

Univerzita Hradec Králové  
Přírodovědecká fakulta  
katedra fyziky

# Nízkofrekvenční zesilovač

## Bakalářská práce

Autor:	Jan Polák
Studijní program:	(33)B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, ze kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne 9.5. 2016

Jan Polák

## Poděkování:

Děkuji zde vedoucímu své bakalářské práce docentovi RNDr. Josefu Hubeňákovi, CSc. za ochotu při konzultaci, návrhu zesilovače a vypracování bakalářské práce. Rovněž zde děkuji Ing. Karolu Radochovi, Ph.D. za pomoc při měření parametrů zesilovače.

### **Anotace**

POLÁK, J. *Nízkofrekvenční zesilovač*. Hradec Králové, 2016.

Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.

Tato práce se zabývá návrhem, realizací nízkofrekvenčního nízkošumového zesilovače a následným měřením jeho parametrů. Zesilovač bude používán při výuce k demonstraci Barkhausenova šumu.

**Klíčová slova:** nízkofrekvenční, nízkošumový, zesilovač, Barkhausenův šum

### **Annotation**

POLÁK, J. *Low-frequency amplifier*. Hradec Králové, 2016.

Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Thesis Supervisor doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.

This thesis describes design, building and measuring of parameters of low-frequency and low-noise amplifier. This amplifier will be used to demonstrate Barkhausen noise.

**Key words:** low-frequency, low-noise, amplifier, Barkhausen noise

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>6</b>
<b>2 Základní požadavky na konstrukci</b>	<b>7</b>
2.1 Citlivost . . . . .	7
2.2 Výstupní výkon . . . . .	7
2.3 Napájení zesilovače . . . . .	7
<b>3 Postup návrhu elektrické a mechanické části</b>	<b>8</b>
3.1 Volba předzesilovače . . . . .	8
3.2 Výpočet hodnot součástek předzesilovače . . . . .	9
3.3 Snímací cívka . . . . .	10
3.4 Koncový zesilovač . . . . .	11
3.5 Napájecí blok zesilovače . . . . .	12
3.6 Přepínání nabíjení/vybíjení . . . . .	14
3.7 Celkové zapojení . . . . .	14
3.8 Ovládání . . . . .	16
3.9 Mechanické vyhotovení . . . . .	16
<b>4 Měření parametrů zesilovače</b>	<b>17</b>
4.1 Měření frekvenční charakteristiky . . . . .	17
4.2 Měření výstupního výkonu . . . . .	19
4.3 Měření vstupní impedance . . . . .	20
<b>5 Závěr</b>	<b>21</b>
<b>6 Příloha</b>	<b>22</b>
6.1 Průběhy výstupního signálu . . . . .	22
6.2 3D návrh . . . . .	24
6.3 Výkresy jednotlivých dílů . . . . .	26
6.4 Snímací cívka . . . . .	29
6.5 Deska plošných spojů . . . . .	31
<b>7 Fotodokumentace</b>	<b>35</b>
<b>8 Zdroje</b>	<b>39</b>

# 1 Úvod

Cílem této práce bude navrhnout a vyrobit funkční vzorek nízkošumového nízkofrekvenčního zesilovače. Tento zesilovač bude používán k demonstraci Barkhausenova šumu k vybraným přednáškám Elektřiny a magnetismu a Základů elektroniky. Zesilovač musí být schopen zpracovat vstupní signály o úrovni v jednotkách mV a dosahovat výstupního výkonu do 1 W. Snímání bude probíhat pomocí cívky s velkým počtem závitů, do které je lze vložit vzorek magnetického materiálu.

## 2 Základní požadavky na konstrukci

### 2.1 Citlivost

Napětí, naindukované na vstupní snímací cívce, je velice malé (v řádu milivoltů). Z tohoto důvodu je třeba, aby byl navrhovaný zesilovač velmi odolný vůči vnějšímu rušení a současně dosahoval relativně vysokého napěťového zesílení.

### 2.2 Výstupní výkon

Výstupní výkon se odvíjí od použitého koncového zesilovače. Ten je, dle výrobce, schopen dodat maximální výkon 1 W, ale v praxi postačuje výkon mnohem menší.

### 2.3 Napájení zesilovače

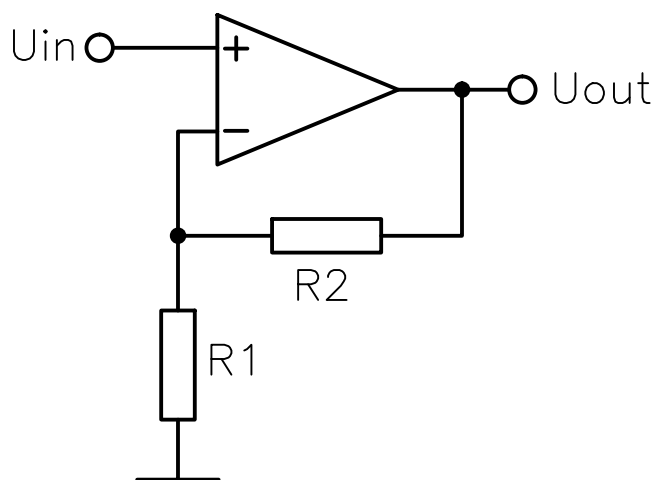
Největším problémem citlivých zesilovačů je potlačení rušení frekvencí 50 Hz při použití síťového napájení. Odstranění tohoto rušení, neboli síťového brumu, je možné několika více či méně účinnými způsoby. Jeden z nich je použití stínících přepážek kolem síťového transformátoru. Ten totiž při provozu vytváří své vlastní elektromagnetické pole, které snadno zachytí snímací cívka. Stínící přepážky toto magnetické pole udrží v uzavřeném prostoru transformátoru. Tento způsob je však mechanicky složitější na vyhotovení. Síťový transformátor navíc vyžaduje použití filtračních kondenzátorů velkých kapacit k vyhlazení usměrněného napětí. Další zdroj rušení vznikne použitím síťové přívodní šňůry, která kolem sebe také vytváří elektromagnetické pole. Z výčtu problémů, které s sebou nese použití síťového transformátoru, se toto řešení jeví jako zcela nevhodné. Mnohem výhodnější je zde použití napájení z akumulátoru. Tím odpadne zanášení elektromagnetického pole o frekvenci 50 Hz dovnitř zesilovače a celý přístroj se navíc stane přenosným.

### 3 Postup návrhu elektrické a mechanické části

#### 3.1 Volba předzesilovače

Díky velmi malým úrovním vstupního napětí je třeba použít aktivní prvek s velkým zesilovacím činitelem. Tohoto požadavku lze dosáhnout s použitím víceústupňového tranzistorového zesilovače. Dnes jsou však k dispozici operační zesilovače, které svými parametry předčí zapojení s tranzistory. Zvolil jsem dvojitý operační zesilovač OPA2336 od výrobce Texas Instruments [1]. Při práci s operačními zesilovači se nejčastěji setkáme se dvěma typy zapojení. Jsou to zapojení invertujícího a neinvertujícího zesilovače. Zvolil jsem zapojení neinvertujícího zesilovače. Jeho základní schéma je na obr.1. Zesílení je závislé na hodnotách rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ , které tvoří tzv. zápornou zpětnou vazbu. Pro napěťové zesílení  $A_u$  platí vztah:

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$



Obrázek 1: Základní zapojení neinvertujícího zesilovače. Zdroj: [13]



### 3.2 Výpočet hodnot součástek předzesilovače

Hlavním požadavkem na předzesilovač je jeho velké napěťové zesílení  $A_u$ . Jak již bylo řečeno výše, zesílení je ovlivněno poměrem hodnot rezistorů R2 a R1. Nejčastěji se při návrhu postupuje zvolením napěťového zesílení a hodnoty jednoho rezistoru. Hodnota druhého rezistoru se poté dopočítá. Hodnotu R2 jsem zvolil 330 k $\Omega$  a po úpravě vztahu (1) na:

$$R_1 = (R_2 \cdot A_u) - 1 \quad (2)$$

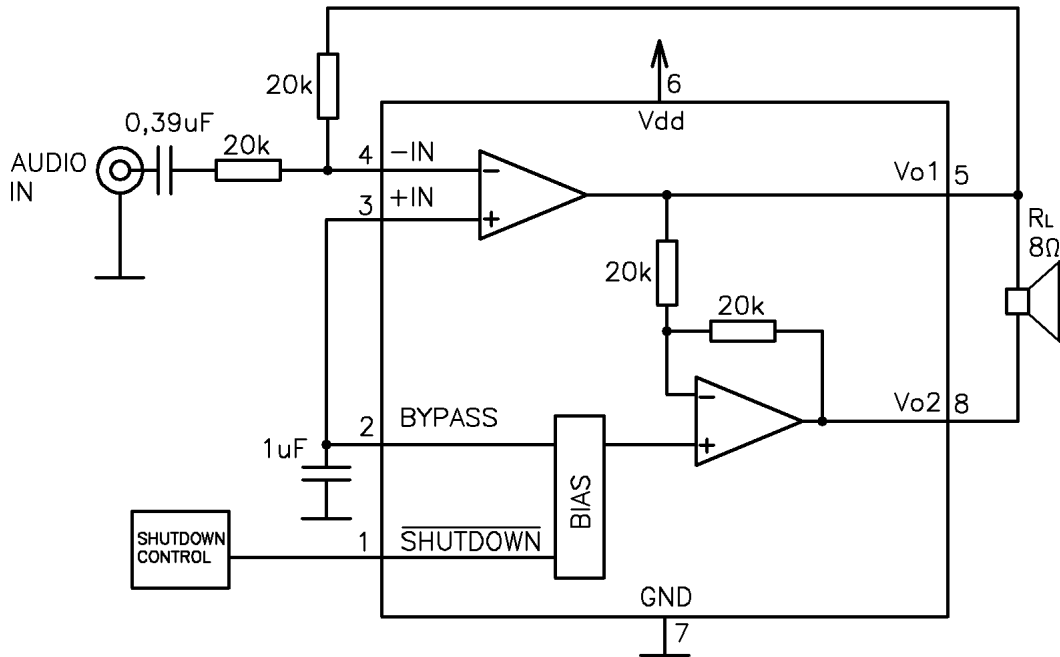
Napěťové zesílení  $A_u = 331$  se při praktické zkoušce zesilovače ukázalo jako zcela postačující. Hodnota rezistoru R1 v tomto případě vychází na 1 k $\Omega$ . V sérii s rezistorem R1 je ještě zařazen elektrolytický kondenzátor o hodnotě 10  $\mu$ F. Ten umožňuje přivést celou stejnosměrnou složku signálu z výstupu operačního zesilovače. To je nutné, protože operační zesilovač je napájený nesymetrickým napětím. Protože je použitý nesymetrický napájecí zdroj, jsou použity rezistory R10 a R13. Díky nim je na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače polovina napájecího napětí. Při přivedení vstupního střídavého napětí se výstupní napětí mění okolo této "referenční" hodnoty. Rezistory R10 a R13 musejí mít oba stejnou hodnotu, která však není kritická. Zvolil jsem 47 k $\Omega$ .

### 3.3 Snímací cívka

Snímací cívka je navinutá na tělese ze silonu. Počet závitů je přibližně 500. Na vinutí jsem použil měděný smaltovaný drát o průměru 0,25 mm. Pro demonstraci Barkhausenova šumu různých magnetických materiálů je jádro cívky výměnné. Celé těleso cívky je vsunuto do ochranné silonové trubičky. Ta zajišťuje mechanickou ochranu vinutí. Obrázek konečného provedení cívky, včetně výkresové dokumentace, je uveden v příloze.

### 3.4 Koncový zesilovač

Signál z předzesilovače má stále příliš malou napěťovou úroveň, než bychom mohli přímo připojit reproduktor. Z tohoto důvodu je zařazen ještě koncový zesilovač. Místo zapojení z diskretních součástek jsem zvolil integrovaný zesilovač LM4889. Podle katalogového listu [2] se jedná o audio zesilovač s maximálním výstupním výkonem 1 W, který je schopen fungování jen s minimem externích součástek a při malém napájecím napětí (2,2-5,5 V). Na následujícím obrázku je jeho základní zapojení (převzato a upraveno z [2]). Integrovaný obvod LM4889 obsahuje dva operační zesilovače. Jeden s nastavitelným zesílením pomocí externích rezistorů a druhý s pevným zesílením -1. Výstupy Vo1 a Vo2 jsou v tzv. můstkovém zapojení, kdy na obou výstupech je napětí stejné úrovně, ale posunuté o 180°.



Obrázek 2: Katalogové zapojení obvodu LM4889. Zdroj: [2]

### 3.5 Napájecí blok zesilovače

Jak bylo zmíněno výše, zvolil jsem napájení z článku Li-Ion. Tento typ akumulátoru nabízí hned několik výhod. Následuje výčet těch nejpodstatnějších.

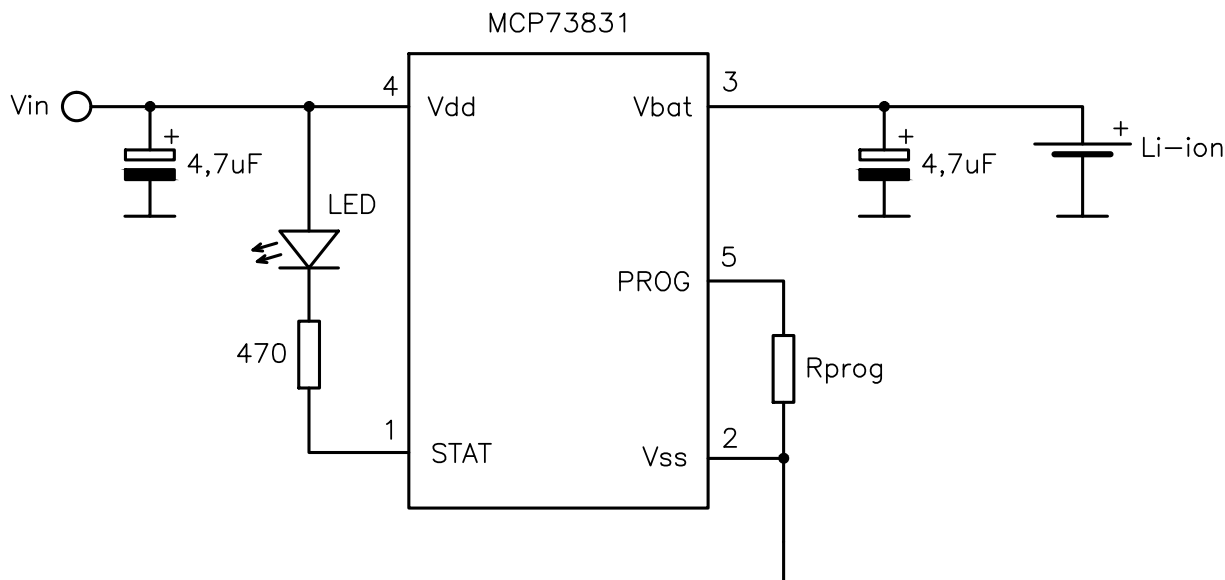
- výhodný poměr hmotnost/kapacita
- velké napětí
- velice malý efekt samovybití
- jednoduché nabíjení
- netrpí paměťovým efektem

Samozřejmě se zde vyskytují i nevýhody, jako například:

- špatná funkce při nízkých teplotách
- nutná ochrana proti podbití
- akumulátor podléhá stárnutí a ztrácí svou kapacitu

Převzato a upraveno z [3].

Přes všechny výše uvedené zápory jsou dnes Li-Ion akumulátory nej-používanějším zdrojem energie v přenosných zařízeních. Problém přílišného nabití, nebo vybití, řeší dnes integrované obvody, zabudované přímo v akumulátoru. Jako nabíjecí obvod jsem zvolil typ MCP73831. Ten v sobě obsahuje kompletní řešení pro nabíjení článků Li-Ion a je schopen fungování jen s minimem externích součástí. Na následující stránce je schéma zapojení nabíjecího obvodu.



Obrázek 3: katalogové zapojení nabíjecího obvodu MCP73831. Zdroj: [4]

Maximální nabíjecí proud článku se nastaví rezistorem mezi pinem Vss a PROG.

$$R_{prog} = \frac{1000}{I_{reg}} \quad (3)$$

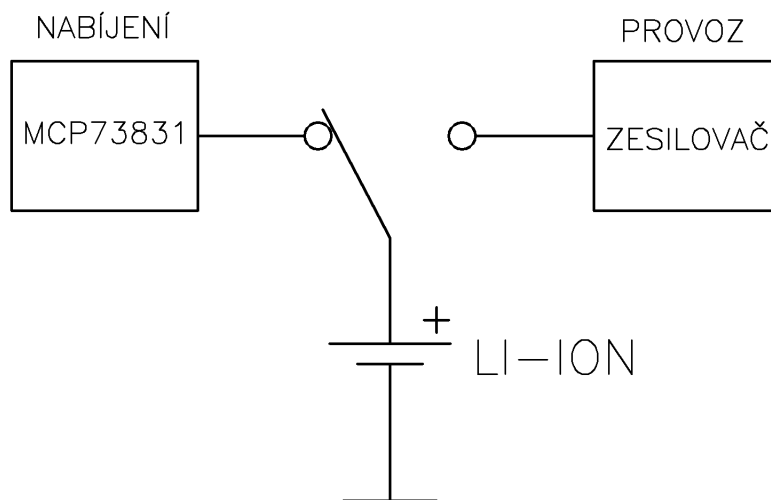
V katalogovém listu [4] je uvedena hodnota 2 kΩ. V tom případě vychází nabíjecí proud na 500 mA. Já však použil akumulátor o kapacitě 350 mAh. Články Li-Ion lze bez obav nabíjet proudem o velikosti 1 C. Pro můj článek tedy 350 mA a potom vychází hodnota rezistoru na 2,8 kΩ. Zvolil jsem nejbližší hodnotu v řadě, tedy 3,3 kΩ. Tato hodnota nastaví nabíjecí proud na 303 mA. Při kapacitě 350 mAh by se teoreticky článek nabíjel po dobu danou vztahem:

$$t_{nab} = \frac{C_{aku}}{I_{nab}} \quad (4)$$

V mém případě tedy 1,2 hodiny.

### 3.6 Přepínání nabíjení/vybíjení

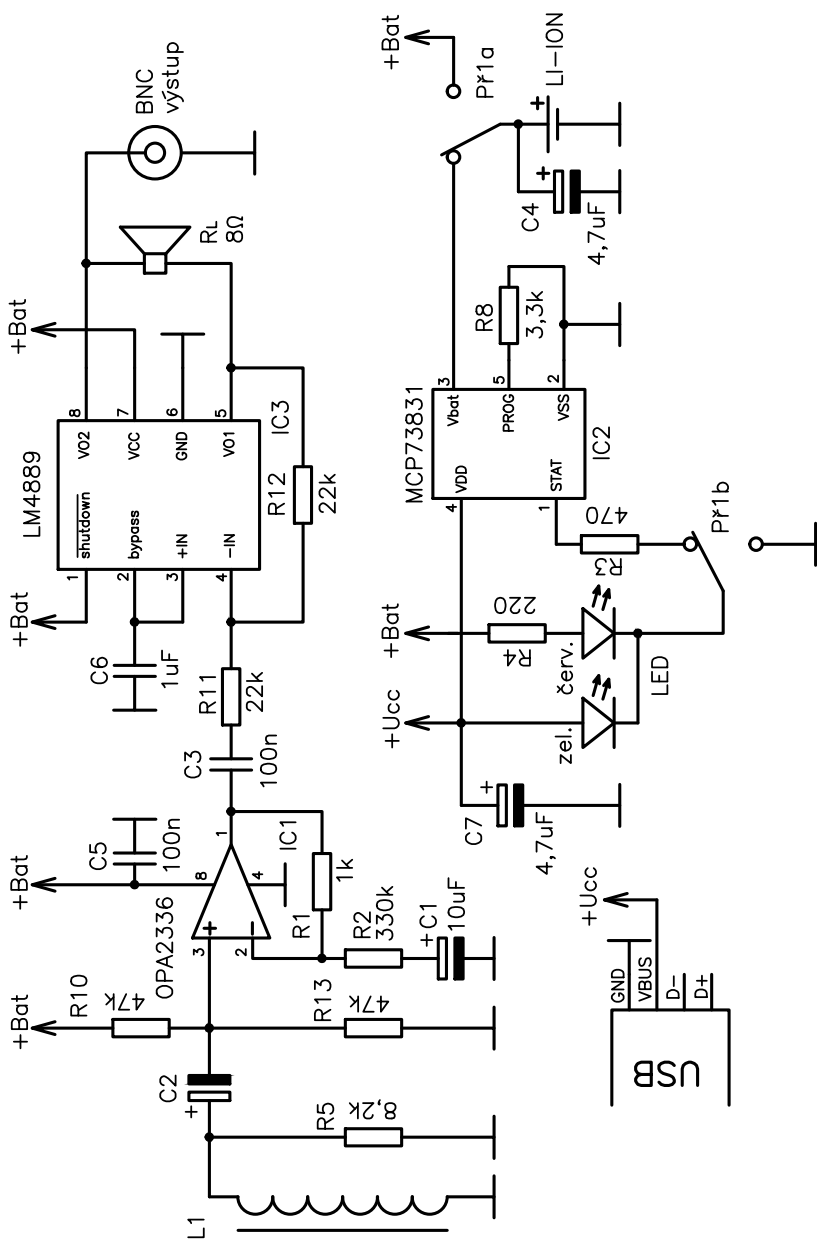
Zvolil jsem přepínání pomocí mechanického páčkového přepínače. Ten má tři polohy, přičemž v jedné krajní poloze je zesilovač v provozu, v druhé krajní poloze se nabíjí akumulátor. V prostřední poloze je zesilovač i nabíjení vypnuto. V průběhu vývoje jsem vyzkoušel i přepínání nabíjení/vybíjení pomocí tranzistoru MOS-FET s P-kanálem. Tento způsob zapojení však zanášel do zesilovače rušení z integrovaného obvodu MCP73831, a proto jsem od něj upustil.



Obrázek 4: přepínání nabíjení/vybíjení Li-Ion článku

### 3.7 Celkové zapojení

Po zpracování všech požadavků na konečné provedení zesilovače vzniklo následující zapojení. Jsou v něm zakomponovány všechny bloky, které byly zmíněny výše. Jedná se o napájecí zdroj, předzesilovač, koncový zesilovač a blok nabíjení akumulátoru. Na následující straně je celkové schéma zapojení zesilovače.



Obrázek 5: celkové zapojení

### 3.8 Ovládání

Přepínač na předním panelu má tři polohy. Při přeprnutí směrem nahoru je v činnosti zesilovač (to je signalizováno zeleným svitem LED). V poloze uprostřed je zesilovač vypnutý a v dolní poloze je v provozu nabíjení akumulátoru. Nabíjení probíhá pouze pokud je připojené nabíjecí napětí 5 V stejnosměrných. Pokud by byl přepínač přeprnutý do režimu nabíjení bez připojeného nabíjecího napětí, akumulátor se bude chovat jako odpojený a nedojde k jeho vybití. Nabíjení je signalizováno červeným svitem LED diody. Při zhasnutí LED je akumulátor plně nabitý.

### 3.9 Mechanické vyhotovení

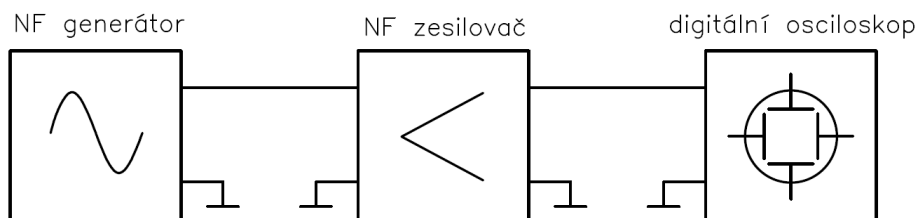
Zapojení zesilovače je realizováno na oboustranné desce plošných spojů (dále jen DPS). Část použitých součástek je v provedení THT a část v provedení SMD. K návrhu DPS jsem použil program Eagle [14]. Ten umožňuje návrh dvouvrstvé DPS a následný export dat ve formátu gerber. Tento formát je vyžadovaný většinou firem, které se zabývají výrobou DPS na zakázku. Celý zesilovač, včetně akumulátoru a reproduktoru je umístěn v jednoduché krabičce z hliníku. Všechny kovové části jsou spojeny se záporným pólem napájecího zdroje, což zajistí odstínění rušení. Na předním panelu je umístěn konektor BNC pro připojení snímací cívky, přepínač a LED dioda. Na zadním panelu je nabíjecí konektor typu mini-USB a výstupní konektor BNC. Ten slouží k připojení osciloskopu v případě, že chceme snímat výstupní signál zesilovače. V programu Solidworks jsem vymodeloval všechny důležité části, aby bylo možné navrhnout zástavbu celého zesilovače. 3D návrh a obrazec DPS je přiložen v příloze.



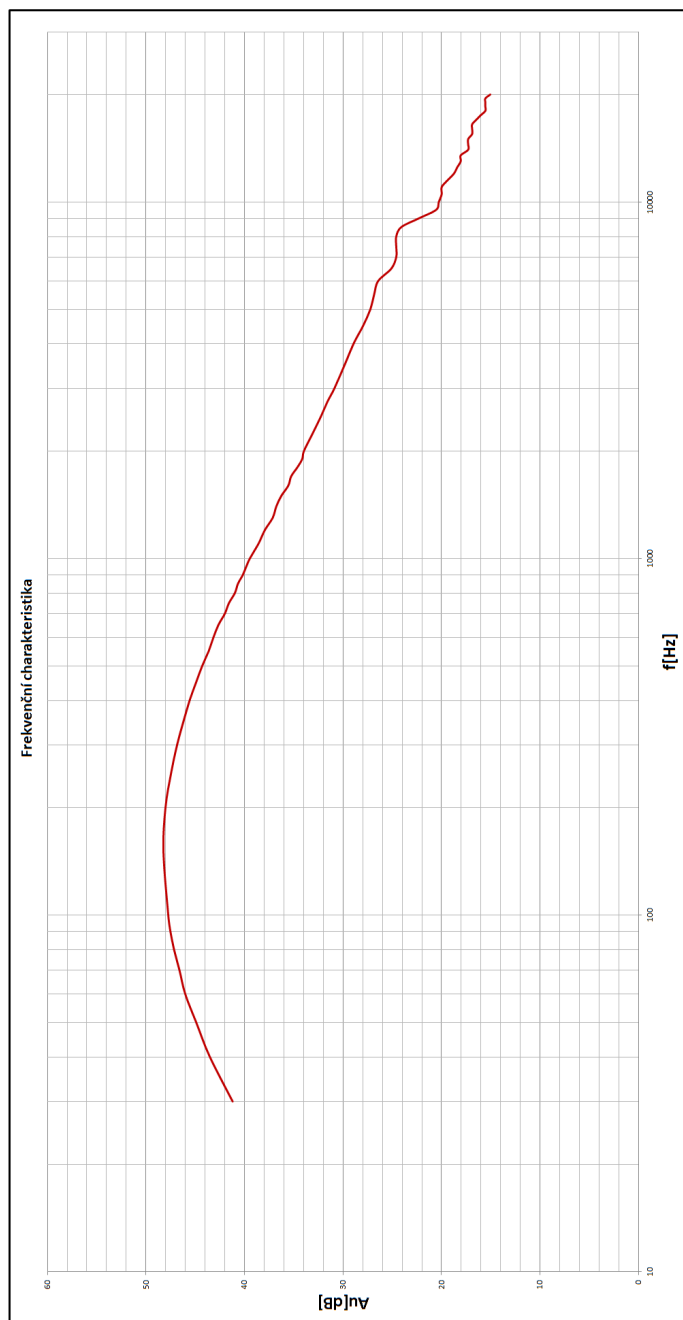
## 4 Měření parametrů zesilovače

### 4.1 Měření frekvenční charakteristiky

Jeden z hlavních parametrů zesilovače je jeho frekvenční charakteristika. Pro toto měření jsem použil signální generátor, měřený zesilovač a digitální osciloskop. Na vstup zesilovače se přivádí střídavé napětí sinusového průběhu o frekvenci od 30 Hz do 20 kHz a amplitudě v řádu jednotek mV. Na výstupu se poté měří výstupní napětí zesilovače pomocí digitálního osciloskopu. Signální generátor udržuje na svém výstupu konstantní amplitudu výstupního napětí. Proto nebylo třeba měřit i vstupní napětí zesilovače. Celé zapojení měřicí sestavy je na následujícím obrázku.



Obrázek 6: sestava pro měření frekvenční charakteristiky



Obrázek 7: graf frekvenční charakteristiky

## 4.2 Měření výstupního výkonu

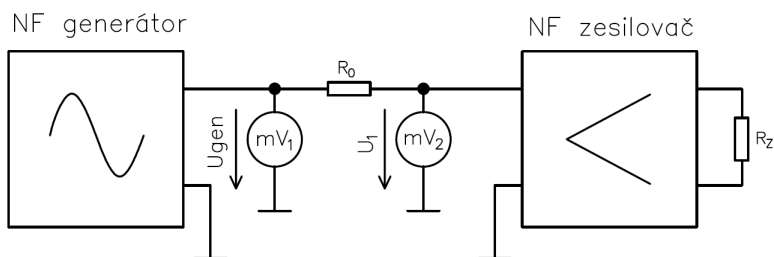
Dalším významným parametrem zesilovače je jeho výstupní výkon. Výrobce integrovaného obvodu LM4889 dle [2] udává maximální výstupní výkon 1 W při 2% harmonickém zkreslení, zátěži  $8 \Omega$  a napájecím napětí 5 V. Měření probíhalo při stejné konfiguraci zapojení, jako při měření frekvenční charakteristiky. Rozdíl je však v tom, že se provádí při konstantní frekvenci 1 kHz. Mění se pouze vstupní napětí zesilovače až do bodu, kdy začne docházet k limitaci výstupního signálu. Maximální výkon zesilovač poskytuje těsně před tímto bodem a jeho hodnota se vypočítá podle vzorce:

$$P_0 = \frac{U^2}{R_L} \quad (5)$$

Změřená hodnota výstupního efektivního napětí je 1,85 V. Po dosažení do vzorce (5) dojdeme k výstupnímu výkonu 0,43 W. Podle [2] obvod LM4889 dosahuje při napájecím napětí 3,3 V výstupního výkonu 0,4 W. V mém případě je napájecí napětí dáno napětím Li-Ion článku, tedy přibližně 3,7 V. Vypočítaný výstupní výkon je tedy v očekávaných mezích.

### 4.3 Měření vstupní impedance

Paralelně ke vstupu zesilovače je připojen rezistor o hodnotě 8,2 kΩ. Ten zabraňuje rozkmitávání zesilovače při odpojené snímací cívce. Měřicí konfiguraci znázorňuje následující obrázek.



Obrázek 8: uspořádání pro měření vstupní impedance

Vstupní impedance se vypočítá podle vzorce:

$$Z_{in} = \frac{U_1 R_0}{U_{gen} - U_1} \quad (6)$$

Byly naměřeny následující hodnoty:  $U_{gen}=80$  mVpp;  $U_1=14$  mVpp;  $R_0=5$  kΩ.

Po dosazení do vzorce (6) vypočítáme hodnotu vstupní impedance. V mém případě má hodnotu 1060 Ω při frekvenci vstupního napětí 1 kHz.

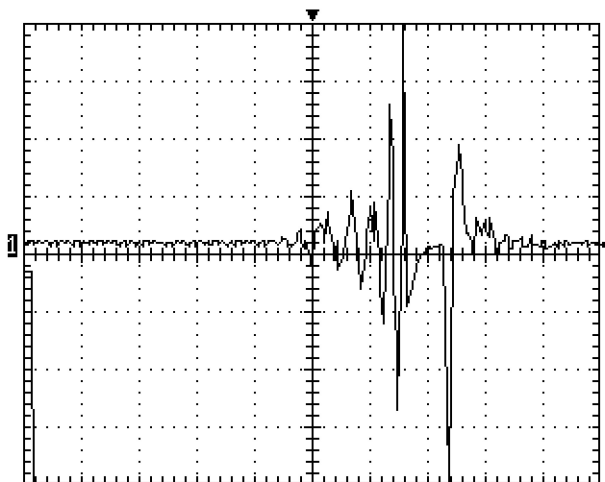
## 5 Závěr

Požadovaný zesilovač vyhovuje požadavkům zadání. Měření potvrdilo předpokládané parametry. Zesilovač umožňuje sledování Barkhausenova jevu sluchem a s použitím osciloskopu také záznam a studium parametrů šumu, vznikajícího orientací domén.

## 6 Příloha

### 6.1 Průběhy výstupního signálu

SoftView - (1.3.2016) Scope



#### Horizontal System Status

Timebase	0.2 s
Format	YT

#### Vertical System Status

	CH1	CH2
Volt/Div	0.1 V	20 mV
Coupling	AC	DC
Probe	X1	X1

#### Trigger System Status

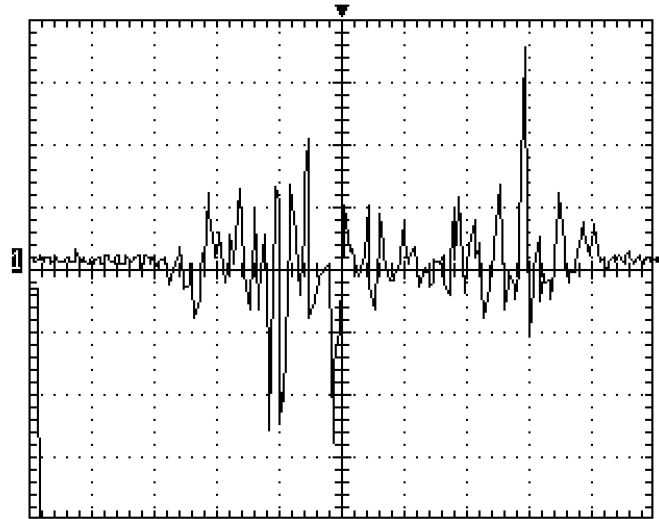
MODE	Auto
Source	CH1
Coupling	DC
Slope	Rising

#### Parameter Information

	CH1	CH2
Peak To Peak	1.0V	???
RMS	0.0V	???
Mean	0.004V	???
Frequency	83.33Hz	???
Rise Time	???	???
Fall Time	0.16s	???
Period	0.01s	???
Positive Width	0.00s	???
Negative Width	0.01s	???

Obrázek 9: časový průběh šumu

SoftView - (1.3.2016) Scope



Horizontal System Status

Timebase	0.2 s
Format	YT

Vertical System Status

	CH1	CH2
Volt/Div	0.1 V	20 mV
Coupling	AC	DC
Probe	X1	X1

Trigger System Status

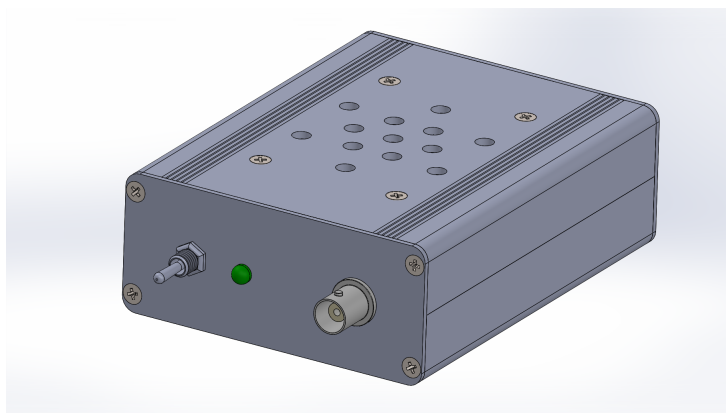
MODE	Auto
Source	CH1
Coupling	DC
Slope	Rising

Parameter Information

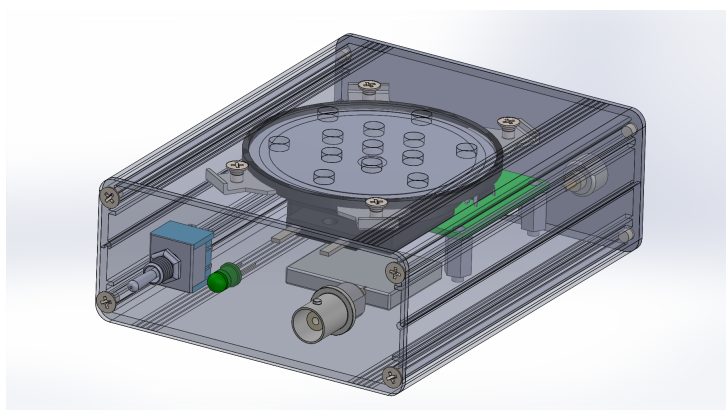
	CH1	CH2
Peak To Peak	0.9V	???
RMS	0.0V	???
Mean	0.008V	???
Frequency	6.25Hz	???
Rise Time	0.80s	???
Fall Time	???	???
Period	0.16s	???
Positive Width	0.00s	???
Negative Width	0.16s	???

Obrázek 10: časový průběh šumu

## 6.2 3D návrh

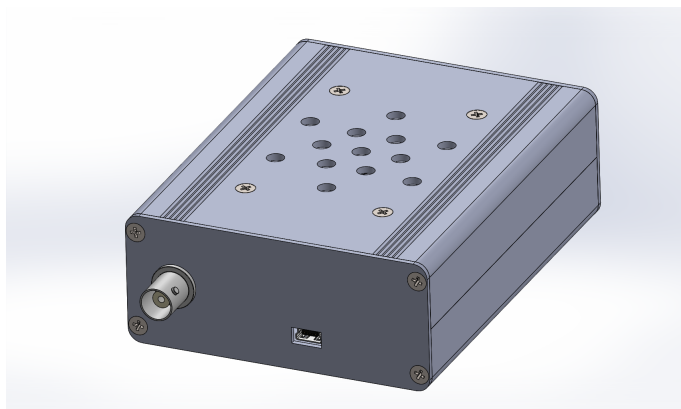


Obrázek 11: vnější pohled



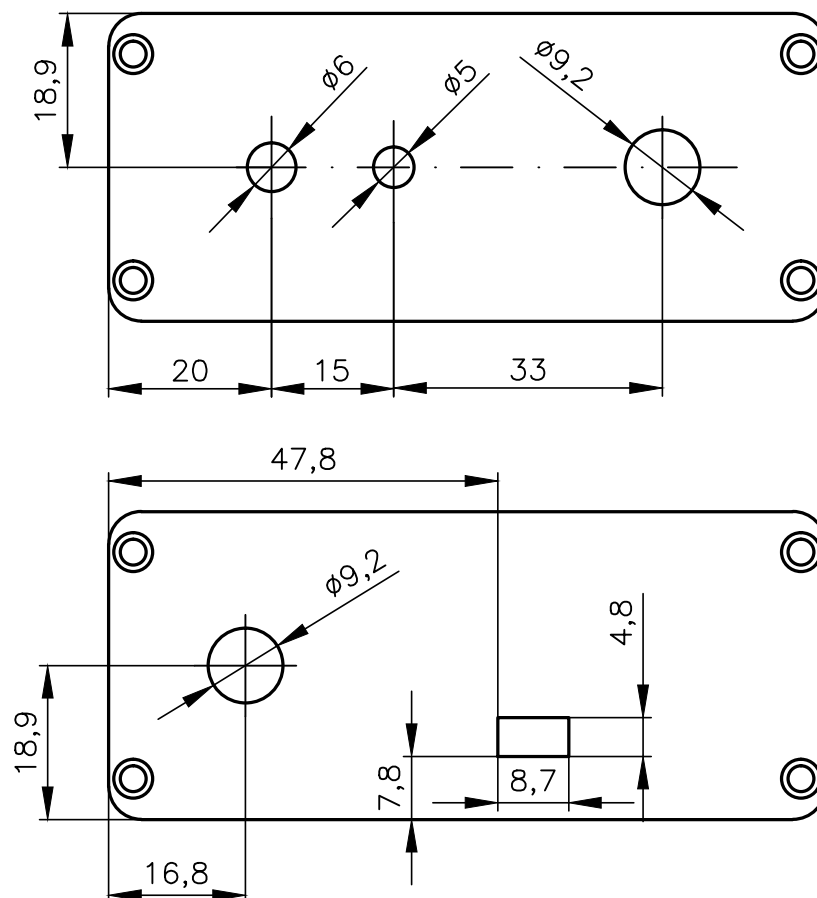
Obrázek 12: částečný pohled dovnitř



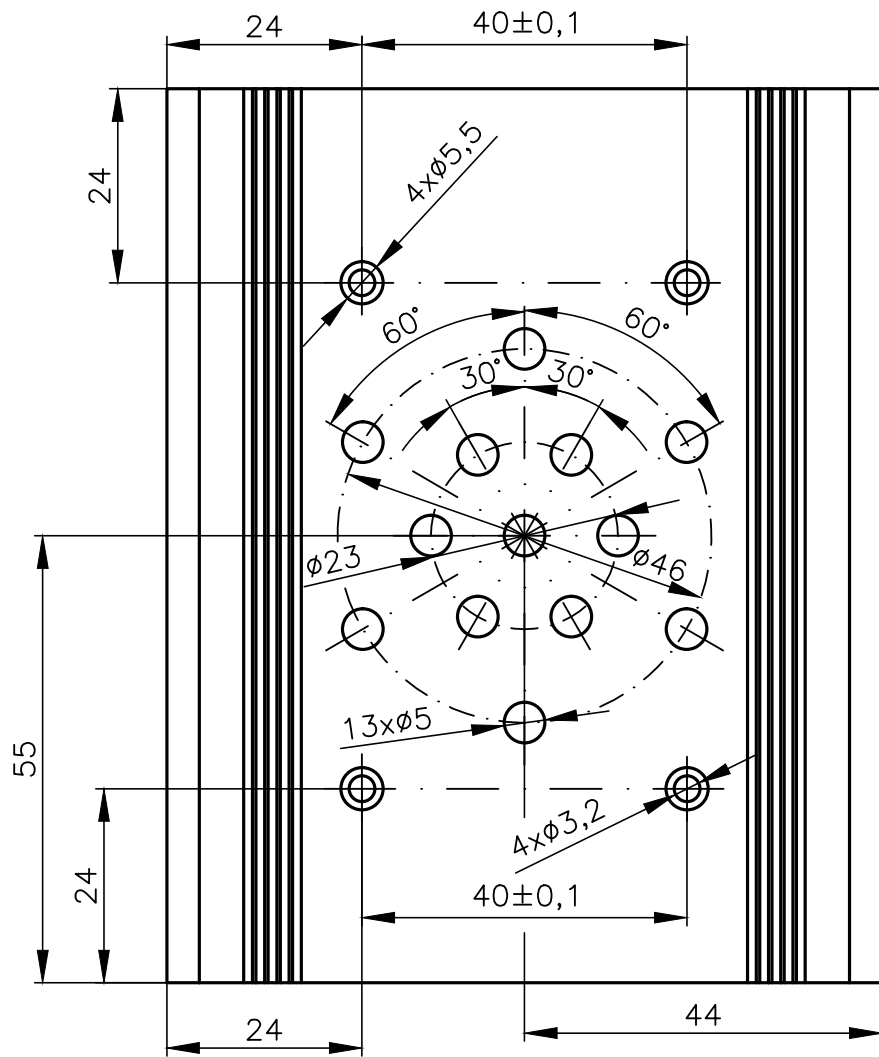


Obrázek 13: pohled na zadní panel

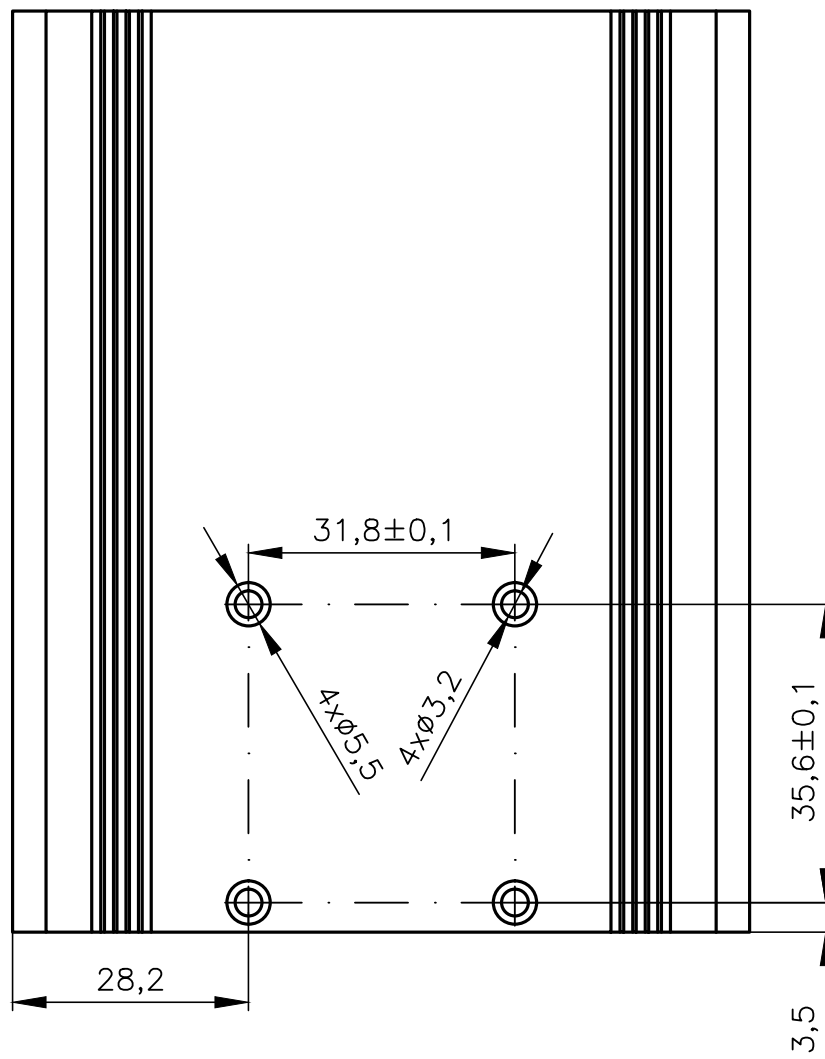
### 6.3 Výkresy jednotlivých dílů



Obrázek 14: výkresy předního a zadního panelu

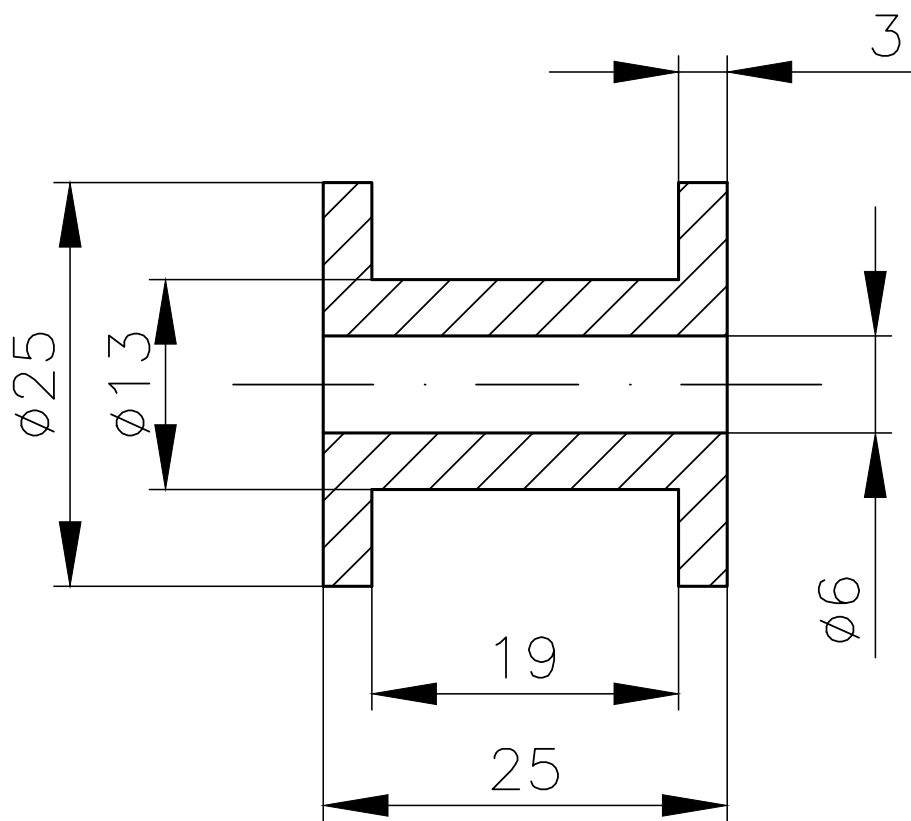


Obrázek 15: výkres vrchního dílu krabičky

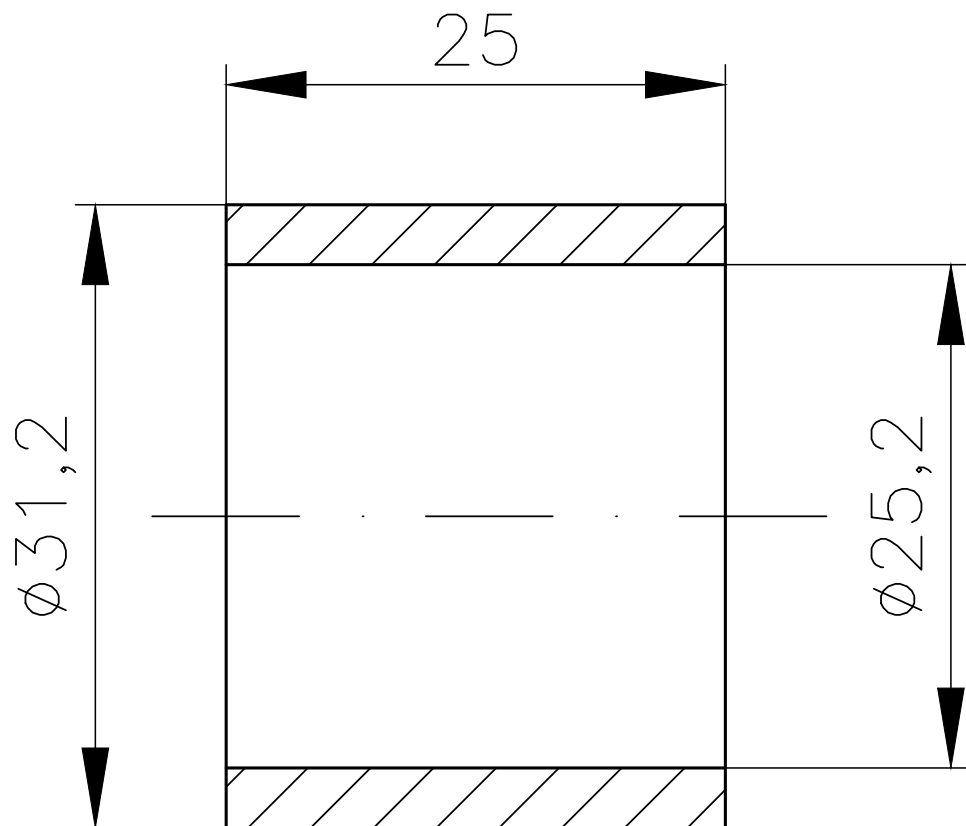


Obrázek 16: výkres spodního dílu krabičky

#### 6.4 Snímací cívka

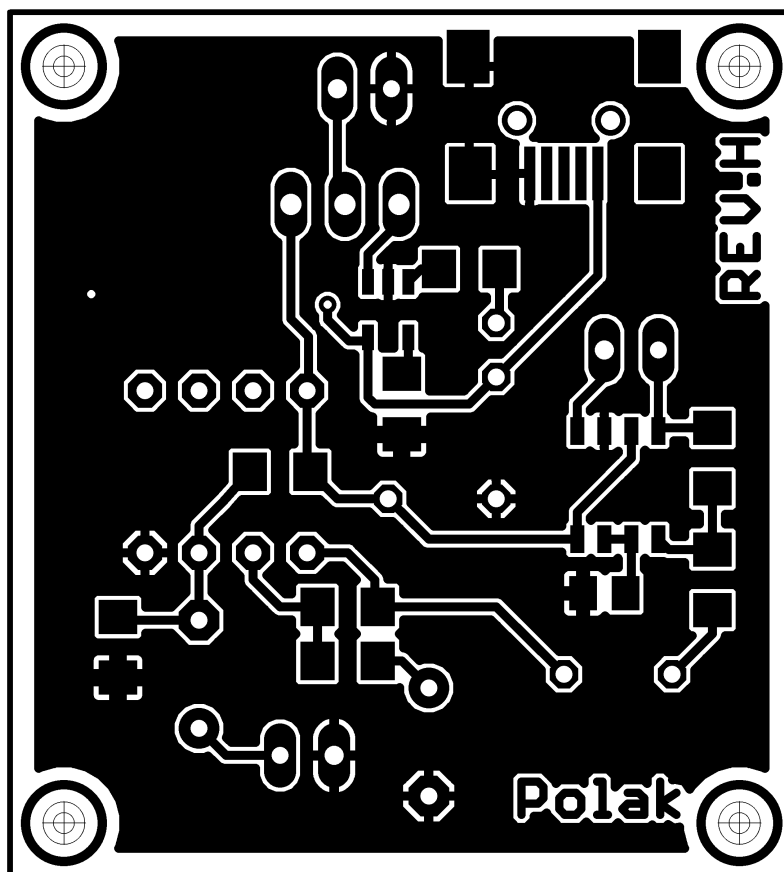


Obrázek 17: kostříčka snímací cívky

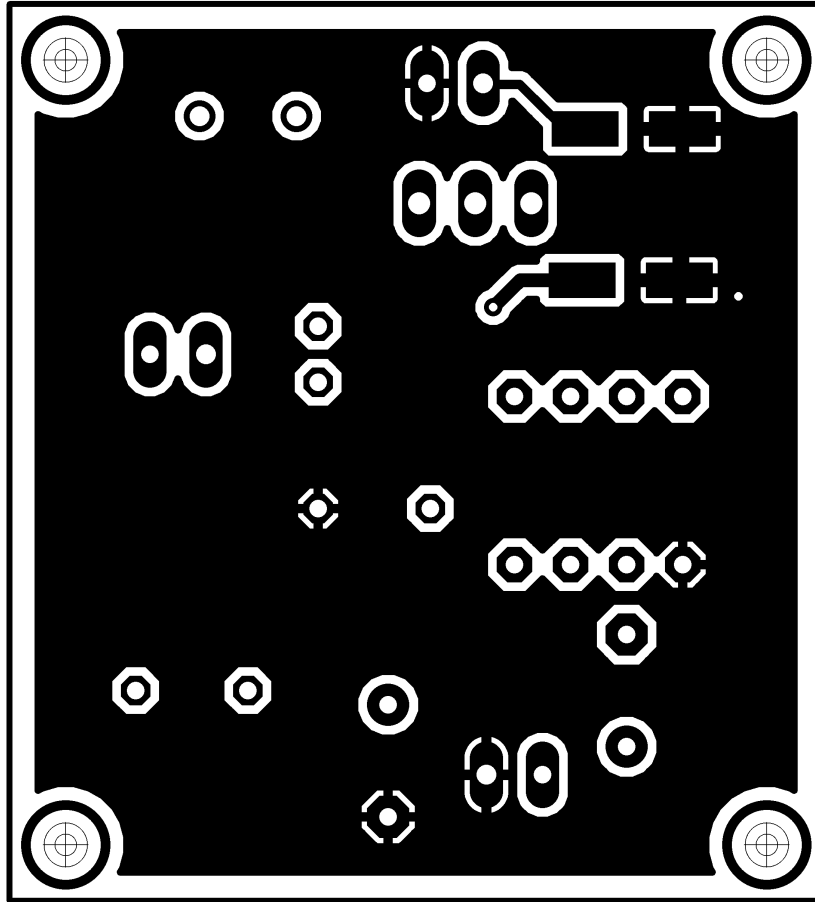


Obrázek 18: kryt snímací cívky

## 6.5 Deska plošných spojů

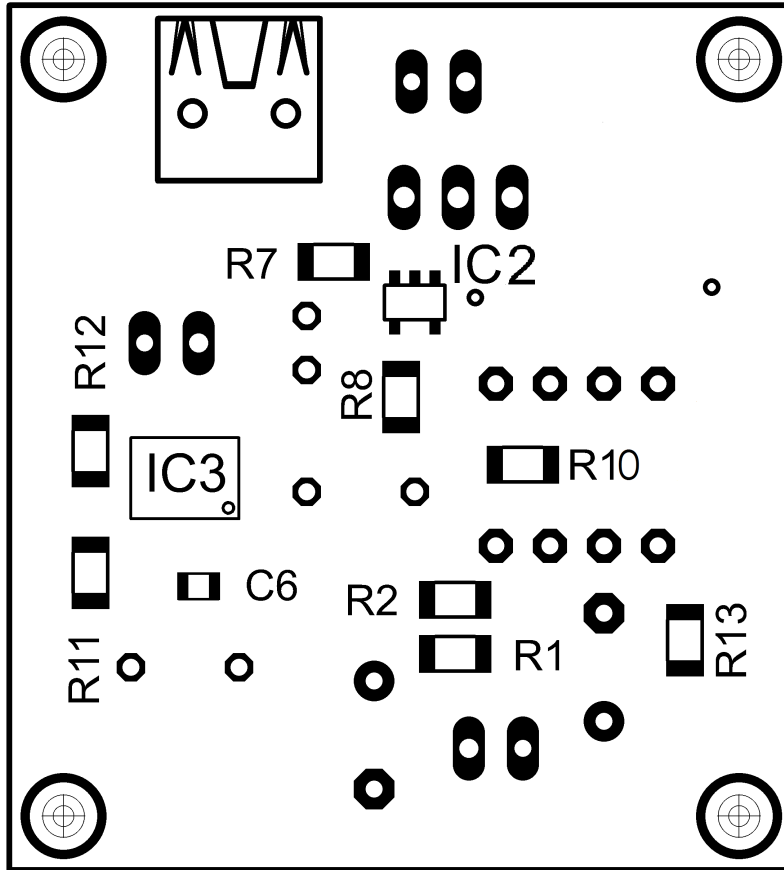


Obrázek 19: DPS-vrstva bottom

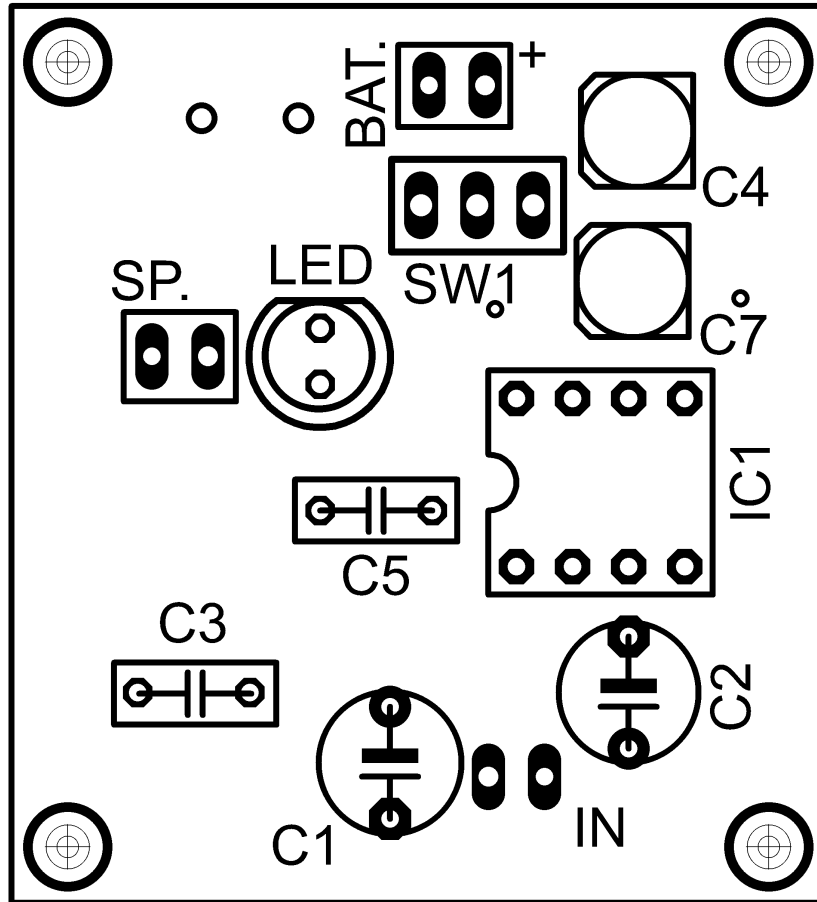


Obrázek 20: DPS-vrstva top





Obrázek 21: DPS-osazení součástkami bottom



Obrázek 22: DPS-osazení součástkami top

## 7 Fotodokumentace



Obrázek 23: vnější pohled na zesilovač



Obrázek 24: pohled na zadní panel



Obrázek 25: pohled dovnitř zesilovače



Obrázek 26: snímací cívka

## 8 Zdroje

- [1] OPA2336. Texas Instruments. [online]. 18.4.2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa336.pdf>
- [2] LM4889. Texas Instruments. [online]. 18.4.2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4889.pdf>
- [3] Často kladené otázky o LiIon článcích. MZ- Miloš Zajíc- elektronické stavebnice a moduly. [online]. 18.4.2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://zajic.cz/nablion/lionfaq.htm>
- [4] MCP7381/2 Data Sheet. Microchip. [online]. 18.4.2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001984g.pdf>
- [5] Měření vstupní impedance. Elektronika- teoretické základy, praktická zapojení. [online]. 18.4.2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: [elnika.sweb.cz/mereni/vstup\\_imped.htm](http://elnika.sweb.cz/mereni/vstup_imped.htm)
- [6] Op-Amp Microphone Preamp. Circuit Exchange International. [online]. 18.4.2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: [http://www.zen22142.zen.co.uk/Circuits/Audio/lf071\\_mic.htm](http://www.zen22142.zen.co.uk/Circuits/Audio/lf071_mic.htm)
- [7] Vzorce pro elektroniku. Praha: BEN- technická literatura, 2007. ISBN 80-86056-53-8.
- [8] The art of electronics. Indie: India Binding house, 1989. ISBN 978-0-521-68917-5.
- [9] Decibely. Elektronika- teoretické základy, praktická zapojení. [online]. 2.5.2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://elnika.sweb.cz/mereni/decibely.htm>
- [10] Barkhausen effect. Wikipedia. [online]. 2.5.2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Barkhausen\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Barkhausen_effect)
- [11] The Barkhausen effect experiment. The JLN Labs. [online]. 2.5.2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://jnaudin.free.fr/dlenz/DLE20en.htm>

[12] Protection circuitry. Adafruit. [online]. 2.5.2016 [cit. 2016-05-02].  
Dostupné z:  
<https://learn.adafruit.com/li-ion-and-lipoly-batteries/protection-circuitry>

[13] Zapojení s operačním zesilovačem. Wikipedie. [online]. 3.5.2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Zapojen%C3%AD\\_s\\_opera%C4%8Dn%C3%ADm\\_zesilova%C4%8Dem](https://cs.wikipedia.org/wiki/Zapojen%C3%AD_s_opera%C4%8Dn%C3%ADm_zesilova%C4%8Dem)

[14] Eagle Software. CadSoft Eagle. [online]. 3.5.2016 [cit. 2016-05-03].  
Dostupné z: <http://www.cadsoft.de/download-eagle/>