pod touto hranicí odfiltrovat.

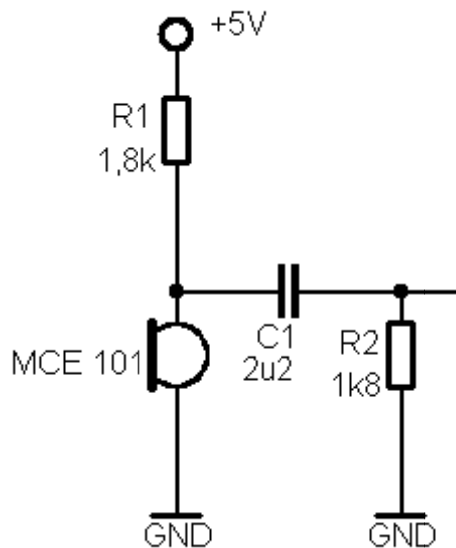
### Volíme:

mezní frekvence  $f_m = 40$  Hz

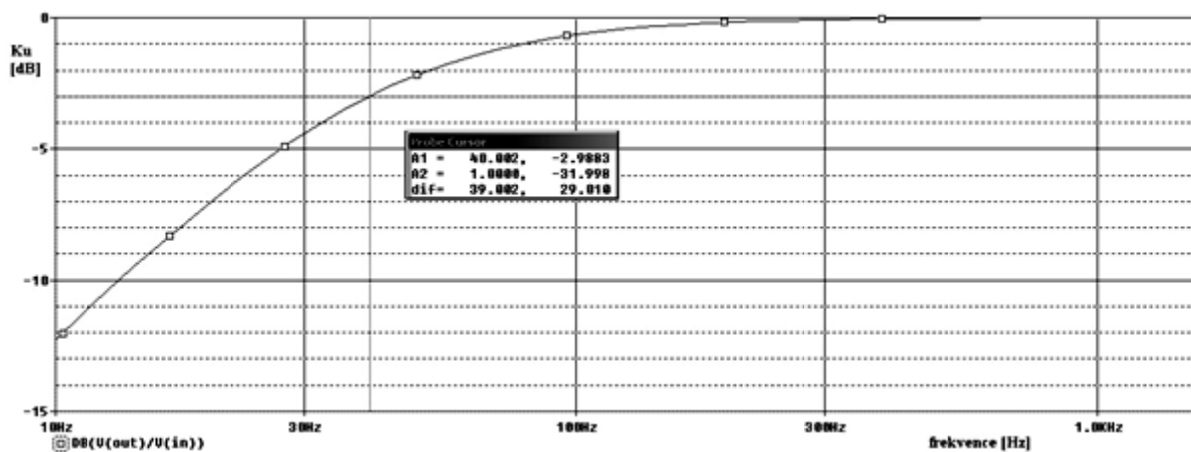
$C_1 = 2,2$  uF

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot R_2} \rightarrow R_2 = \frac{1}{2\pi \cdot C_1 \cdot f_m} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 40} = 1,808 \text{ k}\Omega \quad (3.2)$$

volíme  $R_2 = 1.8 \text{ k}\Omega$



Obr. 7: Zapojení CR filtru



Obr. 8: Přenos CR filtru

Dle grafu je vidět, že přenos CR článku splňuje podmínky a pokles o 3dB se nachází na frekvenci 40Hz. Je vhodné, aby filtr nepotlačoval frekvence od 50Hz, proto byla zvolena mezní frekvence 40Hz kvůli jeho strmosti a aby pak navazoval na další filtry.

## Zesilovač

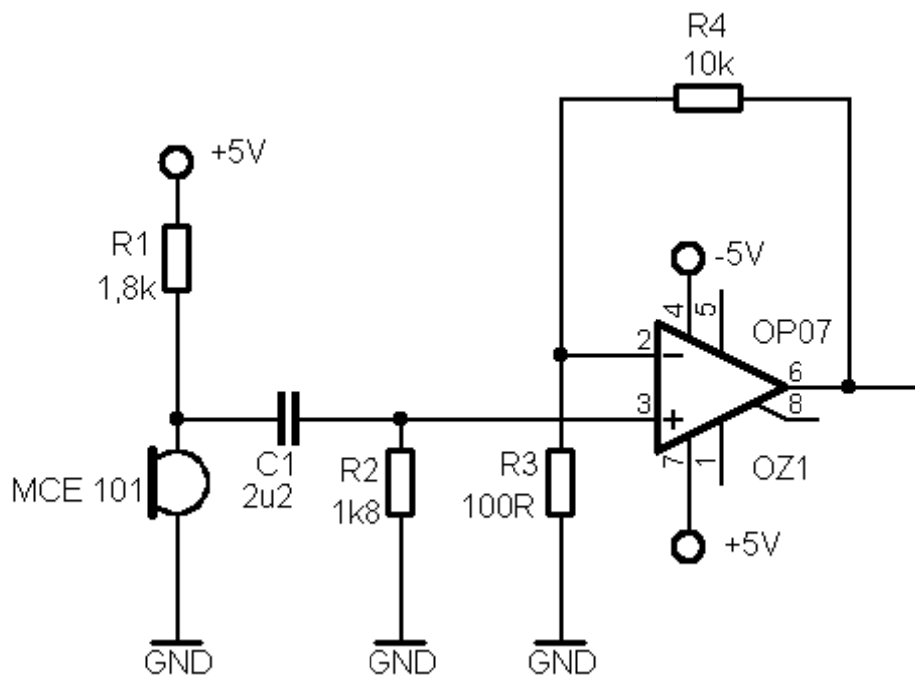
Volíme neinvertující zapojení, protože invertující zesilovač má menší konečný vstupní odpor. Zesilovač bude sloužit ke skokovému zesílení  $k = 100$ .

Volíme:

volíme  $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$

zesílení  $A_u = 100$

$$A_u = 1 + \frac{R_4}{R_3} \rightarrow R_3 = \frac{R_4}{100 - 1} = \frac{10000}{99} = \underline{\underline{101 \Omega}} \dots \text{volíme } R_3 = 100 \Omega \quad (3.3)$$



Obr. 9: Schéma mikrofonního předzesilovače

### 3.3 Pásmová propust

Pásmová propust je typ selektivního filtru, který přenáší všechny frekvence mezi dvěma mezními kmitočty a mimo ně potlačuje všechny ostatní. Jako optimální řešení se jeví zapojení kaskády filtrů horní a dolní propusti kvůli strmosti a minimálnímu zvlnění v přenášeném pásmu. Pro oba filtry volíme topologické zapojení Sallen - Key, které využívá minimum součástek s optimálními vlastnostmi.

#### Návrh horní propusti 2. řádu s jedním OZ pro $Q < 15$

Postupujeme dle návodu s použitím vzorců dle literatury [3].

Volíme: jednotkové zesílení  $A_u = 1$ .  
mezní frekvence  $F_0 = 50$  Hz  
činitel jakosti  $Q = 1$

1. Výpočet  $\alpha_{\min}$

$$\alpha_{\min} = 4Q^2 = 4 \cdot 1 = \underline{\underline{4}} \quad (3.4)$$

2. Volba C1 a C2

$$C3 = C4 = C = \frac{10^{-7}}{\sqrt{F_0}} = \frac{10^{-7}}{\sqrt{50}} = \underline{\underline{4,243 \cdot 10^{-8} F}} \quad (3.5)$$

volíme  $C3 = C4 = 47$  nF

3. Výpočet R5 a R6

$$R = \frac{1}{(2\pi \cdot F_0 \cdot C)} = \frac{1}{(2\pi \cdot 50 \cdot 4,234 \cdot 10^{-8})} = \underline{\underline{7,518 \cdot 10^4 \Omega}} \quad (3.6)$$

$$R5 = \frac{R}{\sqrt{\alpha}} = \frac{7,518 \cdot 10^4}{\sqrt{4}} = \underline{\underline{3,759 \cdot 10^4 \Omega}} \quad (3.7)$$

$$R6 = R \cdot \sqrt{\alpha} = 7,518 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{4} = \underline{\underline{1,504 \cdot 10^5 \Omega}} \quad (3.8)$$

volíme  $R5 = 33$  k $\Omega$ ;  $R6 = 130$  k $\Omega$

$$\alpha_{skut} = \frac{R6}{R5} = \frac{130}{33} = \underline{\underline{3,939}} \quad (3.9)$$

## Návrh dolní propusti 2. řádu s jedním OZ pro $Q < 15$

Postupujeme dle návodu s použitím vzorců dle literatury [3].

Volíme: jednotkové zesílení  $A_u = 1$ .  
mezní frekvence  $F_0 = 550$  Hz  
činitel jakosti  $Q = 1$

### 4. Výpočet $\beta_{\min}$

$$\beta_{\min} = 4Q^2 = 4 \cdot 1 = \underline{\underline{4}} \quad (3.10)$$

### 5. Volba $C_4$ a $C_5$

$$C = \frac{10^{-7}}{\sqrt{F_0}} = \frac{10^{-7}}{\sqrt{550}} = \underline{\underline{4,264 \cdot 10^{-9} F}} \quad (3.11)$$

$$C_{5_{\max}} = \frac{C}{\sqrt{\beta_{\min}}} = \frac{4,264 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{4}} = \underline{\underline{2,132 \cdot 10^{-9} F}} \quad (3.12)$$

$$C_{6_{\min}} = C \cdot \sqrt{\beta_{\min}} = 4,264 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{4} = \underline{\underline{8,528 \cdot 10^{-9} F}} \quad (3.13)$$

volíme  $C_5 = 22$  nF;  $C_6 = 100$  nF

$$\beta_{\text{real}} = \frac{C_4}{C_5} = \frac{100 \cdot 10^{-9}}{22 \cdot 10^{-9}} = \underline{\underline{4,545}} \quad (3.14)$$

### 6. Stanovení $\alpha$

- protože:

$$\beta_{\min} < \beta_{\text{real}}, \quad a = \frac{\sqrt{\beta_{\text{real}}}}{2Q}, \quad \text{tak} \quad (3.15)$$

$$\alpha = \frac{1}{\left(a + \sqrt{a^2 - 1}\right)^2} = \frac{1}{\left(1,066 + \sqrt{1,066^2 - 1}\right)^2} = \underline{\underline{1,07}} \quad (3.16)$$



7. Výpočet R7 a R8:

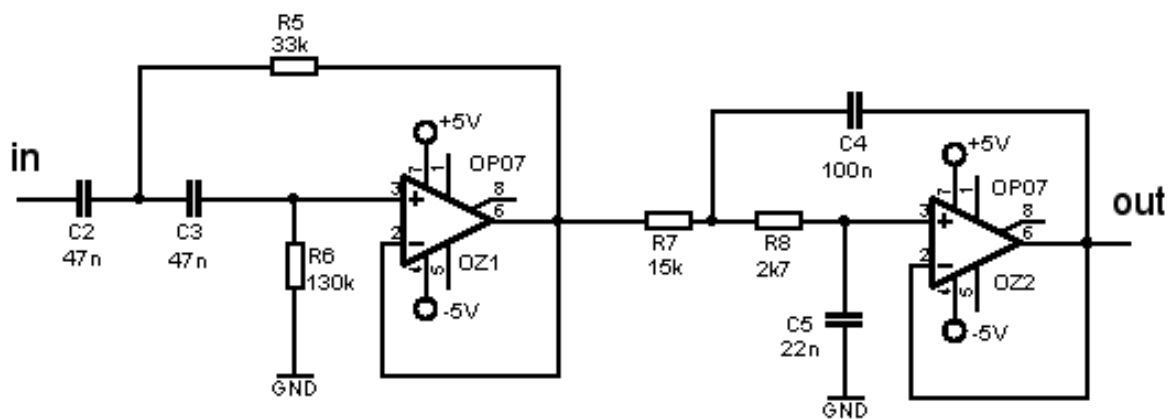
$$R = \frac{1}{(2\pi F_0 + \sqrt{C_1 C_2})} = \frac{1}{(2\pi \cdot 550 + \sqrt{100 \cdot 10^{-9} \cdot 22 \cdot 10^{-9}})} = \underline{\underline{6,17 \cdot 10^3 \Omega}} \quad (3.17)$$

$$R8 = \frac{R}{\sqrt{\alpha}} = \frac{3,0849 \cdot 10^3}{\sqrt{1,07}} = \underline{\underline{3,085 \cdot 10^3 \Omega}} \quad (3.18)$$

$$R7 = R \cdot \sqrt{\alpha} = 3,0849 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{1,07} = \underline{\underline{1,234 \cdot 10^4 \Omega}} \quad (3.19)$$

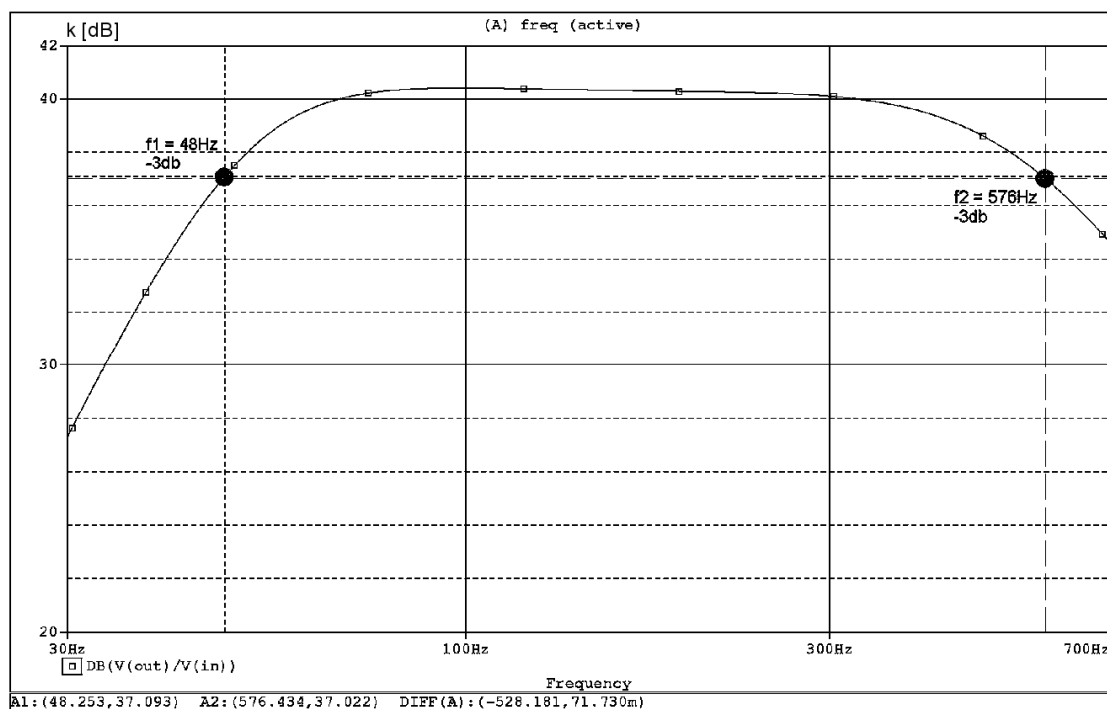
volíme R8 = 2,7 kΩ; R7 = 15 kΩ

$$\alpha_{skut} = \frac{R7}{R8} = \frac{15}{2,7} = \underline{\underline{5,556}} \quad (3.20)$$



Obr. 10: Schéma pásmové propusti

Na Obr. 10 vidíme zapojení pásmové propusti a na Obr. 11 kmitočtovou modulovou charakteristiku filtru. Díky předzesilovači se signál zesílí 100x (čemuž odpovídá zesílení o 40dB). Vidíme, že pokles o 3dB je na frekvencích 48 Hz a na 576 Hz, což vyhovuje, protože frekvence základního hlasivkového tónu se nachází právě v tomto rozsahu. Pásmový filtr má téměř jednotkové zesílení v přenášeném pásmu. Je přizpůsoben na pasivní CR filtr, který mu předchází. Charakteristika má dostatečnou strmost a zároveň přenášené pásmo není nijak zvlněno. Kdybychom však chtěli, aby strmost byla vyšší, museli bychom zvýšit činitel jakosti a tím pádem by začalo docházet ke zvlnění kolem frekvencí, kde dochází k poklesu o -3 dB, což je nevhodné.

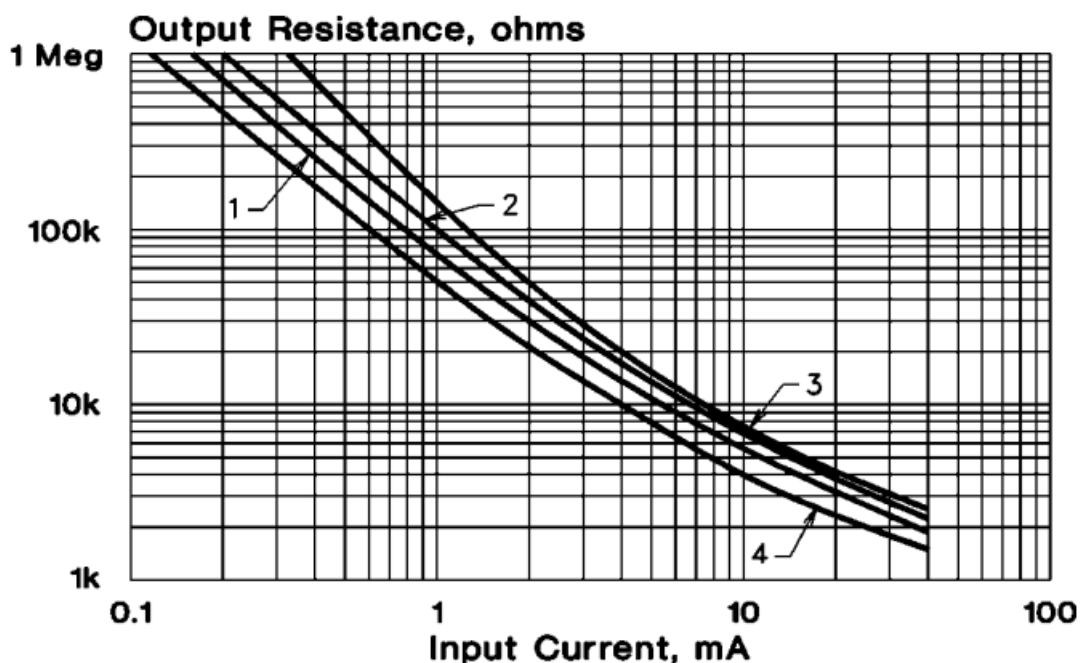


Obr. 11: Kmitočtová modulová charakteristika filtru pásmová propust

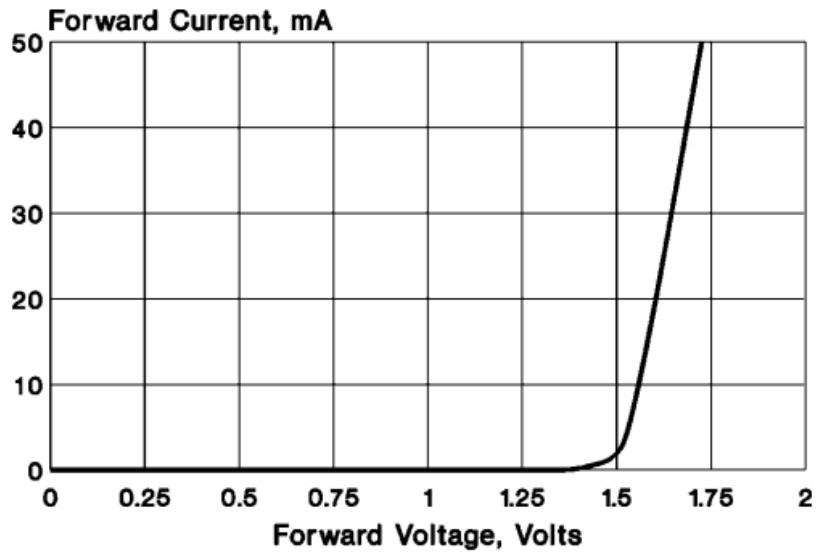
### 3.4 Kompresní zesilovač

Pokud obecně zpracováváme analogový signál, který budeme dále převádět na diskretní, je vždy vhodné tento signál správně navzorkovat a snažit se využít celý dynamický rozsah A/D převodníku. Automatický zesilovač slouží k tomu, aby se při měnící se amplitudě signálu přiváděla na A/D převodník, v ideálním případě, konstantní úroveň napětí. Existují různé doporučené zapojení zesilovačů, kde jako regulační prvek slouží tranzistor. Má to však svá úskalí a tento zesilovač trpí mírným zkreslením signálu. Též se vyskytuje problém s galvanickým oddělením a zapojením na společnou zem. Elegantnějším řešením je použít speciálního prvku a to optočlenu. V našem konkrétním případě je to elektronická součástka, která v jednom pouzdře sdružuje LED a fotorezistor, které jsou galvanicky odděleny, takže odpadají různé omezení. Tyto obvody se označují jako vactroly. Odpor rezistoru dosahuje za temna řádově megaohmy, za svitu LED se sníží na řádově jednotky kiloohmů. Součástka zaručuje téměř nulové harmonické zkreslení signálu a velký dynamický rozsah, proto se s oblibou používá v audiotechnice. Obvod v podstatě funguje jako elektricky ovládaný potenciometr, má nízkou spotřebu, a je proto i vhodný pro použití v zařízeních používající napájení z baterií.

Optočlenu se vyrábí v různých řadách, pro naše účely byl zvolen optočlen typu VTL5C6. Ten se vyznačuje širokým rozsahem výstupního odporu v závislosti na proudu LED, který můžeme vidět na grafu níže. Jednotlivé křivky vyznačují různé provozní podmínky obvodu. Podrobnosti nalezneme v datasheetu. Důležité grafy jsou uvedeny níže.

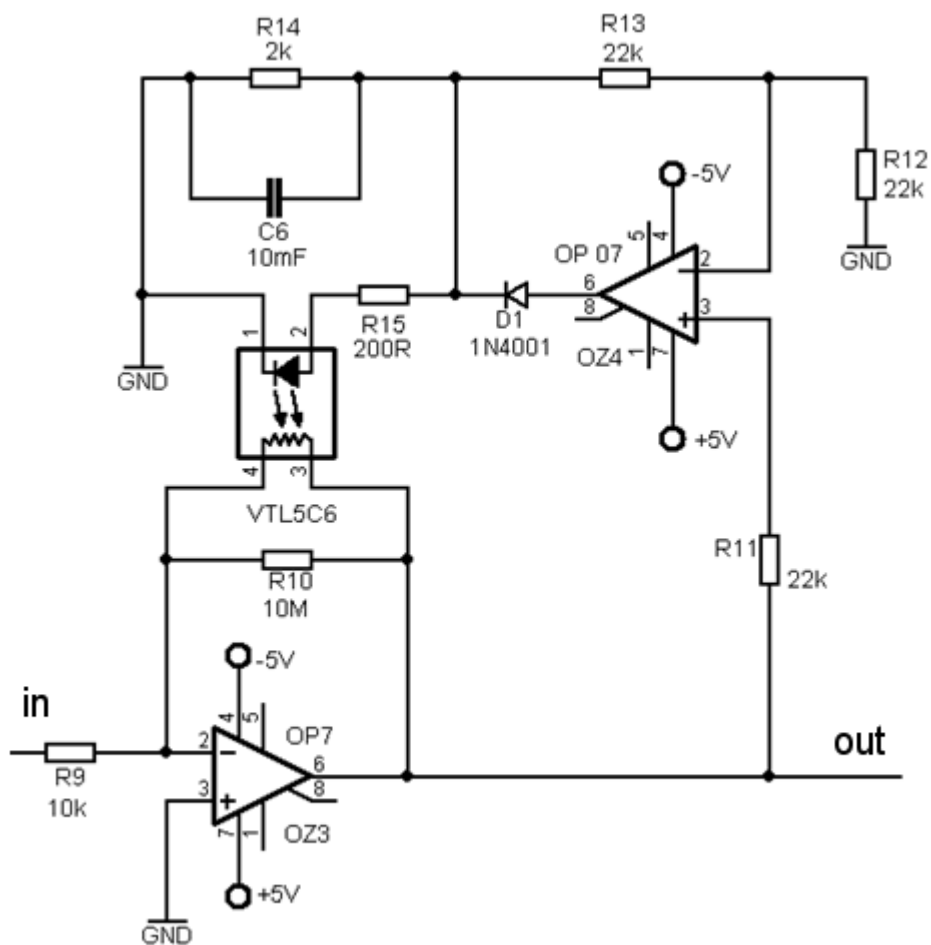


Obr. 12: Graf závislosti výstupního odporu na proudu LED



Obr.13: Volt - ampérová charakteristika LED v pouzdru optočlenu

Zapojení optočlenu jako regulačního prvku může být následující. Dle datasheetu bylo použito doporučené zapojení, které je na obrázku níže.



Obr. 14: Zapojení vactrolu do smyčky zpětné vazby jako regulačního prvku

Obvod funguje následujícím způsobem. Na vstup je přiveden střídavý signál, který je přiveden na invertující vstup zesilovače OZ3, kde se ve smyčce zpětné vazby nachází obvod VTL5C6, který upravuje zisk zesilovače. Signál dále postupuje na neinvertující vstup zesilovače OZ4, který řídí proud LED. Když napětí na LED dosáhne 1,6 V, začíná zkrz ní protékat proud, který řídí hodnotu fotoodporu (viz. Obr. 12) Zesilovač OZ4 je zapojen jako jednocestný usměrňovač, rezistor R14 a kondenzátor C6 slouží k vyhlazení napětí mezi dvěma kladnými půlvlnami střídavého signálu, které se objeví za diodou D1, na přibližně stejnosměrné napětí. Odpor R15 slouží jako proudová ochrana LED v obvodu VTL5C3 a zároveň ovlivňuje velikost výstupního napětí. Tento obvod dokáže uregulovat ze vstupního napětí 1-600 mV na výstupních 0,9 V špička-špička. Graf této závislosti je na obrázku níže, výstupní hodnota napětí je v efektivních hodnotách (odpor R7 odpovídá odporu R15 v zapojení výše) [16].

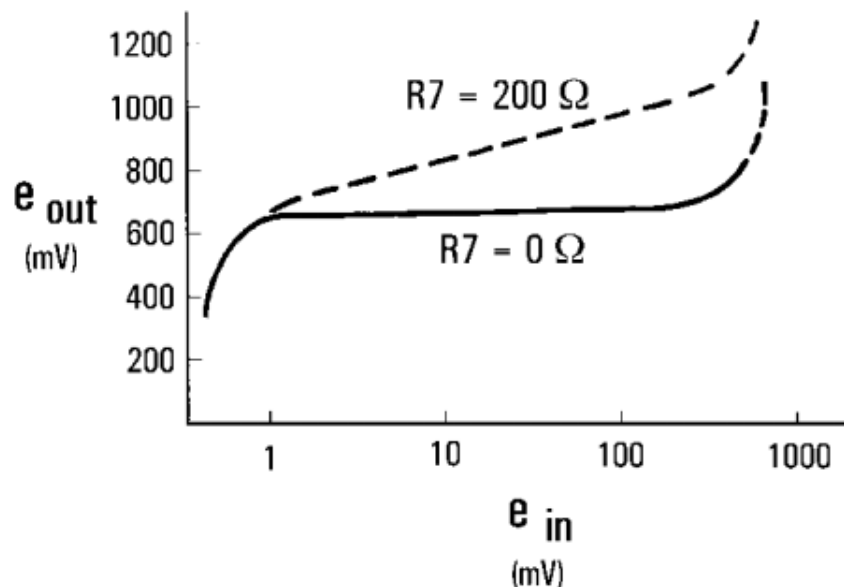
Zesílení pro A1 se dá psát dle schématu výše jako

$$A_u = \frac{R_v // R10}{R9} \quad (3.21)$$

Víme, že  $R_v$  se mění v rozmezí  $R_v' = 100\text{M}\Omega$  až  $R_v'' = 3\text{ k}\Omega$ . Potom pro zesílení platí:

$$A_u = \frac{R_v' // R10}{R9} = \frac{R_v' \cdot R10}{R9(R_v' + R10)} = \frac{100 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 (100 \cdot 10^6 + 10 \cdot 10^6)} = \underline{\underline{909,09}} \quad (3.22)$$

$$A_u = \frac{R_v'' // R10}{R9} = \frac{R_v'' \cdot R10}{R9(R_v'' + R10)} = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 (3 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^6)} = \underline{\underline{0,3}} \quad (3.23)$$

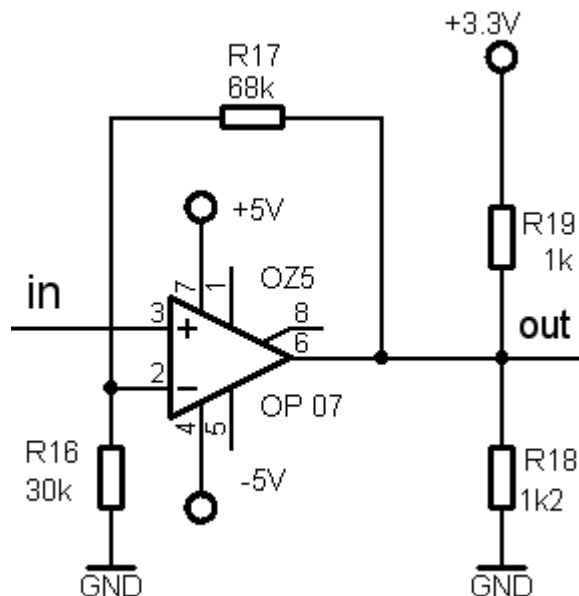


Obr. 15: Graf závislosti výstupního napětí  $e_{out}$  na vstupním napětí  $e_{in}$

### 3.5 Výstupní zesilovač a posunutí signálu

Za automatickým zesilovačem je poslední zesilovač, který zesílí signál do maximálního rozsahu A/D převodníku, který většinou 3,3 V. Za ním se nachází napěťový dělič, který posouvá signál na polovinu napájecího napětí tak, aby se celý nacházel v kladných hodnotách napětí.

Maximální hodnota vstupní napětí se předpokládá  $U = 0,9$  V špička-špička, pokud se v obvodu nepoužije odpor R15.



Obr. 16: Výstupní zesilovač s děličem napětí

Pro zesílení OZ5 platí:

$$A_u = 1 + \frac{R17}{R16} = 1 + \frac{68k}{30k} = \underline{\underline{3,267}} \quad (3.24)$$

Dělič napětí s odpory R18 a R19 posouvá signál o 1,5 V do kladných hodnot.

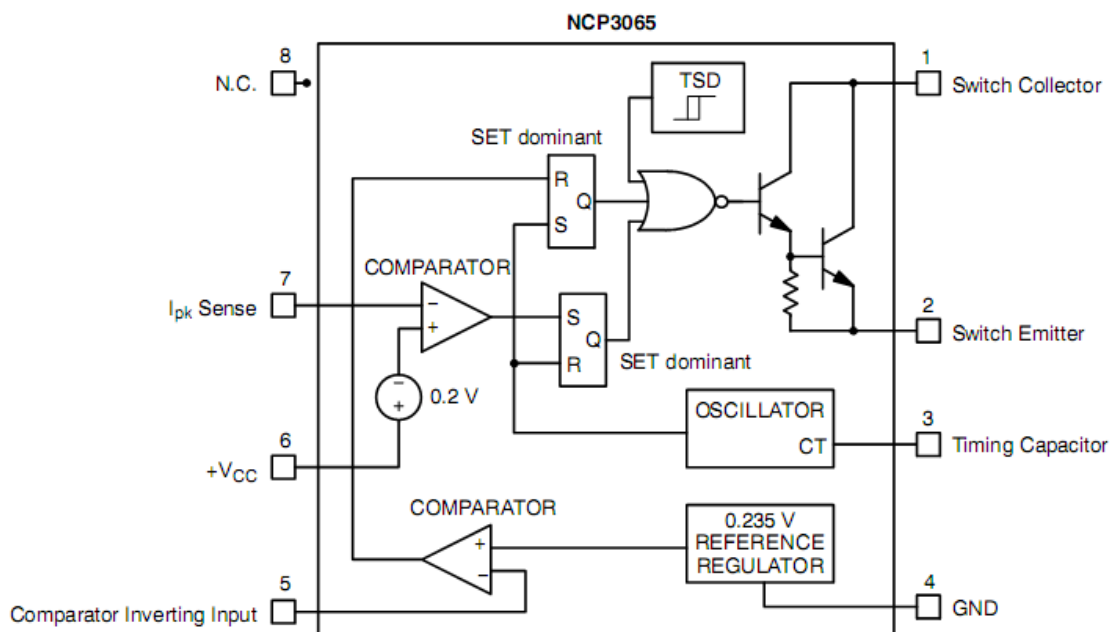
### 3.6 Zdroj proudu pro LED

Všechny dnešní vysoce svítivé LED potřebují pro svůj bezproblémový chod kvalitní zdroj konstantního proudu kvůli jejich širokému propustnému napětí a nelineární voltampérové charakteristice. Vzhledem k tomu, že LED postupně nahrazují klasické žárovky v kapesních svítilnách, používají se k osvětlení interiérů, v automobilovém průmyslu, tak je potřeba nějakým způsobem napájení těchto LED elegantně vyřešit. V dnešní době se na trhu nachází speciální integrované obvody, které umí řešit tuto problematiku. Umí se vypořádat s širokým rozsahem napájecích napětí, jak střídavých tak i stejnosměrných. Jedním z nich je obvod firmy ON Semiconductor a to NCP3065. Tento obvod funguje jako spínaný zdroj konstantního proudu a je primárně určen pro napájení vysoce svítivých LED.

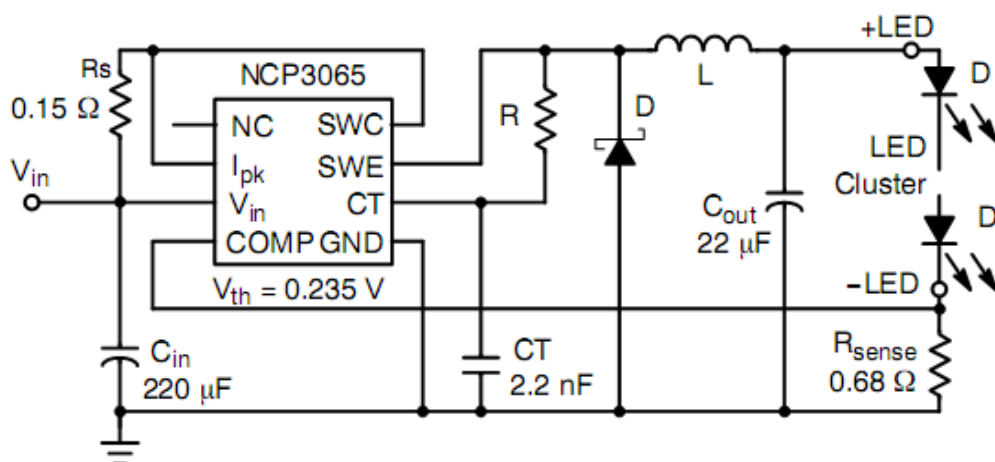
Tento měnič má velmi nízké zpětnovazebné napětí  $U = 0,235 \text{ V}$ , které se používá k regulování proudu LED. Umožňuje dodávat konstantní proud do 1,5 A. Důležitá schémata jsou níže [15].

### Hlavní vlastnosti

- Výstupní proud až 1,5 A
- Vstupní napájecí napětí  $U_{cc} 3 \text{ V} - 40 \text{ V}$
- Nízké zpětnovazební napětí  $U = 0,235 \text{ V}$
- Kontrola proudu v každém cyklu
- Rychlost spínání do 250 kHz
- Vnitřní teplotní pojistka s hysterezí
- Možnost řídit jas LED PWM signálem



Obr. 17: Vnitřní zapojení obvodu



Obr. 18: Typické zapojení obvodu

Z datasheetu se dočteme, že tento obvod umožňuje změnou prvků přizpůsobit provoz různě výkonných typů LED. Tuto skutečnost dohledáme v dokumentu AND8298 [14]. Pro naši konkrétní LED s výstupním napětím 350 mA volíme velikosti prvků dle tabulky níže. Máme na výběr, zda-li použijeme kondenzátor  $C_{out}$  či nikoliv. Volíme variantu s kondenzátorem, protože se tím zvyšuje účinnost zdroje o přibližně 3%. Dále je v dokumentu doporučená Schottkyho dioda typu 1A/40V.

Pro výstupní proud LED platí vztah [15] :

$$I_{out} = \frac{V_{REF}}{R_{sense}} = \frac{0,235}{0,68} = 345,59 \text{ mA}. \quad (3.25)$$

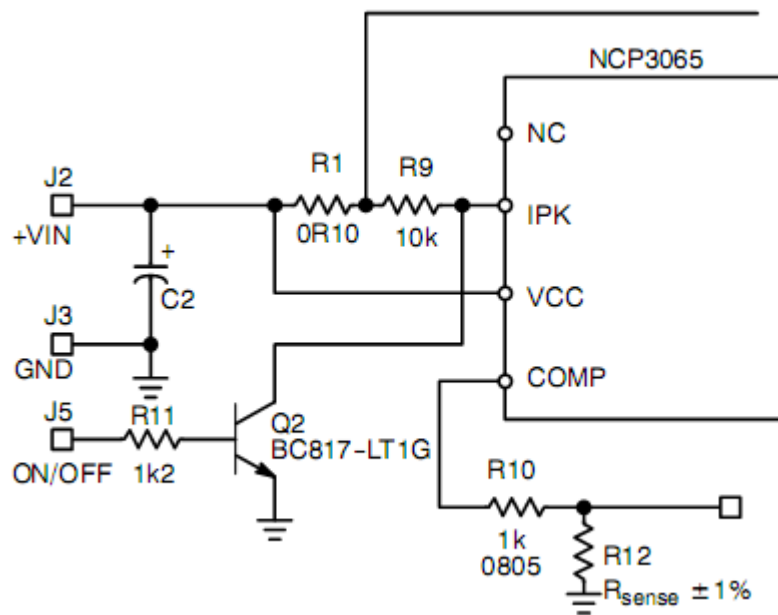
Pro regulaci jasu LED je za potřebí, měnit proud, nikoliv napětí. Tento obvod však umožňuje měnit proud LED PWM signálem pouhou změnou střidy. Výhodou tohoto řešení je, že nedochází k žádným parazitním zákrmitům při spínání napětí tohoto obvodu. Zapojení je na Obr. 19. Na místo tranzistoru BC-817 lze použít dostupnější náhradu v podobě BC-337. Kondenzátor C2 slouží pro dodatečnou filtraci vstupního napětí. V případě stabilizovaného zdroje ho lze vypustit.

Napájení obvodu je doporučeno dle datasheetu  $U_{cc}$  10-14V

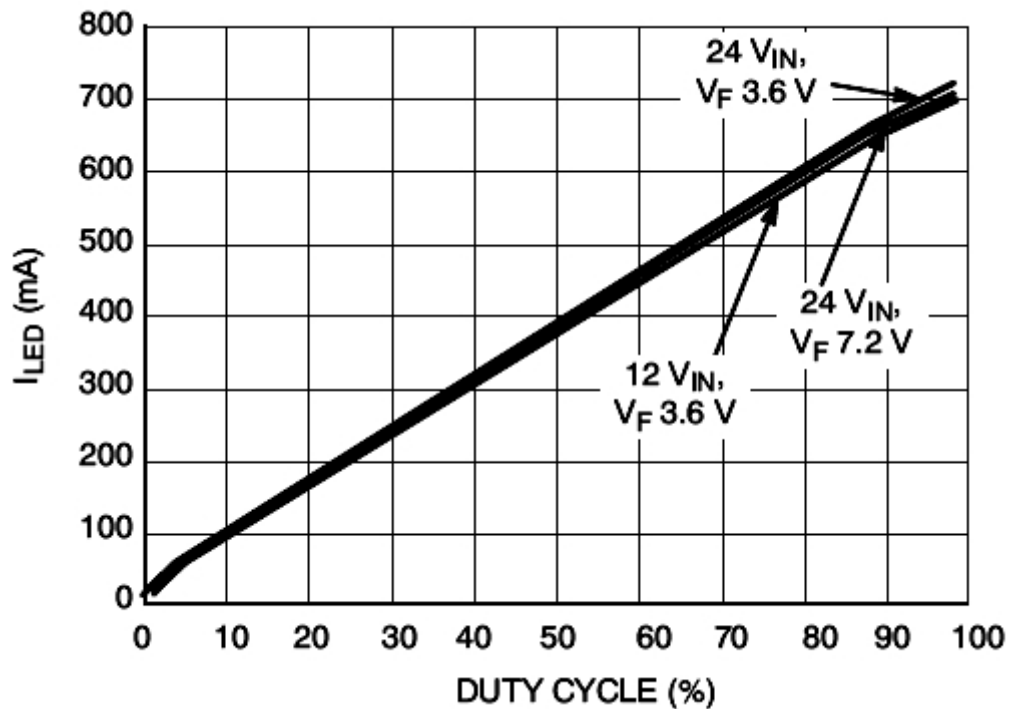
Tab 2.: Hodnoty prvků pro různé konfigurace

LED Driver	Application	$V_{IN}$	$I_{LED}$	$V_F$	L	$C_{OUT}$	R8
		(V)	(mA)	(V)	( $\mu$ H)	( $\mu$ F)	( $\Omega$ )
BUCK	12 V <sub>DC</sub> 1 W LED	10 - 14	350	3.6	47	100	12k
					150	0	3k3
	12 V <sub>DC</sub> 3 W LED	10 - 14	700 or 350	3.6 or 7.2	47	100	16k
					150	0	12k
	12 V <sub>DC</sub> 5 W LED	10 - 14	700 or 1000	7.2 or 3.6	47	100	12k
					150	0	12k
	24 V <sub>DC</sub> 5 W LED	21 - 27	350	14	68	100	160k
					220	0	39k
	24 V <sub>DC</sub> 10 W LED	21 - 27	700	14	68	100	150k
					220	0	100k
	12 V <sub>AC</sub> 1 W LED	14 - 20	350	3.6	47	100	7k5
					220	0	7k5
	12 V <sub>AC</sub> 3 W LED	14 - 20	700 or 350	3.6 or 7.2	47	100	22k
					220	0	22k
12 V <sub>AC</sub> 5 W LED	14 - 20	700 or 1000	7.2 or 3.6	47	100	36k	
				220	0	100k/16k	
12 V <sub>AC</sub> 5 W	14 - 20	350	14	47	100	NU	
				220	0	NU	
12 V <sub>AC</sub> 15 W	21 - 27	1000	14	47	100	82k	





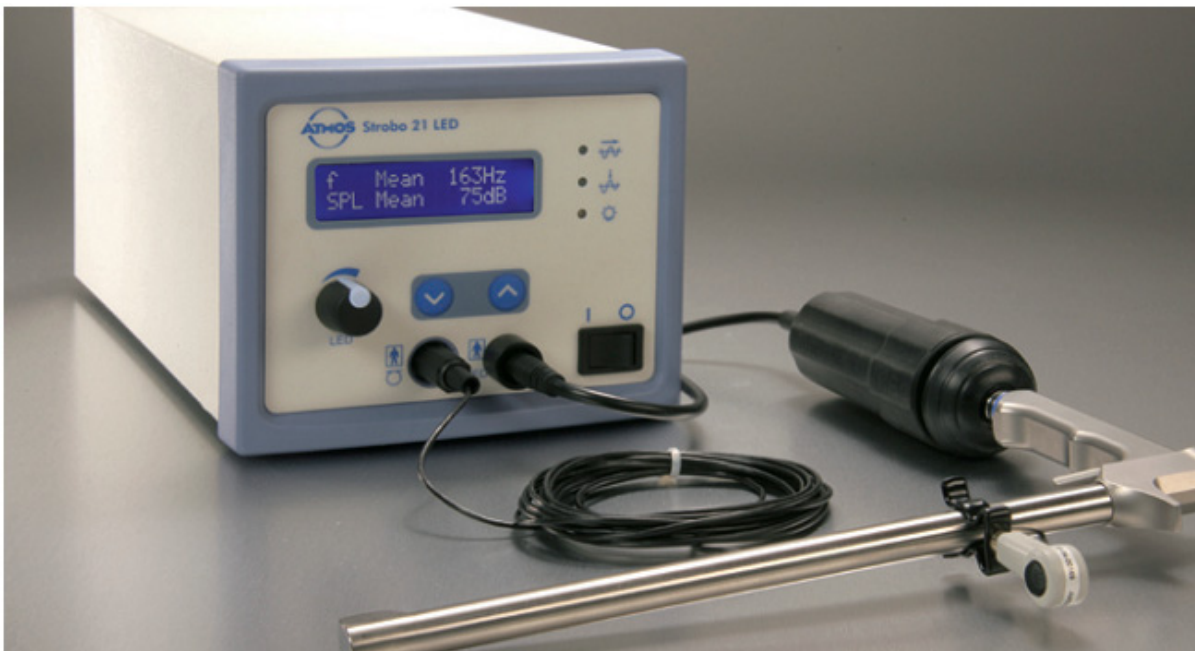
Obr. 19: Zapojení obvodu pro řízení jasu LED



Obr. 20: Graf závislosti šířky pulzů na proudu LED

### 3.7 LED dioda

Jako stroboskopický zdroj světla se většinou používají halogenové a xenonové výbojky. Mají však velký příkon, zahřívají se a musí se aktivně chladit. Dnes se na trh dostávají zdroje s výkonnými LED, které již poskytují podobný světelný výkon. Naskytá se zde otázka k diskusi, které zařízení je lepší z hlediska teploty barevného podání. Technologie LED se stále vyvíjí a nabízí uplatnění v různých oborech. Typický zástupce LED stroboskopu je na obrázku níže [7].



Obr. 21: ATMOS Strobo 21 LED

#### Technické parametry ATMOS Strobo 21 LED:

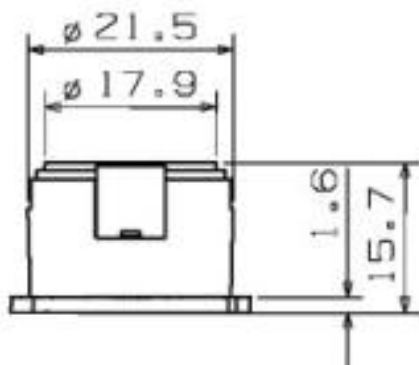
- přímé propojení k laryngoskopu
- zamrznutí obrazu s nastavitelnou fází a módem zpomaleného pohybu pomocí nožního pedálu
- zobrazení aktuální frekvence hlasu a hladiny akustického tlaku
- frekvence záblesků 70 – 500 Hz bez redukce, 500 – 1000 Hz automaticky s redukcí
- napájení 110V / 230V
- příkon 250 W
- mikrofon

LED je elektronická součástka obsahující přechod P-N. LED jsou vyráběny v barvách spektra, a proto nelze přímo emitovat bílé světlo, které vzniká z barevných spekter. Proto pravé bílé LED využívají luminoforu. LED mají výhodu v cenové dostupnosti a pracují s poměrně malými hodnotami napětí a proudu při zároveň vysokému světelnému toku.

Pro naši potřebu bude užita LED, která bude mít za úkol osvětlovat hlasivky ve frekvencích 70-500 Hz. Z internetových katalogů bychom zvolili vysoce svítivou LED firmy Luxeon. Jedná se o řadu Luxeon Star/O a typ LXHL-NWE8. Její běžné použití je v kapesních svítilnách, automobilovém průmyslu a podobně [22].

#### **Technické parametry LXHL-NWE8 :**

Světelný tok	45 lm
Maximální ss proud	350 mA
Napětí v propustním směru	3,42 V
Barva	bílá 5500 K
Váha	0,6 g



Obr. 22: LED dioda firmy Luxeon

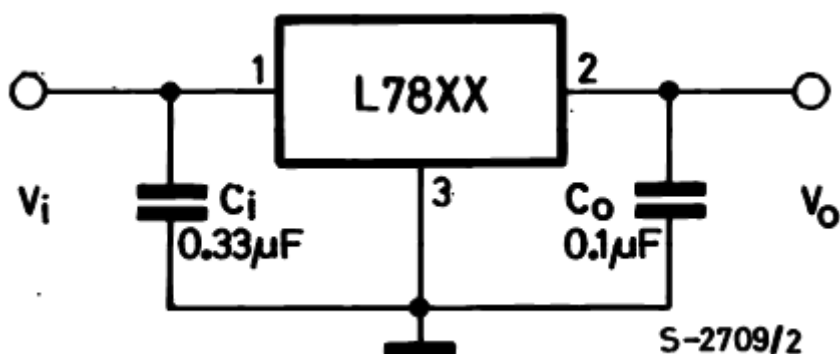
### 3.8 Napájení

K bezproblémovému chodu zařízení může posloužit libovolný stabilizovaný zdroj napětí od 10 V do 14 V, schopný dodávat maximální proud alespoň 1000mA. Ohledně ceny a parametrů vyhovuje stabilizovaná zdroj MW-SYS1308-2412 2.1, který při napětí 12V dodává 2000 mA [17]. Zařízení by mohlo být napájeno i z baterií, pokud by se uvažovalo o přenosný typ přístroje.



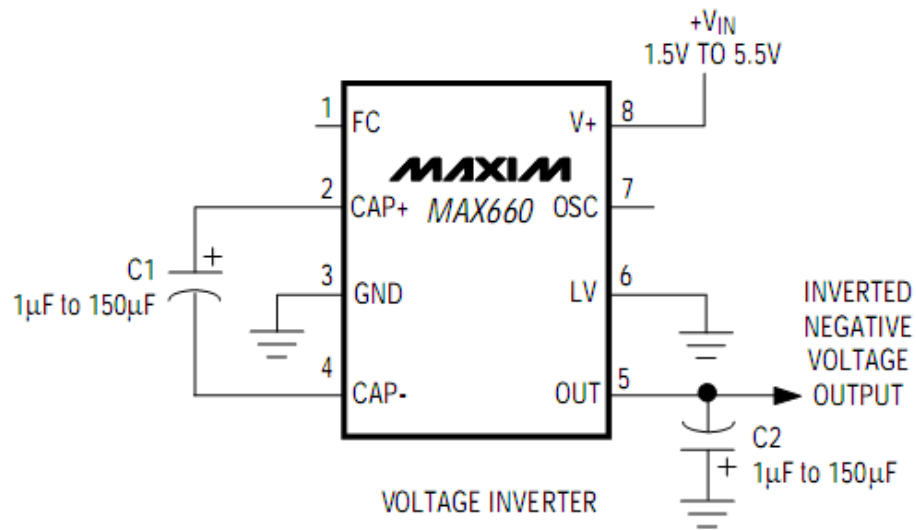
Obr. 23: Stabilizovaný zdroj MW-SYS1308-2412

K napájení mikrofonu a operačních zesilovačů je použit lineární regulátor L7805C, který mění vstupní napětí na 5 V a dodá proud až 1,5 A [21].



Obr. 24 Schéma zapojení lineárního regulátoru L7805C

K realizaci záporného napájení operačních zesilovačů byla zvolena nábojová pumpa MAX660, která vstupní kladné napětí v rozsahu 1,5 V – 5,5 V konvertuje na záporné a dodává výstupní proud až 100 mA, což vyhovuje pro provoz operačních zesilovačů [20].

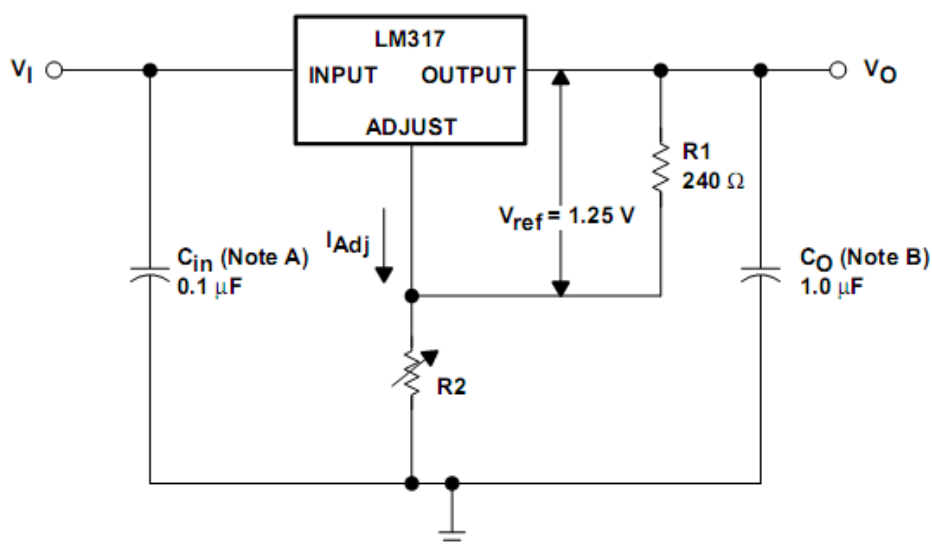


Obr. 25: Schéma nábojové pumpy MAX660

K napájení většiny mikroprocesorů je zapotřebí vytvořit napěťovou referenci 3,3 V. K tomuto účelu je použit napěťový regulátor LM317, který má široký rozsah vstupních napětí a dodává výstupní proud 10mA – 1500mA.. Výpočet výstupního napětí je dle datasheetu [18]:

$$V_{out} = U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \rightarrow R2 = R1 \cdot \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} + 1\right) = 240 \cdot \left(\frac{3.3}{1.25} + 1\right) = \underline{\underline{873,6\Omega}}. \quad (3.26)$$

Jako R2 použijeme víceotáčkový cermetový 1kΩ trimr k přesnému nastavení odporu.



Obr. 26: Schéma napěťového regulátoru LM317

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

### 4.1 Číslicové zpracování

V dnešní době se stále častěji používá ke zpracování signálů výpočetní technika. Pokud se rozhodneme zpracovávat nějaký složitější signál, tak to není nijak snadné. Klíčem k úspěchu je ho, v první řadě, správně matematicky popsat. Ke zkoumání signálů se často využívá diskrétní Fourierovy transformace (discrete Fourier transform, DFT).

Tato transformace umožňuje ze známého matematického vyjádření signálu vypočítat frekvenční spektrum tohoto signálu. DFT přiřazuje posloupnosti délky  $N$  na jinou posloupnost délky  $N$ . Originál označíme  $\{s(n)\}$ , obraz  $\{S(k)\}$ . Takže výpočet obrazu posloupnosti vypočítáme dle vztahu

$$S(k) = R_N(k) \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} kn\right). \quad (4.1)$$

Z výpočetního hlediska je výraz  $R_N(k)$  ve vztahu prakticky nadbytečný, a proto se v literatuře často vynechává. To ale může vést k mylnému dojmu, že obraz DFT je periodický.

Zpětnou DFT vypočítáme ze vztahu

$$s(n) = R_N(k) \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right), \quad (4.2)$$

kde je opět často vynechávána okénková posloupnost  $R_N(k)$  [11].

Výpočet diskrétní Fourierovy transformace je výpočetně náročný a proto byly snahy o jeho zjednodušení. V roce 1965 pánové J.W. Cooley a J.W. Tukey objevili velmi efektivní algoritmus výpočtu DFT a ten nazvali rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform, FFT). Ta využívá Eulerova vztahu, kdy můžeme napsat, že

$$e^{jx} = \cos x + j \sin x, \text{ pro } x \in R. \quad (4.3)$$

Tímto zápisem se stane komplexní exponenciální funkce funkcí periodickou.

Počet součinů pro výpočet DFT je  $N^2$ . Úsporu výpočtu FFT lze spočítat pomocí činitele

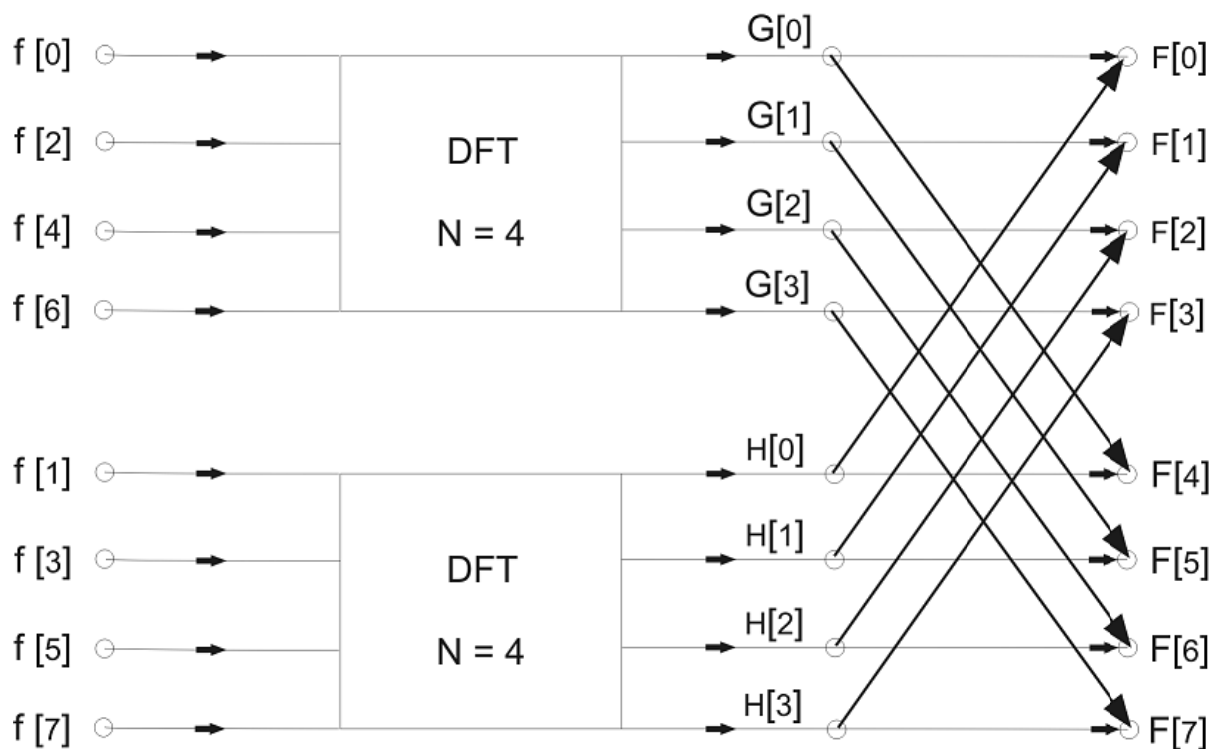
$$\alpha_m = \frac{N^2}{m \cdot \frac{N}{2}} = \frac{2N}{\log_2 N}. \quad (4.4)$$

Čím víc prvků bude mít posloupnost  $N$ , například  $N = 1024$ , pak bude činitel mnohem vyšší a to

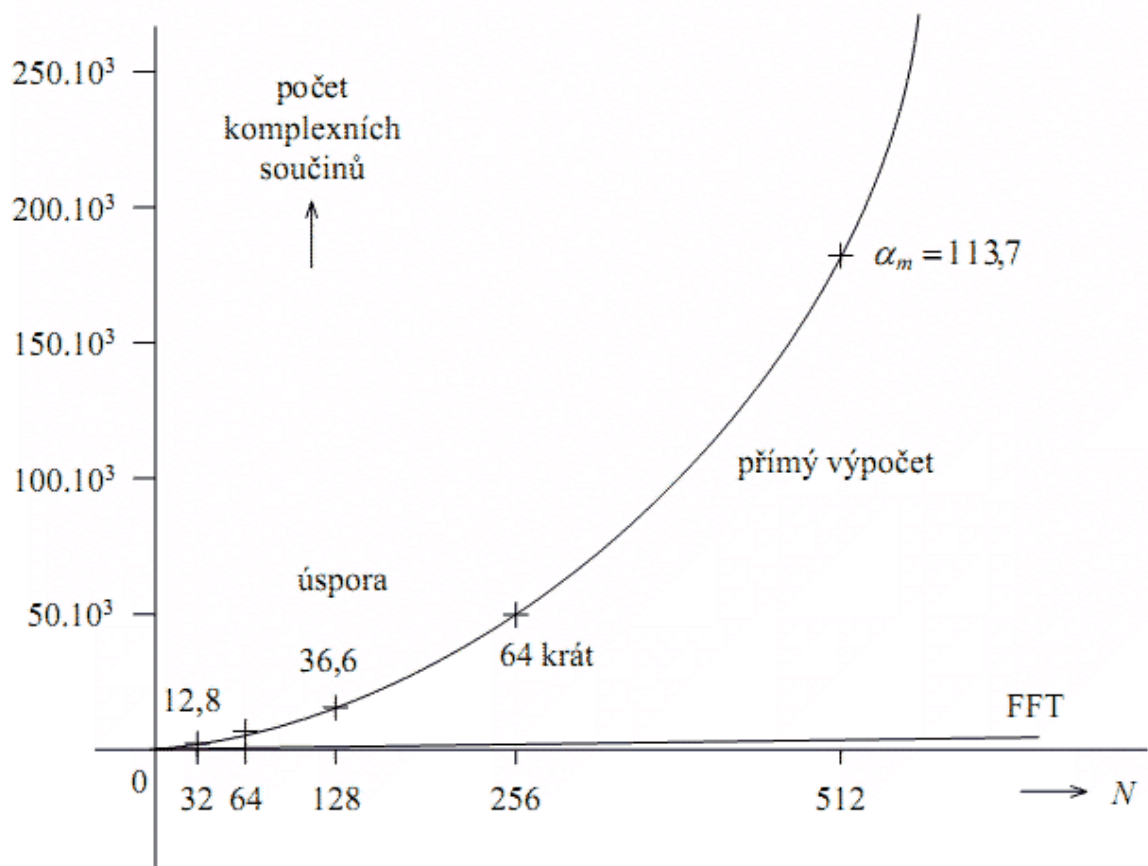
$$\alpha_{10} = \frac{2 \cdot 1024}{\log_2 1024} = 204,8, \quad (4.5)$$

což už znamená velkou úsporu výpočtu.

Algoritmus FFT má tu vlastnost, že vstupy posloupností musí být v tzv. bitově reverzním pořadí, abychom dostali výstupní posloupnost v přirozeném pořadí. To vyžaduje přetřídění vstupních hodnot před spuštěním algoritmu [2].



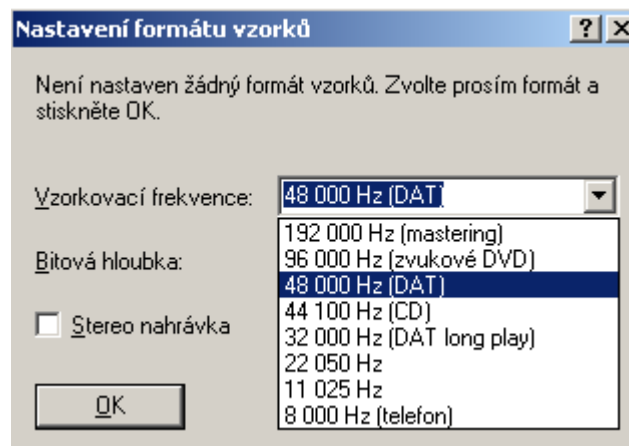
Obr. 27: Postup výpočtu algoritmu DFT pro délku posloupnosti  $N = 4$



Obr. 28: Grafická závislost počtu komplexních součinů na délce posloupnosti N

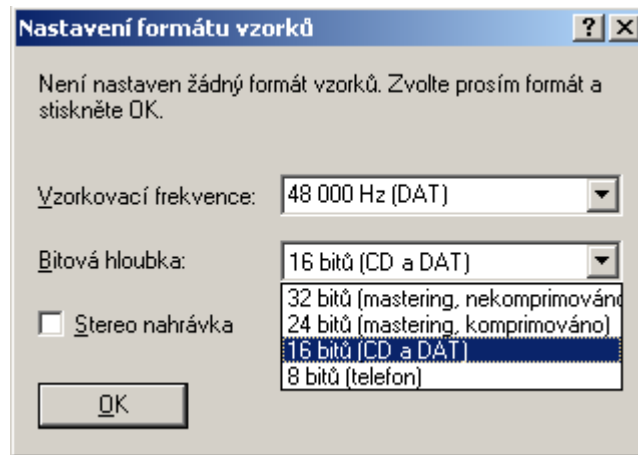
## 4.2 Vlastní experiment

Jako vstupní signál pro vlastní experiment byl použit zvuk, který byl nahrán elektretovým mikrofonom MCE101 připojeným do zvukové karty počítače a pomocí programu Nero WaveEditor následně zaznamenan. Výhoda tohoto programu je, že umožňuje ručně nastavit libovolnou vzorkovací frekvenci, což je vhodné pro testování.



Obr. 29: Nastavení vzorkovací frekvence signálu



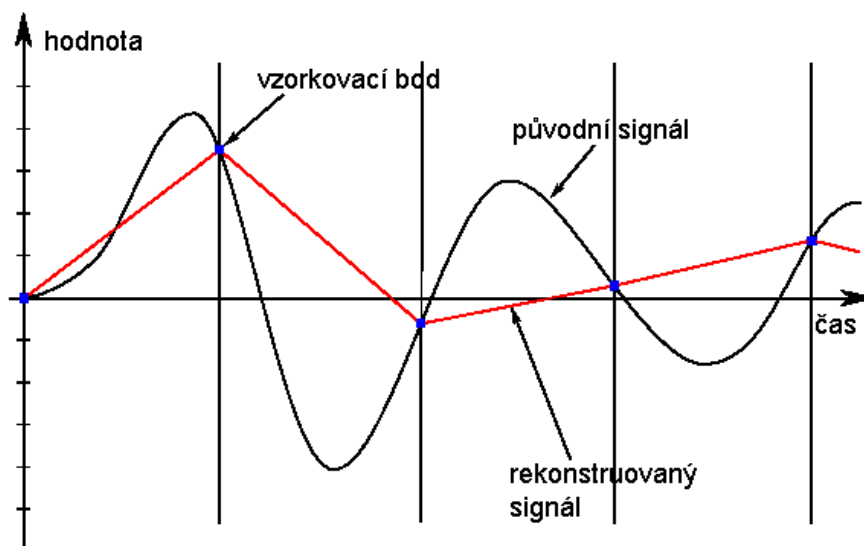


Obr. 30: Nastavení bitové hloubky signálu

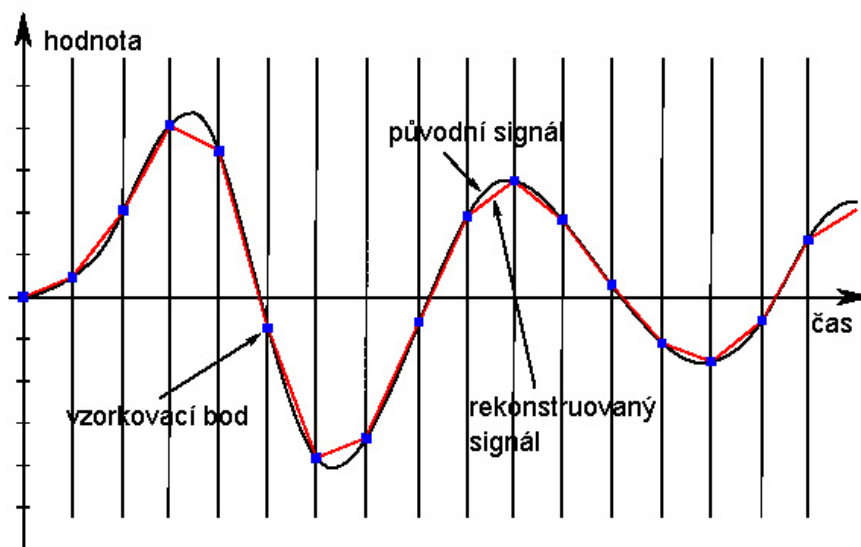
Je potřeba si uvědomit, jak velký rozsah frekvencí bude zpracováván a podle toho volit vzorkovací frekvenci. Měl by se dodržet vzorkovací teorém, který říká, že vzorkovací frekvence  $f_{vz}$  musí být minimálně 2x vyšší než nejvyšší frekvenční složka signálu  $f_s$ .

$$f_{vz} \geq 2f_s \quad (5.6)$$

Pokud se tento teorém nedodrží, pak ve frekvenční oblasti dochází k aliasingu - překrytí spekter a tím k nenávratnému zkreslení signálu. Vyšší vzorkovací frekvence ovšem taky zlepšuje věrnější rekonstrukci původního analogového signálu [10],[11].



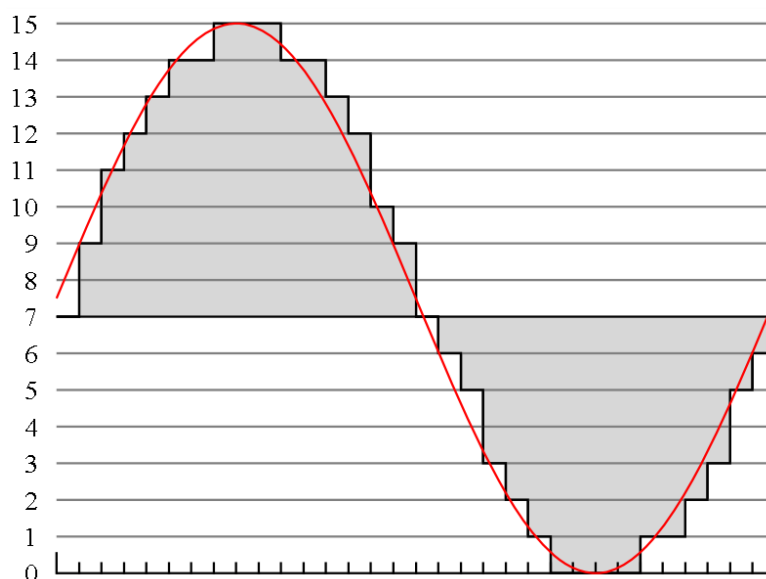
Obr. 31: Nevhodná vzorkovací frekvence



Obr. 32: Optimální vzorkovací frekvence

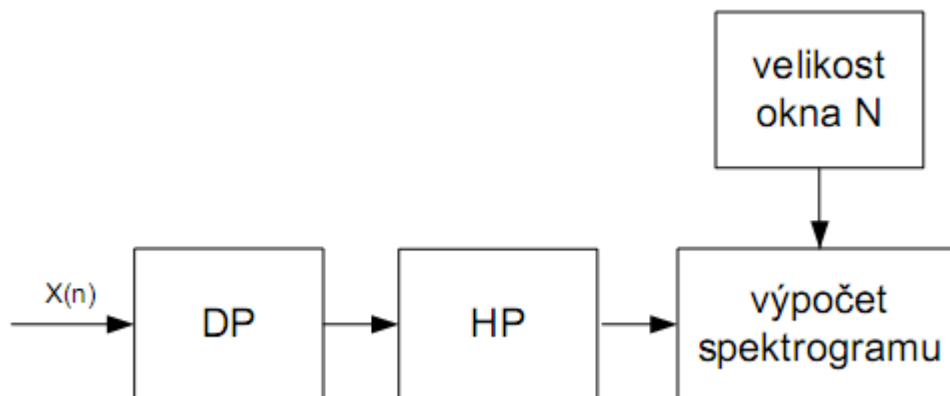
Program dovoluje nastavit také bitovou hloubku, která udává, jaké množství informací se použije k definici jednoho vzorku. Čím větší bitová hloubka, tím je lepší dynamika zvuku, méně šumu a kvalitnější reprodukce. Každá hodnota je zakódována  $2^n$  úrovní, kde  $n$  je počet bitů. Takže při 8bitovém kódování převodník rozliší pouze 256 napěťových úrovní hlasitosti, u kódování 16bitového je to již 65535 úrovní.

Jako výstupní soubor zvuku byl použit formát WAV, který je nekomprimovaný a bezztrátový formát, rozšířený zejména na platformě PC. K uchování informací využívá kódování Pulse Code Modulation (PCM) a zvuk je uchovávan přesně tak, jak byl digitalizován. Do WAV formátu lze zaznamenat digitální zvukovou stopu v jakékoliv kvalitě (vzorkovací frekvence, bitová hloubka) a to jak mono, tak i stereo [12].



Obr. 33: Kvantizace při 4-bitové hloubce

Bylo nahráno několik zvuků o vzorkovací frekvenci 8000 Hz v hloubkách 8 bitů, kanál mono. Tyto nahrané zvuky byly dále zpracovávány v programu MATLAB. Všechny takto nahrané zvuky nebyly nijak filtrované.



Obr. 34: Blokové schéma chodu programu

Program funguje následujícím způsobem. Načte se vstupní signál, který se filtruje dolní propustí s mezní frekvencí 40 Hz, poté horní propustí s mezní frekvencí 500 Hz.

Dále se signál převzorkuje na 2000 Hz. Zvolí velikost okna, na kterém závisí rychlost a přesnost výpočtu. Takže pokud máme signál vzorkován 2000 Hz, uvažujeme nejnižší přenášený kmitočet 70 Hz, pak pro jeho správný výpočet musíme uvažovat takovou velikost okna, aby se jedna perioda kmitočtu do tohoto okna “vešla”. To znamená, že nejmenší velikost okna by se dala vypočítat jako

$$N_{\min} = \frac{1}{f_{\min}} \cdot f_{\text{vz}} = \frac{1}{70} \cdot 2000 = \underline{\underline{28,571}}. \quad (5.7)$$

Pro výpočet FFT je potřeba, aby velikost okna byla rovna mocnině dvou. Nejnižší vyšší mocnina dvou je 32. Tímto máme zajištěno, že program bude detekovat nejnižší přenášený kmitočet a zároveň bude vykazovat nejvyšší rychlost výpočtu. Kdybychom zvětšili velikost okna, dostali bychom přesnější výpočet spektra, ale za delší čas. My však požadujeme, aby byl výpočet co nejrychlejší, protože se bude využívat v reálném čase.

Z takto oknem vybraného signálu se počítá FFT a hledá se dominantní frekvence, která odpovídá kmitům hlasivek. Jelikož tato frekvence je vždy dominantní, stačí pouze najít globální maximum tohoto spektra.

Výsledky filtrace a následného výpočtu jsou na obrázcích v příloze. Modulové kmitočtové charakteristiky filtrů jsou v semilogaritmickém měřítku.

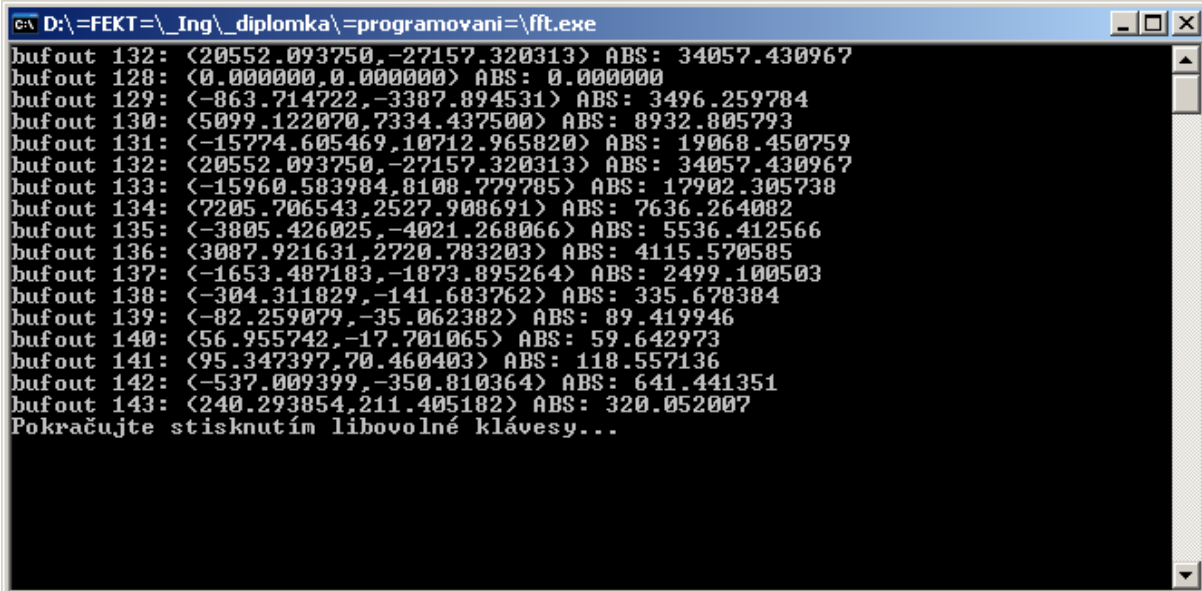
### 4.3 Ověření algoritmu FFT v jazyku C

Jazyk C je univerzální programovací jazyk, který je využíván ve všech odvětvích výpočetní techniky. Na rozdíl od MATLABU, který je spíše určen pro rychlou a přehlednější práci, vyžaduje větší znalost programování. V podstatě jedna funkce v MATLABU představuje v jazyku C velké množství příkazů, které jsou napsány na mnoha řádcích.

Algoritmus FFT se v dnešní době díky velkému výkonu procesorů těší velké oblibě. Existuje mnoho knihoven, které jsou napsány pro různé druhy mikroprocesorů. Z internetových stránek [13] byla použita knihovna, která realizuje vlastní výpočet FFT. Pro správnost chodu algoritmu je však zapotřebí naprogramovat načítání vstupních dat, nastavení paměti, zvolit délku okna pro výpočet FFT a další.

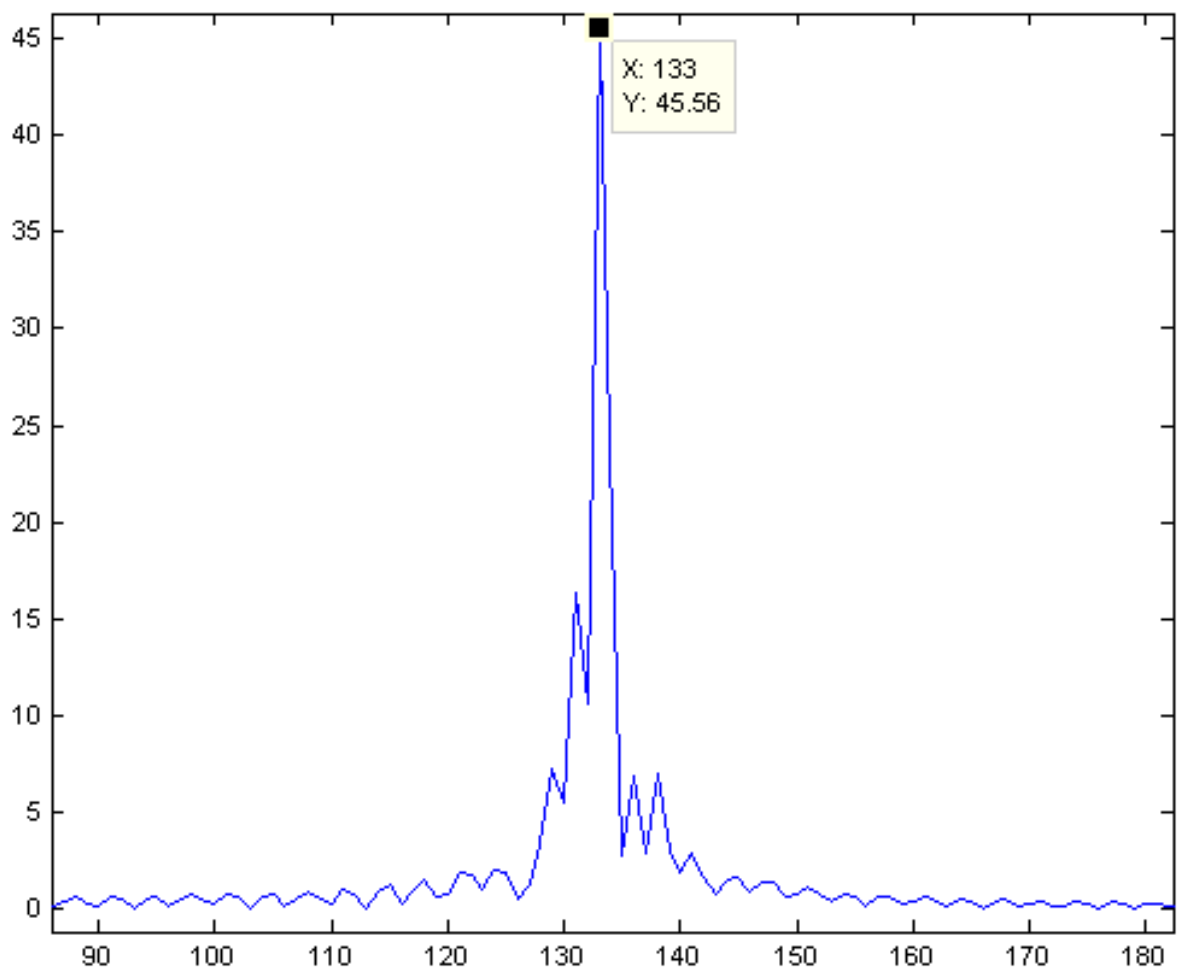
Jako program byl použit Dev-C++, který je přiložen na CD. Na začátku programu se načetla vstupní data, která byla převzata z programu MATLAB. Byl použit signál *muz22let.wav* navzorkovaný o  $f_vz = 2000$  Hz, délky 1s, 16bit hloubky. Poté se zvolila délka okna pro vlastní výpočet FFT. Vypočtené hodnoty se uložily do paměti, kde se z nich vypočetly absolutní hodnoty, protože výsledek po FFT je komplexní číslo. Poté cyklem *for* bylo spektrum prohledáno pouze do poloviny vzorkovacího kmitočtu, protože spektrum signálu je zrcadlově překlopené kolem  $f_{vz}/2$ . Tím se zkrátí výsledný čas na polovinu.

Experimentem bylo zjištěno, že hlavní spektrální čára je rovna 132 Hz. Tuto hodnotu jsme porovnali se zjištěnou hodnotou v programu MATLAB. Rozdíl v detekci hlavní spektrální čáry činil mezi oběma programy číselně 1 Hz, ale je to dáno tím, že Matlab počítá indexy od jedničky, program však od nuly. Tudíž je výpočet správný.



```
c:\D:\FEKT=\_Ing\_diplomka\=programovani=\fft.exe
bufout 132: <20552.093750,-27157.320313> ABS: 34057.430967
bufout 128: <0.000000,0.000000> ABS: 0.000000
bufout 129: <-863.714722,-3387.894531> ABS: 3496.259784
bufout 130: <5099.122070,7334.437500> ABS: 8932.805793
bufout 131: <-15774.605469,10712.965820> ABS: 19068.450759
bufout 132: <20552.093750,-27157.320313> ABS: 34057.430967
bufout 133: <-15960.583984,8108.779785> ABS: 17902.305738
bufout 134: <7205.706543,2527.908691> ABS: 7636.264082
bufout 135: <-3805.426025,-4021.268066> ABS: 5536.412566
bufout 136: <3087.921631,2720.783203> ABS: 4115.570585
bufout 137: <-1653.487183,-1873.895264> ABS: 2499.100503
bufout 138: <-304.311829,-141.683762> ABS: 335.678384
bufout 139: <-82.259079,-35.062382> ABS: 89.419946
bufout 140: <56.955742,-17.701065> ABS: 59.642973
bufout 141: <95.347397,70.460403> ABS: 118.557136
bufout 142: <-537.009399,-350.810364> ABS: 641.441351
bufout 143: <240.293854,211.405182> ABS: 320.052007
Pokračujte stisknutím libovolné klávesy...
```

Obr. 35: Výsledek detekce spektrální čáry v jazyku C



Obr. 36: Výsledek detekce spektrální čáry v programu MATLAB

## 5 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou vyšetření lidského hlasu. V první části práce je popsána anatomie hrtanu a vysvětleno, jak vzniká lidský hlas. Nejdůležitějším orgánem pro tvorbu hlasu jsou hlasivky, které periodicky kmitají díky tlaku z plic, který je přes ně vydechován. Vlastní kmity hlasivek se nejčastěji nacházejí v oblasti 80 – 300 Hz.

Dále je zde popsán princip vyšetření jedním z nejlepších zobrazovacích metod hlasivek a to videolaryngostroboskopie. Tato dnešní vizuálně nejpokročilejší metoda dokáže zobrazit hlasivky při jejich periodickém kmitání díky stroboskopickému zdroji světla, které dopadá na kmitající hlasivky.

V práci je navrženo obvodové řešení stroboskopického zdroje světla pro osvětlování hlasivek. Byly propočteny základní obvodové prvky pro zesílení, filtraci, napájení a řízení LED pro osvětlování hlasivek. Schéma obvodu bylo nakresleno v programu EAGLE 4.16r2 a nachází se v příloze A. Seznam použitých součástek se nachází v příloze B. Celé zařízení bylo zapojeno na nepájivém kontaktním poli a ověřena jeho funkčnost. V příloze C jsou grafy výsledků zpracování signálů v programu MATLAB a měření přenosu pásmové propusti s reálnými součástkami na nepájivém kontaktním poli.

Dále v práci je doložen vlastní experiment se zpracováním lidského hlasu pomocí rychlé Fourierovy transformace, kde se potvrdilo, že hlasivky kmitají dle teorie v rozmezí 70 - 300 Hz. Byl vytvořen m - file v programu MATLAB, který filtruje vstupní signál a dále v něm hledá dominantní frekvenci, která reprezentuje vlastní kmity hlasivek. V programovacím jazyku C byl napsán program s využitím knihovny pro výpočet FFT. Jeho funkčnost byla porovnána s programem MATLAB.

V této práci není řešeno programování mikrokontroléru, který by počítal FFT v reálném čase v důsledku jeho nedostupnosti. Jako vhodný typ by mohl být použit mikrokontrolér rodiny ARM7TDMI nebo signálový procesor DPS, který je speciálně určen pro výpočty FFT. Zadáání diplomové práce bylo splněno.

# LITERATURA

- [1] HAHN, A a kol.: Otorinolaryngologie a foniatrie v současné praxi. Praha: Karolinum, 2006. 392 s. ISBN 80-246-1019-1.
- [2] ŠEBESTA, V., SMÉKAL, Z. Signály a soustavy. Přednášky. první vyd. Brno: UREL FEKT VUT v Brně, 2003. s. 1 - 145 . ISBN 80-214-2434-6
- [3] HÁJEK, K; SEDLÁČEK, Jiří. Kmitočtové filtry. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, Věšínova 5, Praha 10, 2002. 536 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [4] KOLKA, Z. : Počítačové řešení elektronických obvodů, Brno, 2007
- [5] BURDA, Z. Mikrofony. [online]. 13. 1. 1999, [cit. 2010-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.zdenda.com/mikrofony>>.
- [6] KayPENTAX [online]. 2009 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.kayelemetrics.com/Product%20Info/Strobe%20Systems/9295.htm>>.
- [7] Atmos [online]. 2008 [cit. 2019-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.atmosmed.de/html/seiten/startseite;1,de.html>>.
- [8] Wikipedie [online]. 2009 [cit. 2009-05-19]. Wikipedia. Dostupné z WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Garcia-Laryngoskop.gif>>.
- [9] BioVendor [online]. 2009 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://kp.biovendor.cz/cz>>.
- [10] Wikipedie [online]. 2009 [cit. 2009-05-19]. Wikipedia. Dostupné z WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/Vzorkovani.svg>>
- [11] Wikipedie [online]. 2009 [cit. 2009-05-19]. Wikipedia. Dostupné z WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Vzorkovani2.svg>>
- [12] Wikipedie [online]. 2009 [cit. 2009-05-19]. Wikipedia. Dostupné z WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Pcm.svg>>
- [13] SourceForge.net [online]. 2010 [cit. 2010-05-19]. SourceForge.net. Dostupné z WWW: <<http://sourceforge.net/projects/kissfft/>>.
- [14] KONVIČNÝ, Petr. [Http://onsemi.com](http://onsemi.com) [online]. 2007 [cit. 2010-05-11]. Dostupné z WWW: <[http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/AND8298-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8298-D.PDF)>.
- [15] NCP3065. In NCP3065. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2010-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP3065.PDF>>.
- [16] VT500. In VT500. [s.l.] : [s.n.], 2001 [cit. 2010-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/perkinelmer/VT500.pdf>>.
- [17] GM Electronic [online]. 2010 [cit. 2010-05-19]. GM Electronic. Dostupné z WWW: <[http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/751/751-485/pct.751-485.1.jpg](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/751/751-485/pct.751-485.1.jpg)>.

- [18] GM Electronic [online]. 2010 [cit. 2010-05-19]. LM317. Dostupné z WWW: <[http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/331/331-004/dsh.331-004.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/331/331-004/dsh.331-004.1.pdf)>.
- [19] GM Electronic [online]. 2010 [cit. 2010-05-19]. OP07. Dostupné z WWW: <[http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/310/310-028/dsh.310-028.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/310/310-028/dsh.310-028.1.pdf)>.
- [20] MAXIM [online]. 2010 [cit. 2010-05-19]. MAX660. Dostupné z WWW: <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX660.pdf>>.
- [21] GM Electronic [online]. 2010 [cit. 2010-05-19]. 7805-STM. Dostupné z WWW: <[http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/330/330-149/dsh.330-149.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/330/330-149/dsh.330-149.1.pdf)>.
- [22] GM Electronic [online]. 2010 [cit. 2010-05-19]. LED LUXEON STAR/O 1W. Dostupné z WWW: <[http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/511/511-675/dsh.511-675.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/511/511-675/dsh.511-675.1.pdf)>.



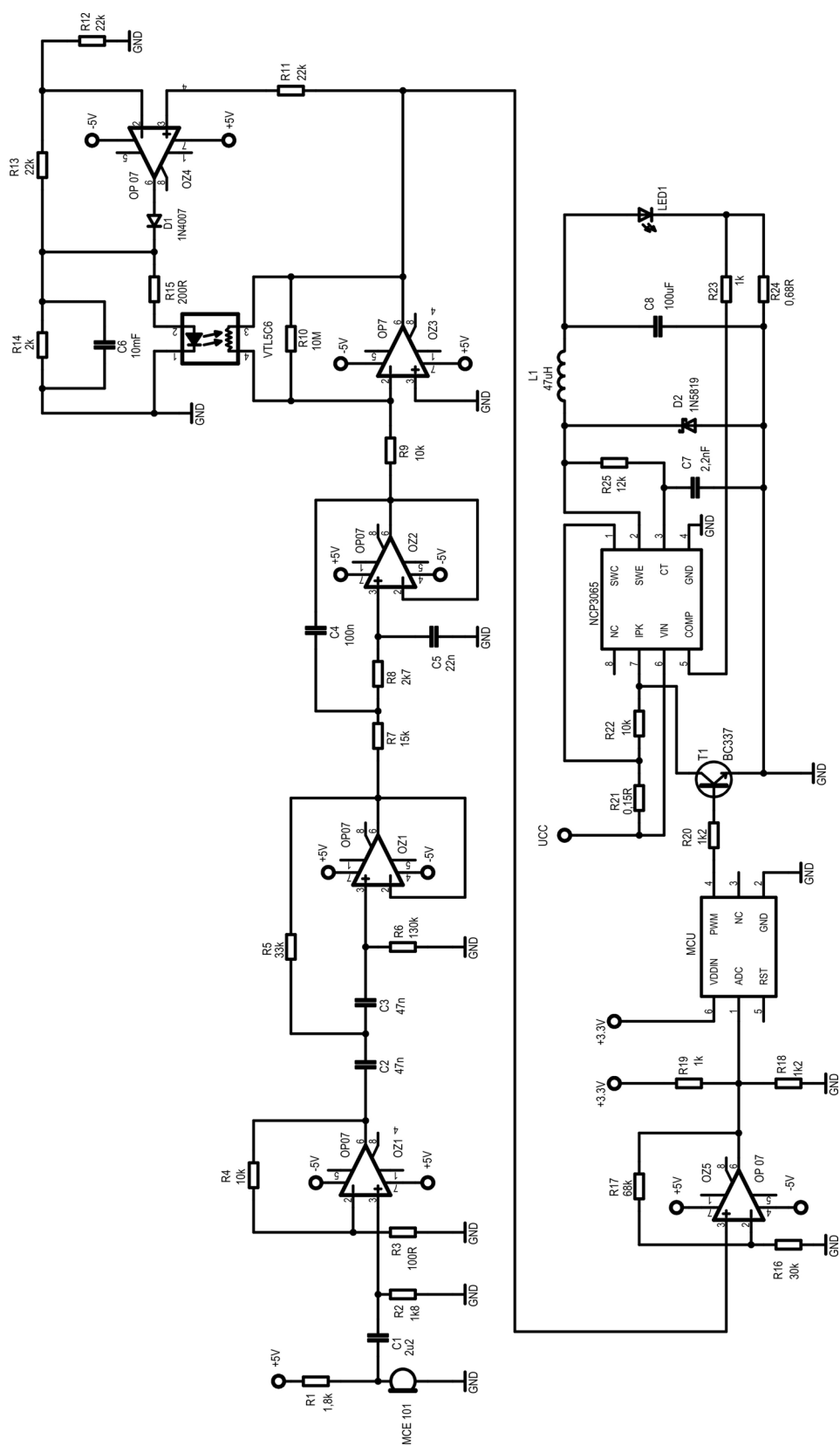
# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$SPL$	hladina akustického tlaku
$p$	akustický tlak
$CMMR$	diskriminační činitel
$f_m$	mezní kmitočet
$f_{vz}$	vzorkovací frekvence
$A_u$	zesílení
$Q$	činitel jakosti
$\alpha$	poměr velikostí rezistorů
$\beta$	poměr velikostí kapacitorů
$DTF$	Discrete Fourier Transform, Diskrétní Fourierova transformace
$s(n)$	signál v časové oblasti
$S(k)$	signál ve frekvenční oblasti
$N$	délka posloupnosti
$n$	počet vzorků signálu v časové oblasti
$k$	počet vzorků signálu ve frekvenční oblasti
$FFT$	Fast Fourier Transform, Rychlá Fourierova transformace
$a_n$	činitel úspory při výpočtu FFT

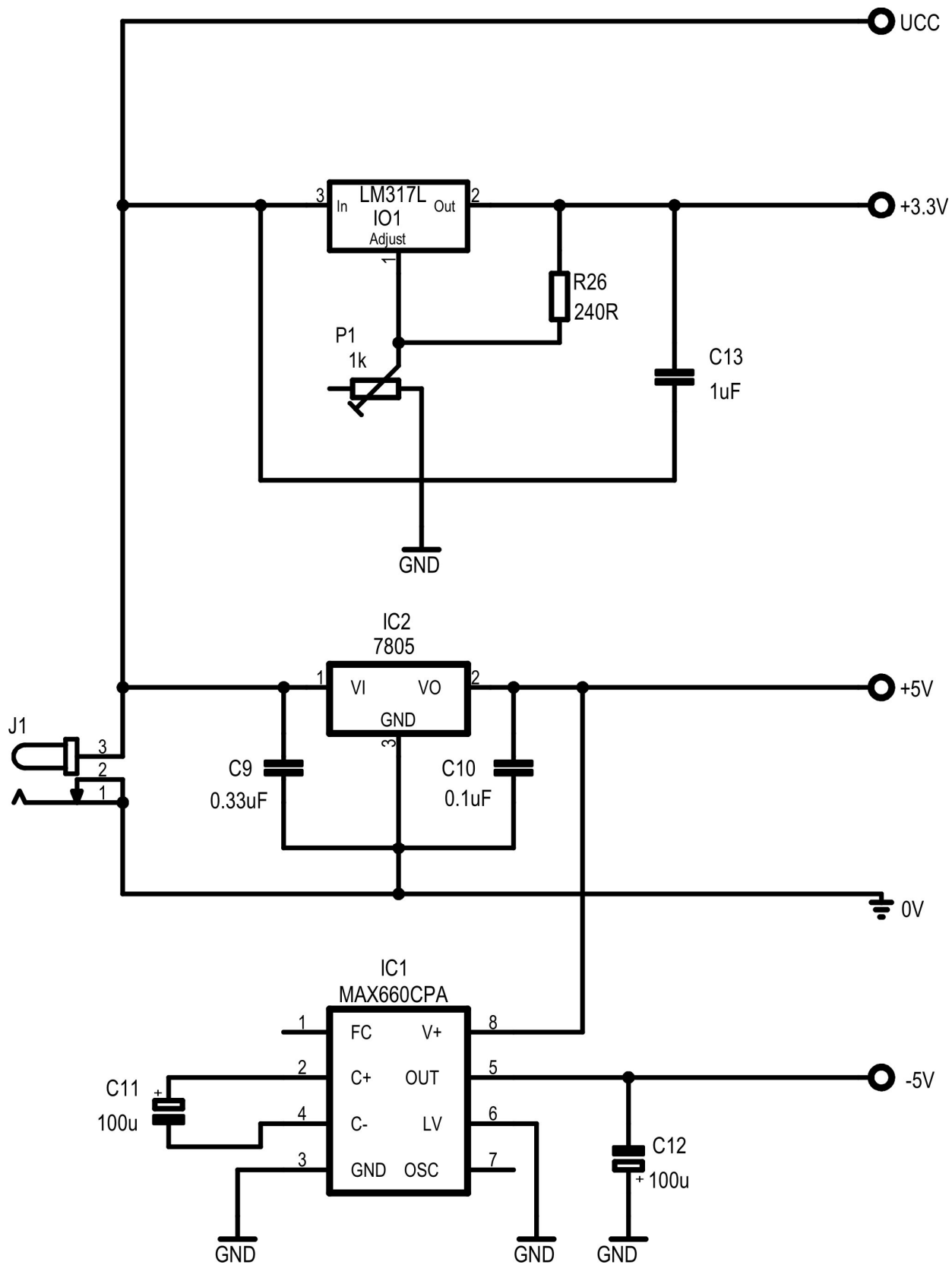
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Obvodové zapojení</b>	<b>40</b>
<b>B</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>42</b>
<b>C</b>	<b>experimentální ověření</b>	<b>44</b>

# A OBVODOVÉ ZAPOJENÍ



Obr. 37: Zapojení obvodu bez napájecí části



Obr. 38: Zapojení napájecí části obvodu

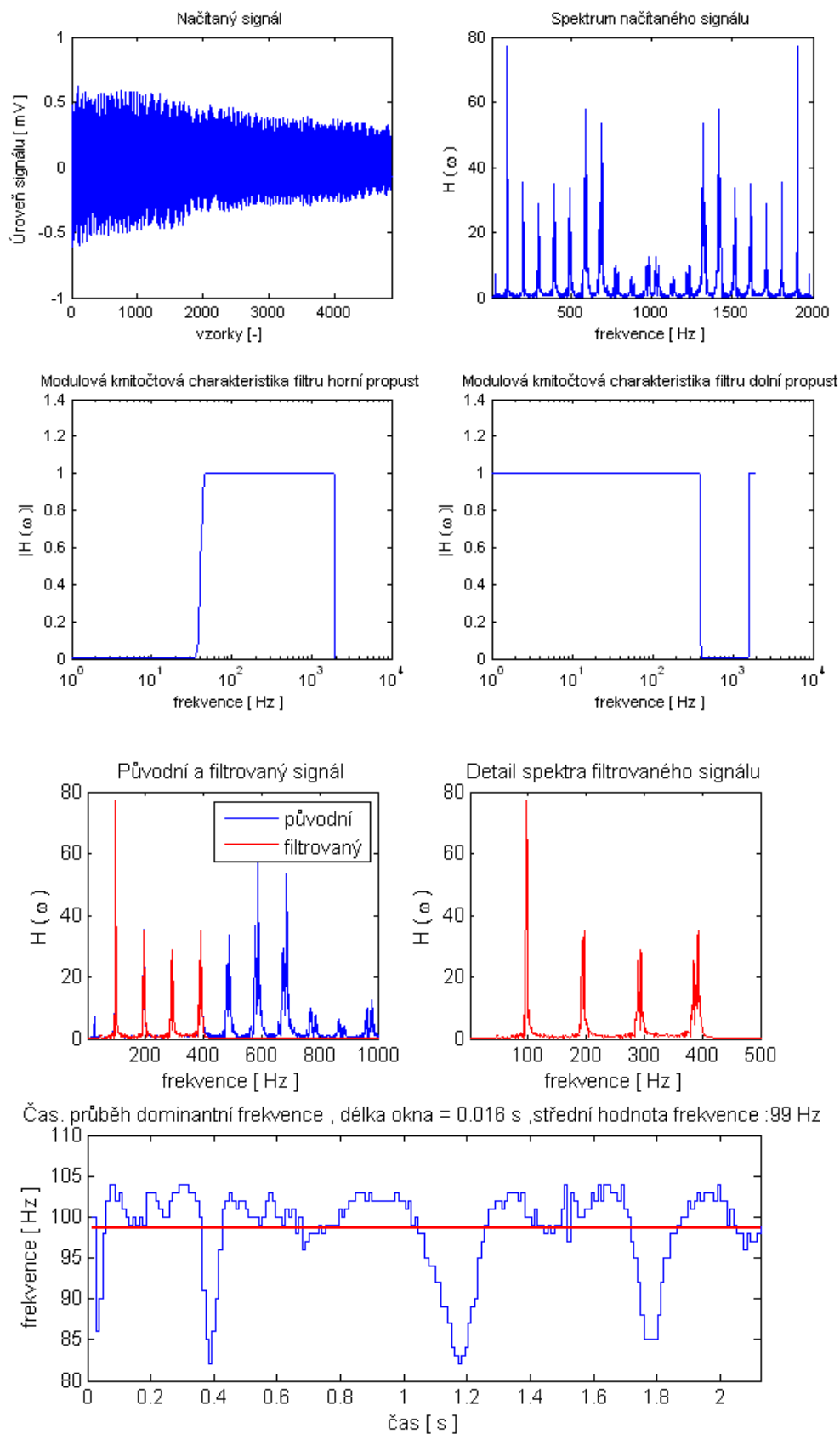
## B SEZNAM SOUČÁSTEK

Tab 3.: Seznam součástek

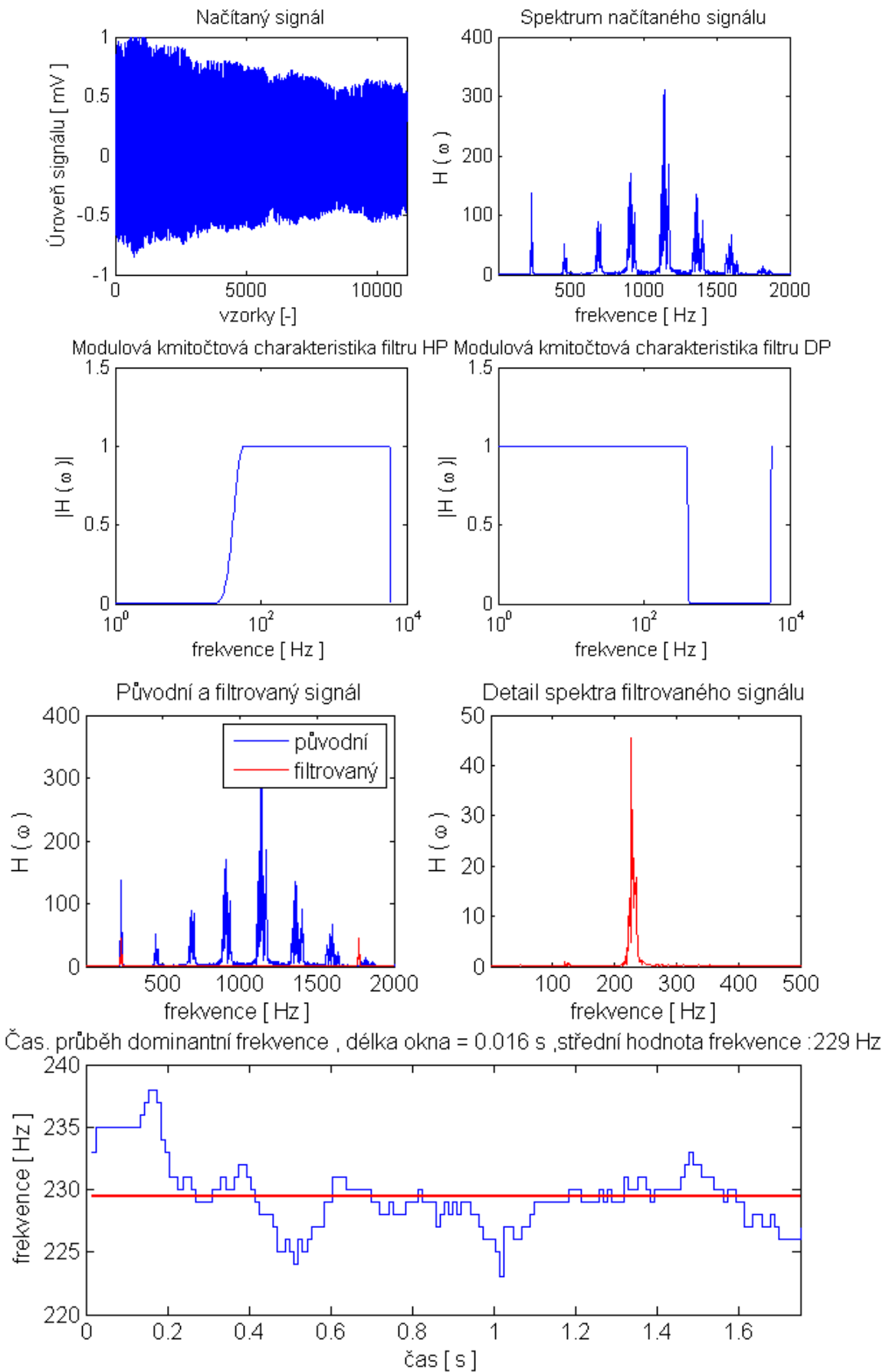
Sch. značka	Typ - označení	Výrobce	Popis
C1	E2M2/100V	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor 2.2 $\mu$ F
C2, C3	CF1-47N/J	-	Fóliový kondenzátor 47nF
C4	CF2-100N/J	-	Fóliový kondenzátor 100nF
C5	CF1-22N/J	-	Fóliový kondenzátor 22nF
C6	E10000M/16V	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor 10000 $\mu$ F
C7	CK1206 2N2/50V X7R	-	Keramický kondenzátor 2,2 nF
C8	E100M/16VMIMT	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor low ESR 100 $\mu$ F
C9	E0.33M/50V	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor 0.33 $\mu$ F
C10	E0.1M/50V	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor 0.1 $\mu$ F
C11, C12	E100M/16VMIMT	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor 150 $\mu$ F
C13	CT 1M/16V	-	Tantalový kondenzátor 1 $\mu$ F
D1	1N5819	-	Schottky dioda 40V/1A
D2	1N4007	-	Usměrňovací dioda 1000V/1A
OZ1, OZ2, OZ3, OZ4, OZ5	OP 07	-	Nízkošumový operační zesilovač OP07
L1	DPU047A1	-	Toroidní tlumivka 470 $\mu$ H 1A
VTL5C6	VTL5C6	PerkinElmer	Optočlen LED-fotoodpor
MCE 101	MCE 101	-	Elektretový mikrofon 50Hz-16kHz
NCP3065	NCP3065	ON Semiconductor	Regulátor konst. proudu do 1,5A
R1	1k8	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R2, R14	2k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R3	100R	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R4, R5 R9, R22	10k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R6	130k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R7	15k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R8	2k7	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R10	10M	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R11, R12, R13	22k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R15	200R	-	Metalizovaný odpor 0,6W

R16	30k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R17	68k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R18, R19, R23	1k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R20	1k2	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R21	0,15R	-	Drátový odpor 5W
R24	0,68R	-	Drátový odpor 5W
R25	12k	-	Metalizovaný odpor 0,6W
R26	240	-	Metalizovaný odpor 0,6W
P1	64 P 1k	Spectrol	Víceotáčkový cermetový trimr
T1	BC337-25	-	NPN tranzistor BC337 45V/0.5A
MCU	MCU	-	Mikrokontrolér
IC1	MAX660CPA	National Instruments	DC-DC invertující měnič 1,5 – 5,5V
IC2	7805	ST Microelectronics	Stabilizátor 5V/1,5A
IO1	LM317T	Texas Instruments	Nastavitelný měnič 1.2V - 37V/1.5A

# C EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

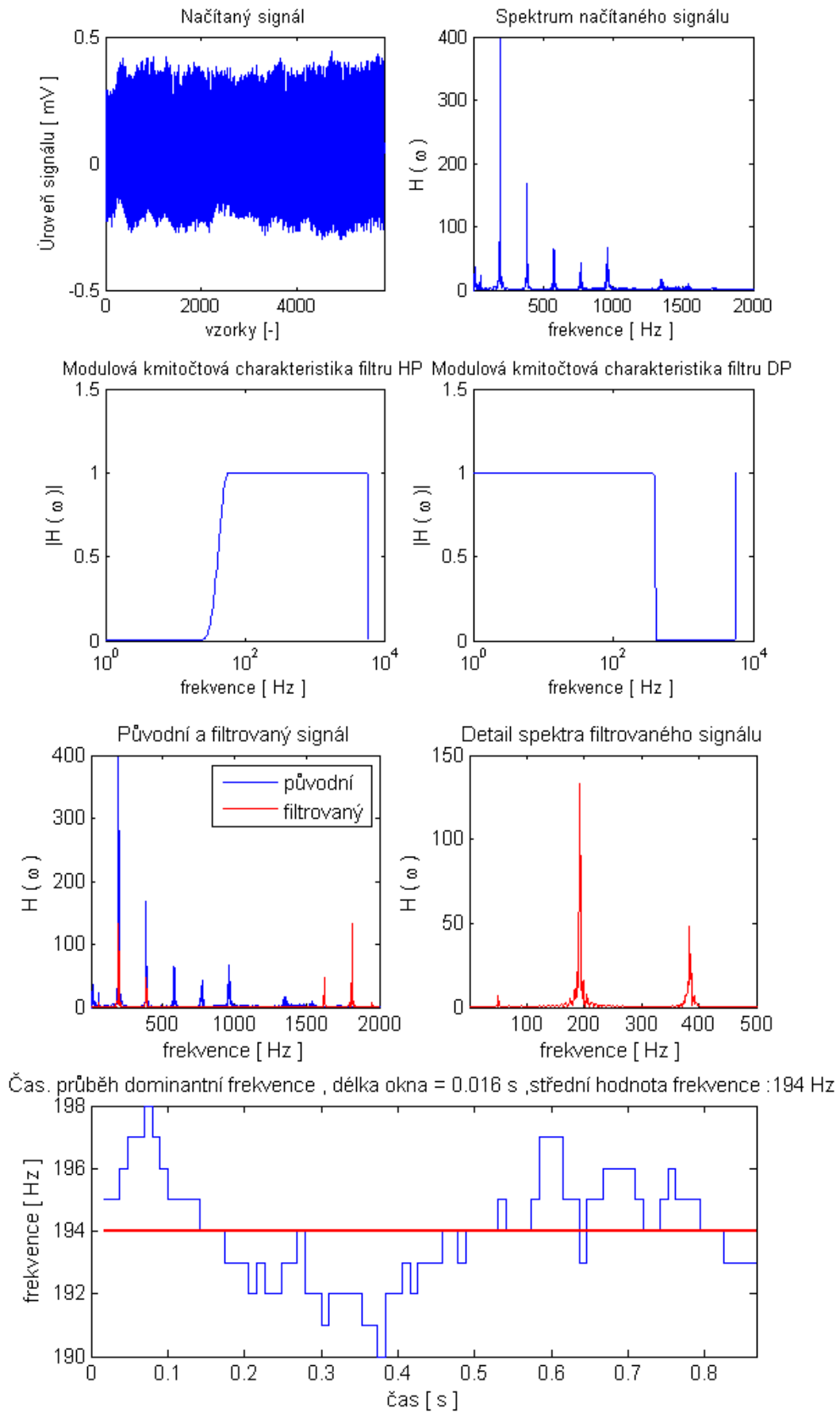


Obr. 39: Muž, 24 let,  $f_{vz} = 2000$  Hz, 8-bit

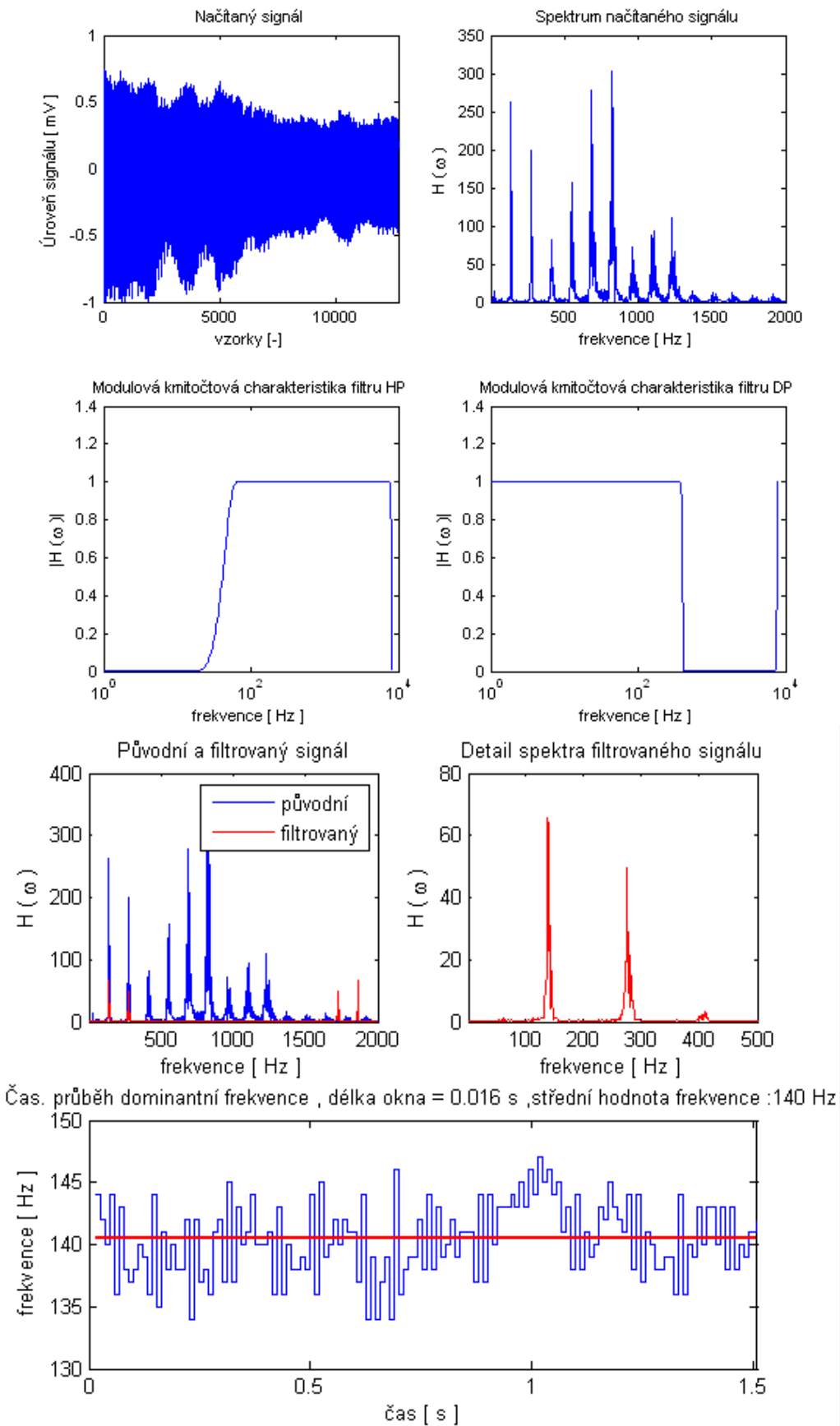


Obr. 40: Žena, 47 let,  $f_{vz} = 2000$  Hz, 8-bit

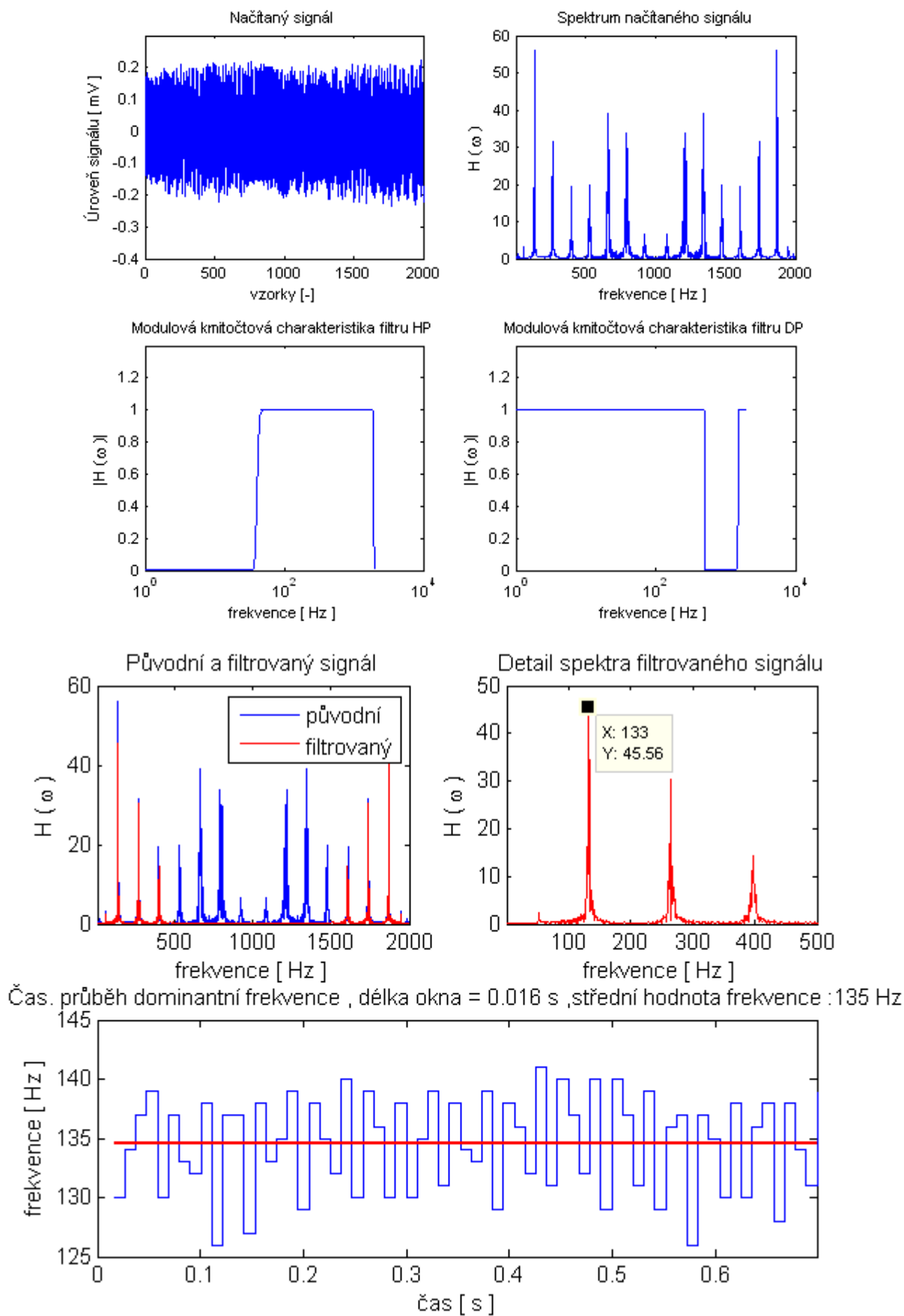




Obr. 41: Žena, 23 let,  $f_{iz} = 2000$  Hz, 8-bit



Obr. 42: Muž, 22 let,  $f_{vz} = 2000$  Hz, 8-bit



Obr. 43: Muž, 24 let,  $f_{vz} = 2000$  Hz, 16-bit

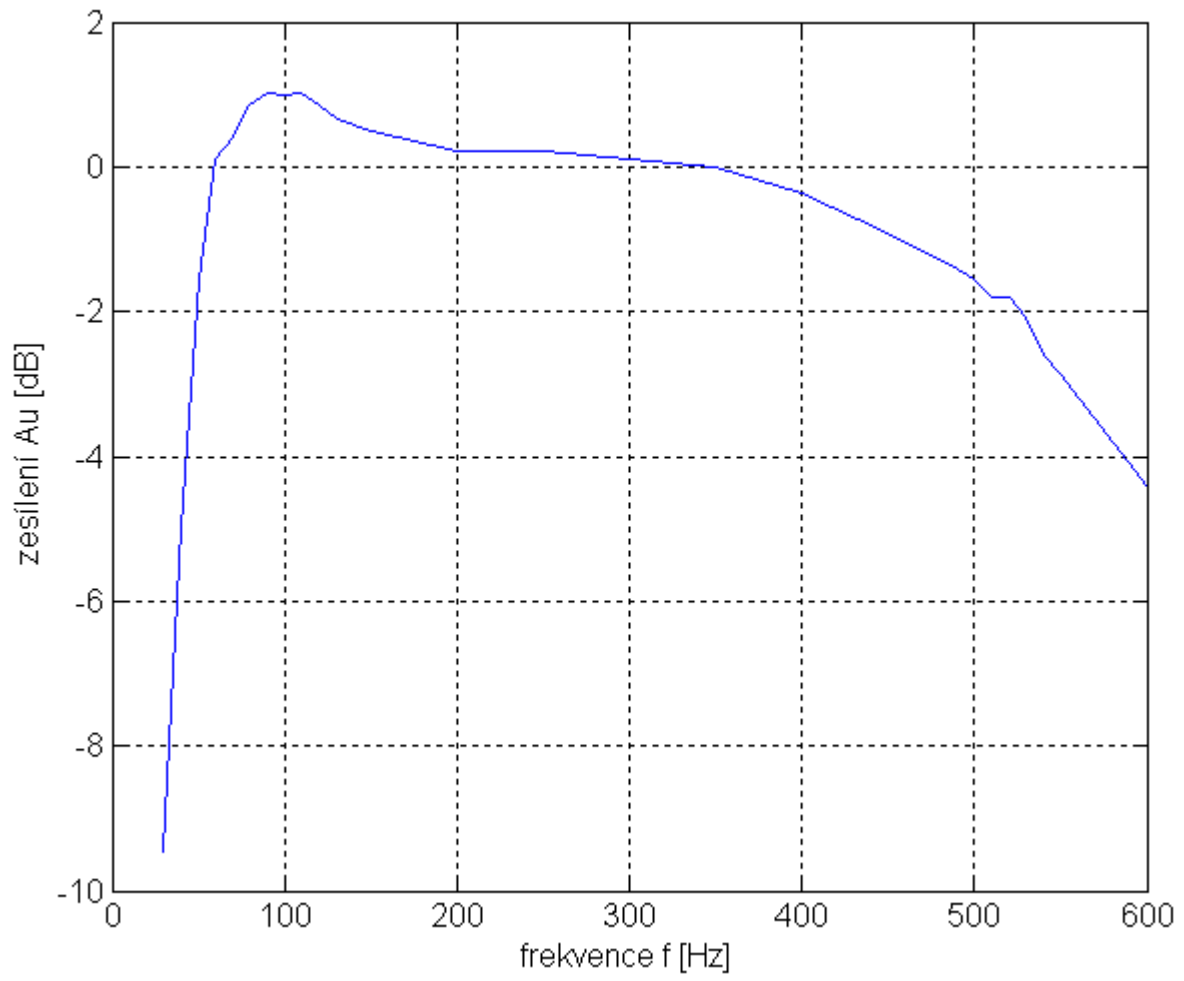
# Měření přenosu pásmové propusti

## Použité přístroje:

Osciloskop	HP 54603B
Generátor	Agilent 33220A
Zdroj	TESLA BK 125

Tab 4.: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosu pásmové propusti

f [Hz]	U1 p-p [mV]	U2 p-p [mV]	Au [dB]
30	500	168	-9,473
40	500	282	-4,974
50	500	418	-1,556
60	500	506	0,1036
70	500	524	0,4072
80	500	552	0,8594
90	500	562	1,0153
100	500	560	0,9844
110	500	562	1,0153
120	500	552	0,8594
130	500	540	0,6685
150	500	530	0,5061
200	500	512	0,206
250	500	512	0,206
300	500	506	0,1036
350	500	500	0
400	500	480	-0,355
450	500	450	-0,915
470	500	437	-1,17
490	500	425	-1,412
500	500	418	-1,556
510	500	406	-1,809
520	500	406	-1,809
530	500	393	-2,092
540	500	370	-2,615
550	500	360	-2,853
600	500	300	-4,437



Obr. 44: Přenosová charakteristika pásmové propusti