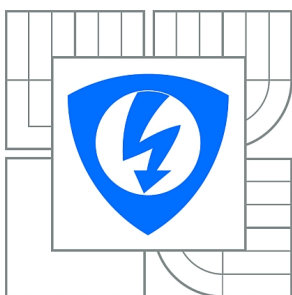




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LAMPOVÝ MIKROFON

TUBE MICROPHONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ADAM ŠKODA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV STANĚK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Adam Škoda

ID: 134630

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Lampový mikrofón

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte princip činnosti mikrofónu obsahující ve svém těle elektronku. Seznamte se také se samotnou možností realizace tohoto druhu mikrofónu včetně jeho napájení. Mikrofón i napáječ vhodně navrhnete. Proveďte rovněž návrh desek plošných spojů.

Obě navržené části zrealizujte, oživte a proveďte detailní měření vyrobeného systému. Porovnejte směrovou i frekvenční charakteristiku vytvořeného mikrofónu s podobnými komerčními produkty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda NF techniky, 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 1998.

[2] KREJČIŘÍK, A. Napájecí zdroje 1, 2. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 1997.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Staněk

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, 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

Předložená bakalářská práce se zabývá prostudováním činnosti a návrhem elektronkového mikrofону, který využívá ke snímání zvuku kapacitní mikrofonní vložku. V těle navrženého mikrofону je umístěna elektronka s označením ECC81, sloužící jako zesilovací člen vstupního signálu. Obsahem této bakalářské práce je vybrání vhodného zapojení mikrofonní části, jeho modifikace i návrh vhodného napěťového zdroje, sloužícího k napájení a žhavení elektronky ECC81. Funkčnost všech navržených částí mikrofonního systému byla ověřena pomocí vhodných simulací. Následně byla realizována výroba všech částí mikrofону, jejich oživení a detailní proměření veškerých charakteristik a parametrů vyhotoveného mikrofону. Po změření byl mikrofón porovnáván s podobnými komerčními produkty. Pomocí těchto porovnání bylo zjištěno, že vyrobený mikrofón je kvalitativně ekvivalentní ke komerčním produktům. Součástí předložené práce je i seznam součástek a desky plošných spojů.

KLÍČOVÁ SLOVA

zvuk, snímání zvuku, mikrofón, elektronka, ECC81, 12AT7

ABSTRACT

The presented thesis deals with a tube microphone using a condenser microphone capsule for sound capturing. Moreover, two essential aspects of a tube microphone – the basis of its operation and its design – are also discussed in this thesis. In the designed microphone, there is a vacuum tube known as ECC81. This vacuum tube is used as an amplifying element of an input sound signal. This paper also includes the choice of the most suitable microphone circuit, its modification and the design of a voltage source used for feeding and heating the vacuum tube. Some appropriate simulations were applied to find out the functionality of all designed parts of the microphone system. Following step was the practical realization of all microphone parts as well as the activation and the complete parameters and characteristics measurements of realized microphone system. After the provided measurements, the microphone was compared to equivalent commercial products. Evidently, the realized microphone is qualitatively similar to other commercial products. Presented thesis also contains the list of components and PCBs.

KEYWORDS

sound, sound capturing, microphone, tube, ECC81, 12AT7

ŠKODA, A. *Lampový mikrofon*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 35 s., 9 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Staněk.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Lampový mikrofon jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/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 30. května 2014

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Staňkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 30. května 2014

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Historie	2
1.1 Počátky snímání hudebního signálu	2
1.2 Elektronky	5
1.2.1 Značení elektronek	6
1.2.2 Vlastnosti elektronek	6
2 Mikrofony	9
2.1 Princip a základní rozdělení.....	9
2.2 Druhy mikrofonů	10
2.2.1 Uhlíkové mikrofony.....	10
2.2.2 Elektrodynamické mikrofony	11
2.2.3 Elektrostatické mikrofony.....	12
2.2.4 Piezoelektrické mikrofony	14
2.2.5 Speciální mikrofony.....	14
2.3 Frekvenční charakteristika.....	15
2.4 Směrová charakteristika.....	15
3 Návrh mikrofonu	17
3.1 Blokové schéma	17
3.2 Transformátor	18
3.2.1 Síťový transformátor – návrh.....	18
3.2.2 Výstupní transformátor	20
3.3 Mikrofon	20
3.3.1 Simulace v programu Pspice.....	21
3.4 Anodové napájení	22
3.5 Napájení žhavení.....	23
3.5.1 Simulace v programu Pspice pro anodové a žhavicí napětí.....	23

4	Měřicí pracoviště	24
4.1	Blokové schéma	24
4.1.1	Referenční mikrofon Brüel & Kjær 4189	25
4.1.2	Reprobox Event TR8	25
4.1.3	Napájecí zdroj	26
4.1.4	Kondiční zesilovač.....	26
4.1.5	Audio analyzátor APx525.....	27
4.1.6	PC – Audio Precision software.....	27
5	Vyrobený mikrofon	28
5.1	Frekvenční charakteristika.....	29
5.2	Směrová charakteristika.....	30
6	Porovnávání	32
6.1	Lampový mikrofon MXL 960	32
6.2	Lampový mikrofon Rode K2	32
6.3	Lampový mikrofon Neumann M 150	33
7	Závěr	35
	Literatura	36
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	37
	Seznam příloh	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Převodní a anodová charakteristika elektronky [5].	7
Obr. 2:	Změny akustického tlaku v čase [7].	10
Obr. 3:	Princip uhlíkového mikrofonu [8].	11
Obr. 4:	Princip elektrodynamického mikrofonu s membránou a konstrukční provedení gradientního elektrodynamického mikrofonu [6].	11
Obr. 5:	Princip páskového mikrofonu [6].	12
Obr. 6:	Princip elektrostatického mikrofonu [6].	13
Obr. 7:	Princip elektrostatického elektretového mikrofonu [6].	13
Obr. 8:	Princip piezoelektrického mikrofonu [6].	14
Obr. 9:	Frekvenční charakteristika mikrofonu.	15
Obr. 10:	Směrové charakteristiky mikrofonů [6].	15
Obr. 11:	Směrová charakteristika mikrofonu pro různé frekvence [6].	16
Obr. 12:	Blokové schéma navrženého mikrofonního systému.	18
Obr. 13:	Schéma zapojení mikrofonu.	20
Obr. 14:	Simulace výstupního a vstupního signálu.	21
Obr. 15:	Simulace frekvenční charakteristiky mikrofonu.	22
Obr. 16:	Schéma zapojení anodového napájení.	22
Obr. 17:	Schéma žhavicího napětí.	23
Obr. 18:	Simulace napěťové úrovně anodového a žhavicího napětí.	23
Obr. 19:	Blokové schéma měřícího pracoviště.	24
Obr. 20:	Kondenzátorový mikrofon B & K 4189 s předzesilovačem B & K 2669 [11].	25
Obr. 21:	Reprobox Event Tuned Reference 8 [12].	25
Obr. 22:	Zdroj anodového a žhavicího napětí.	26
Obr. 23:	Kondiční zesilovač Brüel & Kjaer NEXUS [11].	27
Obr. 24:	Audio analyzátor Audio Precision [13].	27
Obr. 25:	Vnitřní uspořádání mikrofonní části bez krytu	28
Obr. 26:	Vyrobený mikrofonní systém	28
Obr. 27:	Frekvenční charakteristika vyrobeného mikrofonu.	29
Obr. 28:	Směrová charakteristika pro kmitočty: 250 Hz, 375 Hz, 500 Hz a 1 kHz... 31	
Obr. 29:	Směrová charakteristika pro kmitočty: 2 kHz, 10 kHz a 16 kHz.	31

Obr. 30:	Frekvenční a směrová charakteristika mikrofonu MXL 960 [14].	32
Obr. 31:	Frekvenční charakteristika mikrofonu Rode K2 [14].	33
Obr. 32:	Směrová charakteristika mikrofonu Rode K2 [14].	33
Obr. 33:	Frekvenční charakteristika mikrofonu Neumann M 150 [14].	34
Obr. 34:	Směrová charakteristika mikrofonu Neumann M 150 [14].	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Změna maxima přeneseného výkonu transformátorem v závislosti na teplotě okolí	19
Tab. 2:	Tepelné třídy normalizovaných izolací.....	19
Tab. 3:	Parametry zvoleného transformátoru	20
Tab. 4:	Vlastnosti mikrofону Brüel & Kjær 4189-B-001	25
Tab. 5:	Naměřené hodnoty mikrofonu	29
Tab. 6:	Stručná tabulka frekvenční charakteristiky.....	29
Tab. 7:	Tabulka naměřených hodnot pro různé frekvence.....	30

ÚVOD

Zadáním předložené bakalářské práce je návrh lampového mikrofonu, který využívá jako předzesilovacího činitele elektronku. Snímání zvuku navrženým mikrofonem pracuje na principu změny kapacity mikrofonní vložky.

Navrhnout schéma funkčního mikrofonu, navíc ještě elektronkového, by bylo velice obtížné a museli bychom být velmi zkušenými odborníky v tomto odvětví elektroniky. Z tohoto důvodu bylo vybráno schéma populárního prodávaného mikrofonu výrobce Aurycle [1], které bylo vhodně pozměněno a vylepšeno. Největší změnou je výměna elektronky 12AX7, označované v České republice jako ECC83, za elektronku 12AT7 označovanou ECC81, která má sice menší zesílení, ale je pro zpěv či hlas vhodnější a lidskému uchu líbivější.

Kondenzátorové mikrofony musí obsahovat ke své existenci fantomové napájení, ovšem u elektronkových kondenzátorových mikrofonů se toto napájení nevyužívá. Napájení je zde tvořeno anodovým a žhavicím napětím elektronky, které jsme vhodně zvolili podle datasheetu námi zvolené elektronky.

1 HISTORIE

1.1 Počátky snímání hudebního signálu

Historicky první zmínky o vynálezu mikrofonu sahají až do 17. století. Slovo mikrofon pochází z řeckých výrazů „micro“, jehož český význam je malý a „phon“, což česky znamená zvuk.

První zmínky o zařízení, které zesiluje „malé“ zvuky je z roku 1683. Nejednalo se o akustické měniče, ale o jakési ušní trumpetky, akustická naslouchadla či megafony. Další zmínku o mikrofonu můžeme najít z druhé poloviny 19. století. Zde se jednalo o vynález stetoskopického naslouchadla, i tady se jednalo o zařízení, které vedlo a zesilovalo zvuk. Počátky tohoto typu mikrofonu se datují do 19. století, kdy bylo zaznamenáno velké množství převratných vynálezů. Jedny z prvních pokusů o výrobu mikrofonu jsou přiřazeny k přenosu hlasu a vzniku telefonu – tzv. „mluvícího telegrafu“.

Německý fyzik Johann Philipp Reis byl jedním z prvních vynálezců. Navrhl membránu s přiloženým kovovým páskem, kterým spojoval elektrický obvod. Tento vynález ovšem nebyl kvalitně zkonstruován a srozumitelný byl také jen velice těžko. Dalším vynálezcem mikrofonu byl americký Elisha Gray, který vytvořil liquid transmitter (tzv. tekutý vysílač), obsahující membránu s kovovou elektrodou vloženou do kyselého roztoku. Membrána se při změnách vstupních zvukových parametrů posouvala od pevné elektrody a tím byla měněna velikost elektrického odporu a tímto způsobem se reguloval procházející proud.

Na tomto principu vynalezl Alexander Graham Bell v roce 1876 svůj první model jednoduchého telefonu. Ovšem o vynález telefonu se zasazoval i Elisha Gray, ale boj o patent vyhrál A. G. Bell, který doručil svůj telefon jen o několik hodin dříve než Elisha Gray. Mezi boj o patent můžeme zařadit i Antonia Meucciho, jenž prováděl pokusy s elektroléčbou a nedopatřením nepřímo objevil elektromagnetickou indukci. Historikové uvádějí, že Meucci neměl moc úspěšné pokusy a z toho důvodu nebyla většina jeho vynálezů patentována. Ovšem Kongres Spojených států amerických Antonia Meucciho v roce 2002 uznal jako vynálezce telefonu před Alexandrem Grahamem Bellem. Dalším vynálezcem, který chtěl zdokonalit tuto metodu, byl Emile Berliner, jenž vylepšil Bellův hlasový vysílač do formy, která se začala používat jako mikrofon v prvních telefonech.

Nekvalitní liquid transmitter se pokoušelo vylepšit mnoho vynálezců. Nejlépe se podařilo tuto metodu v roce 1878 vylepšit Davidu Edwardu Hughesovi, jenž navrhl úplně nový typ uhlíkového mikrofonu. Hlavní součástí tohoto mikrofonu byl uzavřený prostor s membránou naplněný uhlíkovými zrnky. Pomocí akustického signálu, který měnil polohu membrány a stlačoval zrnka, se měnil proud procházející mezi výstupní a napájecí elektrodou. V té době to byl obrovský vynález, který umožnil použití telefonu pro přenos řeči. Tento typ mikrofonu ještě vylepšil T. A. Edison a to použitím jemnějších zrnků, která vložil do robustnější konstrukce mezi dvě kovové destičky. Tímto krokem vznikla nejvíce používaná konstrukce uhlíkových mikrofonů.

Další výhodou uhlíkových mikrofonů je použití zesilovací části. Zde bych podotknul, že polovodičový zesilovací prvek byl vynalezen až v roce 1906. Ve vylepšení od T. A. Edisona procházel mikrofonem výkonový signál, a tím pádem i velký proud, takže se mikrofony hodně zahřívaly. Další nevýhodou byla velká citlivost mikrofonu na vibrace. Mikrofony byly vkládány do těžkých pouzder a upevňovány do pevných stacionárních rámců, aby se zabránilo tomuto nežádoucímu jevu.

Jeden z prvních mikrofonů využívaných v telefonních přístrojích, které byly komerčně dostupné byl „Blakeův vysílač“ od firmy Western Electronic. Vyráběl se od roku 1882 a přístroj s veškerým vybavením byl vysoký skoro jeden metr. Dalšímu telefonnímu vysílači „Solid Black“ od stejného výrobce byl udělen patent v roce 1892 a byl s různými vylepšeními používán několik desetiletí. Některé další významné modely od firmy Western Eletronic jako typ 229 z roku 1895, nebo 323 z roku 1917 měly výrazně lepší citlivost a menší zkreslení, ale obsahovaly vnitřní rezonanci okolo oblasti 1kHz, která vytvářela zvuk jako z megafonu. Při telefonování to ovšem nebyl problém, neboť tento rezonanční kmitočet v mnoha případech vylepšilo srozumitelnost mluvené řeči. Ovšem pro záznam a přenos hudby byl tento jev nevyhovující. Další významnou firmou byla společnost Georg Neumann GmbH, která byla založena v roce 1928. Dodnes tato firma existuje a patří k dnešní špičce mezi prodejci mikrofonů.

Ve dvacátých letech uhlíkové mikrofony přestaly uživatelům stačit, a tak začal rozsáhlý výzkum dalších možností. Jedna část se zaměřila na poznatky bratří Curieových (Jaques a Pierre) v oblasti využití piezoelektrických materiálů založených na krystalech křemene a Seignettovy soli, ale výsledná kvalita mikrofonů byla velmi špatná.

Další část začala používat ke snímání zvuku změnu kapacity kondenzátoru, jehož jedna z elektrod byla vytvořena pružnou pohyblivou membránou. Úplně první kondenzátorový mikrofon byl vytvořen roku 1917 v USA. Fungoval na principu změny vzdálenosti mezi elektrodami, při čemž se měnila jeho vnitřní kapacita, která se dále převáděla na napětí pomocí elektrického obvodu. Ovšem signál z mikrofonu byl velmi slabý a potřeboval být zesílen. Zde byl použit vynález Lee de Foresta z roku 1907 zesilovací elektronka Audion (z této zesilovací elektronky byla později vyvinuta trioda). Přímo za mikrofonem byla vložena napájená elektronka. Tento postup se používá i dnes, a proto se i v dnešních kondenzátorových mikrofonech musí dodat tzv. „fantomové napětí“. Technologie kondenzátorového mikrofonu se nejvíce začala vyrábět v roce 1928 Georgem Neumannem. Výrobní model CMV 3 převyšoval všechny uhlíkové mikrofony a stal se nejvíce používaným mikrofonem pro nahrávací studia na desetiletí. Nahrazen byl až v letech 1949- 1965 kdy se vyráběl velkomembránový kondenzátorový mikrofon U 47. Tento mikrofon vynikal svým čistým zvukem a frekvenční odezvou se zvýrazněnými vyššími středy a byl to jeden z nejvíce využívaných mikrofonů skupiny Beatles.

Jiná alternativa vznikala na konci dvacátých let v Bellových laboratořích a patent dostala v roce 1931. Zde mluvíme o dynamickém mikrofonu, nebo-li o mikrofonu s pohyblivou cívkou, který na rozdíl od kondenzátorového mikrofonu fungoval na principu elektromagnetické indukce. Princip pohyblivé cívky byl popsán už v roce 1874 Ernestem Siemensem, ovšem v mikrofonech nebyl využíván z důvodu slabých polí magnetů. Postačující síle dosahovaly pouze elektromagnety, a proto první dynamické mikrofony potřebovaly externí napájení a byly poměrně veliké. V dnešní

době je tento problém vyřešen, protože existují velice silné permanentní magnety. Nejpoužívanější neodymový magnet, který byl vyroben v roce 1982, unese více jak tisícinásobek své váhy. Ve třicátých letech se objevily první dynamické mikrofony od firmy Western Eletronic. Byl to směrový typ 618A a všesměrový typ 630A, tyto mikrofony dovolovaly přenos signálu na dlouhých kabelážích beze ztráty kvality, jelikož měly nízkou impedanci. Kmitočtový rozsah všesměrového typu 630A byl 30-15000 Hz a na trh byl uveden v roce 1938.

Na konci dvacátých let spatřil světlo světa první páskový mikrofon, který funguje na totožném principu, a mluvíme tedy o speciálním typu dynamického mikrofonu. Membrána je zde tvořena tenkým kovovým páskem či fólií, která je vložena do magnetického pole. Naindukované napětí je potom přímo úměrné aktuální rychlosti membrány vytvořené příchozí zvukovou vlnou. Tyto mikrofony byly vytvořeny Harry Olsonem v dílnách RCA (konkurence Western Eletronic). Olson začal vyrábět páskové mikrofony s použitím elektromagnetů na konci dvacátých let a později začal využívat i permanentní magnety. První prototyp PB-31 představený veřejnosti v roce 1931 znamenal rozvoj v oblasti kvality zvuku. Tento prototyp značně převyšoval kvalitu zvuku kondenzátorových mikrofonů. První použití tohoto mikrofonu bylo v roce 1932 a ihned v tomto roce byl vyměněn velice úspěšným modelem 44A. Tento model byl oblíbeným hlavně z důvodu hebkého zvuku a býval používán pro nahrávání zpěváků. Model 44A využíval membránu o rozměrech 50 x 2,4 mm a vážil skoro 4 kg. Mikrofon se vyznačoval vysokou citlivostí, vysokou impedancí a osmičkovou směrovou charakteristikou. Dalším modelem byl směrový typ 77A uvedený v roce 1933 firmou RCA. Směrová charakteristika tohoto modelu připomínala převrácené srdce, a proto díky tomuto modelu máme označení kardioidní charakteristika. Tento model prošel inovací v roce 1937 na typ 77B, kdy v mikrofonu byl použit silnější magnet a to znamenalo větší citlivost mikrofonu. Právě tyto mikrofony a jejich modifikace jsou díky jejich vlastnostem používány pro záznam hlasu a zpěvu dodnes. Technologii páskových mikrofonů začala používat i firma Western Electronic představením silně směrového mikrofonu 639A. Tento prototyp byl vytvořen roku 1939 pány Marshalllem a Olsenem byl namontován ve Sněmovně reprezentantů Spojených států amerických, kde jsou velmi ztížené akustické podmínky a žádný jiný mikrofon nebyl schopen dostatečně zesílovat zvuk. Další typ 639B uvedený na trh roku 1941 obsahoval šesti polohový přepínač směrových charakteristik, konkrétně se jednalo o kulovou, kardioidní, osmičkovou a tři typy hyperkardioidních charakteristik.

Dalším druhem jsou mikrofony fungující na tzv. piezoelektrickém jevu, to znamená, že vstupní silou či deformací některých materiálů vzniká elektrické napětí. Tyto mikrofony se nejvíce využívaly v padesátých letech. Dnešní využití je už zcela minimální, ale používají se ke snímání vibrací jako kontaktní mikrofony. Další možné použití je pro aktivní potlačení hluku, kdy tenká piezoelektrická membrána mění svoji akustickou tuhost a tímto způsobem omezuje průchod zvukových vibrací. Toto použití je ovšem ještě nevyzkoušené a je ve formě experimentů.

Jedním z dalších druhů je elektretový mikrofon, to jest vlastně mikrofon kondenzátorový, který zahrnuje permanentně nabitou hmotu, takže není potřeba, aby mikrofon byl externě napájen. Ovšem elektretový mikrofon musí obsahovat aktivní předzesilovač, který musí být napájen. Tento typ se začal rozšiřovat v roce 1962 po vytvoření elektretu, což je dielektrická látka, která dokáže zachovat polarizaci i po zmizení vnějšího elektrického pole. V dnešní době se využívá v mobilních

telefonech, PC mikrofonech, ale i ve špičkových mikrofonech pro nejobtížnější profesionální úkoly. Nevýhodou elektretových mikrofonů je, že membrána má větší hmotnost než membrána kapacitního mikrofonu, což zapříčiní snížení účinnosti na vyšších frekvencích.

Nakonec bych zmínil, že existují i další různé technologie snímání zvuku, jmenoval bych například mikrofony s optickými vlákny, křemíkové MEMS či laserové mikrofony. Využití těchto mikrofonů v praxi je mizivé, někdy až zanedbatelné.

První zmínky o stereo nahrávkách se datují do období třicátých let, kdy v roce 1932 orchestr Duka Ellingtona nahrál dvě skladby ve stereu, ale tento zlom se odehrál čistě náhodou. Ve třicátých letech se vše nahrávalo naživo, takže se skladba ryla přímo na matrici, což byla gramofonová deska, do které se ryl záznam zvuku. Pro nedokonalost tohoto záznamu se skladby nahrávaly ještě na druhý záznamový přístroj. Uživatelé těchto nahrávek si o několik desítek let později všimli, že nahrávky jsou stejné, ale zní odlišně, a tak je spojili do jedné nahrávky a výsledkem byl první hudební stereo záznam. Stereo záznam se nejvíce začal v oblasti hudby rozšiřovat koncem padesátých let. V začátcích byly ovšem stereo nahrávky omezeny nejvíce záznamovou technikou tehdejší doby, kdy byly používány dvou až třístopé rekordéry. S použitím čtyř a více-stopých rekordérů se stereo záznam začal výrazně rozšiřovat do různých odvětví hudby, nejvíce v pop music. Čerpáno z [2], [3] a [4].

1.2 Elektronky

Datoval se rok 1880, když jeden z nejznámějších vynálezců tehdejší doby Thomas Alva Edison prováděl pokusy se žárovkou a téhož roku při jednom pokusu objevil, že se okolo rozžhaveného vlákna žárovky vytvořil oblak, který se postupně šířil vnitřní stěnou baňky a tuto baňku špinil. Tento jev nechal patentovat v roce 1883 a nazval jej jako tzv. Edisonův jev, který pojednával o tom, že v uzavřené baňce protéká z rozžhaveného vlákna elektrický proud, za podmínky naplnění baňky vakuem. Tyto vlákna byly tvořeny na uhlíkové bázi. O pár let později v roce 1904, když už bylo používáno wolframové žhavicí vlákno a uvnitř baňky bylo dokonalejší vakuum, se pokusil britský fyzik John Ambrose Fleming přidat do baňky vodivou destičku. Postup byl stejný jako u žárovky, nejprve byl z baňky vysát vzduch a poté se na destičku přivádělo napětí. Při těchto pokusech dokázal, že při dostatečně velkém kladném napětí přivedeném na destičku začíná tímto obvodem procházet elektrický proud. A to i přesto, že mezi vláknem a destičkou neexistovalo žádné vodivé spojení či prostředí. Tento jev vedení elektrického proudu ve vakuu byl vysvětlován pomocí nosičů náboje, zde to byly záporně nabitě elektrony. Postup elektronů tedy byl od záporně nabitě katody ke kladně nabitě anodě. Tento zlomový vynález, který obsahoval dvě elektrody, byl pojmenován diodou. Nejvíce se dioda používala při usměrňování střídavého proudu. O tento postup vedení proudu ve vakuu se zajímalo spousta vědců, ale úspěšným byl až Lee de Forest, který v roce 1907 nechal patentovat svůj vynález tzv. Audion. Jehož principem bylo vložení další elektrody v podobě drátěné mřížky mezi katodu a anodu. Elektrony přes tuto mřížku pronikaly a při zapojení napětí bylo možné regulovat proud elektronů mezi anodou a katodou. A tak světlo světa spatřila elektronka obsahující tři elektrody – trioda. Byl to první

zesilovací vynález, který znamenal obrovský pokrok pro oblast elektroniky, radiotechniky, výpočetní techniky, vysílací techniky a mnohých dalších odvětví.

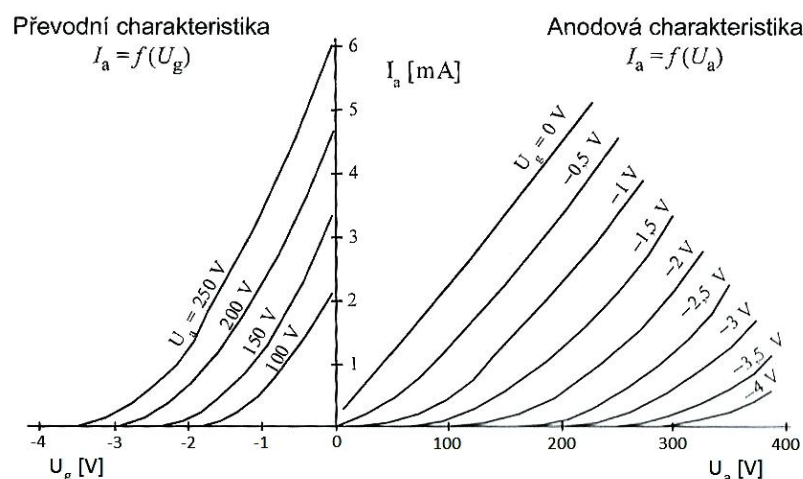
Elektronka byla jedinou součástí svého druhu, ovšem do roku 1948, kdy byl vynalezen tranzistor. V padesátých letech vynálezci používaly oba tyto objevy, až v polovině šedesátých let se začal přednostně využívat tranzistor na úkor elektronky. Využití elektronek začalo postupně upadat úplně ze všech přístrojů a na počátku osmdesátých let se elektronka přestala využívat i v jednom z posledních domácích přístrojů, ze sekce vysokého napětí barevného televizoru. A v dnešní době už se nenachází ani v obrazovkách počítačů a televizorů. V odvětvích hudby se ovšem elektronky stále používají a nedá se očekávat, že by se v dohledné době hned tak přestaly používat. Jako příklad můžeme uvést výkonovou triodu 300B, která byla vynalezena v roce 1935 firmou Western Electronic. Tato trioda se využívá ke konstrukcím zesilovačů pro hudební nástroje dodnes [5].

1.2.1 Značení elektronek

Od počátku výroby elektronek se elektronky označovaly různorodě, každý výrobce měl svůj typ označení. Tato různorodost se změnila rokem 1935, kdy se elektronky začaly více používat, a tak se evropské firmy Philips, Tungstram a Telefunken dohodly na jednotném značení. Od této doby měly elektronky jen značení americké, evropské a ruské, které bylo v azbuce. Typy značení a převodů lze nalézt v příslušné literatuře.[5]

1.2.2 Vlastnosti elektronek

Pro popis elektronek se využívá převodní a anodové charakteristiky. Na obr. 1 je v levém kvadrantu zobrazena převodní charakteristika - závislost anodového proudu I_a na mřížkovém napětí U_g pro anodové napětí U_a . V pravém kvadrantu je anodová charakteristika, což je závislost anodového proudu I_a na anodovém napětí U_a pro odlišné hodnoty mřížkového napětí U_g . [5]



Obr. 1: Převodní a anodová charakteristika elektronky [5].

Vlastnosti elektronek popisujeme pomocí diferenciálních vzorců pro pracovní bod:

Strmost S (anglicky slope, transkonduktance, nebo mutual conductance) vyjadřuje poměr změny anodového proudu ΔI_a ke změně napětí na mřížce ΔU_g při zachování konstantní hodnoty anodového napětí U_a a vyjadřuje se v jednotkách mA/V:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}. \quad (1)$$

Za splnění podmínky konstantního U_a .

Zesilovací činitel μ (angl. amplification factor) vyjadřuje poměr změny anodového napětí ΔU_a ke změně mřížkového napětí ΔU_g při zachování konstantní hodnoty anodového proudu I_a . Tato jednotka je bezrozměrná:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}. \quad (2)$$

Za splnění podmínky konstantního I_a .

Vnitřní odpor R_i (angl. plate impedance) nám vyjadřuje poměr změny anodového proudu ΔI_a ke změně anodového napětí ΔU_a při zachování konstantní hodnoty mřížkového napětí U_g a vyjadřuje se nejvíce v k Ω :

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, \quad (3)$$

za splnění podmínky konstantního U_g .

Průnik D (angl. penetration) vyjadřuje obrácenou hodnotu zesilovacího činitele:

$$D = \frac{1}{\mu}. \quad (4)$$

Mezi těmito parametry platí tzv. Barkhausenův vztah za předpokladu stejného

pracovního bodu u jednotlivých veličin:

$$S \cdot D \cdot R_i = 1. \quad (5)$$

Pracovní bod P určujeme pomocí hodnot U_a , I_a a U_g , které lze vyčíst z katalogových listů pro určitý typ elektronky, nebo je možné si některé hodnoty zvolit a zbylé si dopočítat. Pro námi zvolený pracovní bod dopočítáme anodový odpor vyjadřovaný v Ω :

$$R_a = \frac{U_a}{I_a}, \quad (6)$$

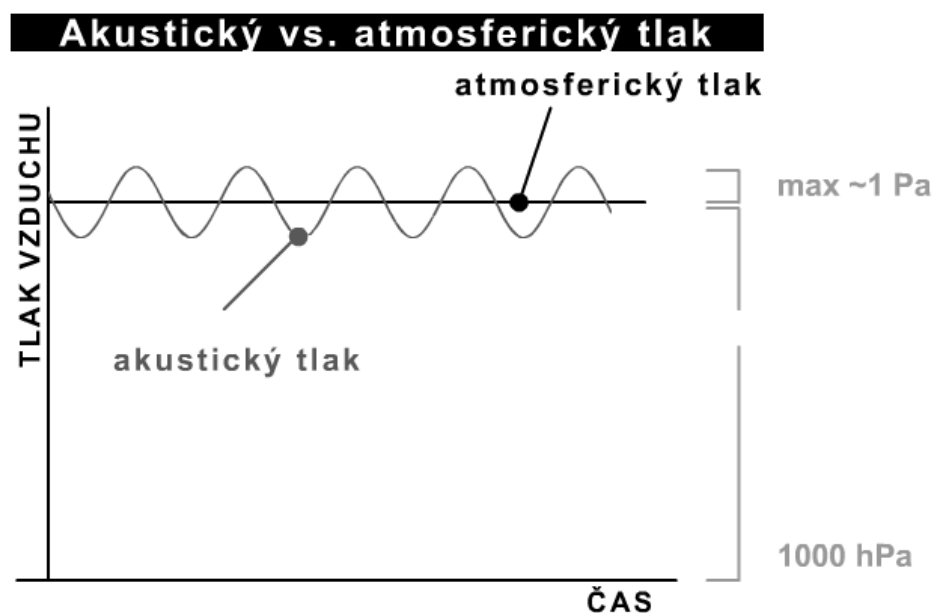
za splnění podmínky konstantního napětí na mřížce U_g .

2 MIKROFONY

2.1 Princip a základní rozdělení

Mikrofon obecně převádí akustickou energii na elektrickou veličinu. Podrobněji lze jeho funkci definovat tak, že akustický signál, který přivádíme na mikrofon, mění hladinu akustického tlaku a tím pohybuje s membránou, kterou sleduje adekvátní elektromechanický měnič. Když akustický tlak vychyluje membránu jen z jedné strany, tak se jedná o tlakové mikrofony. U tlakových mikrofonů záleží jen na akustickém tlaku, a proto výchylka membrány nezáleží ani na vzdálenosti a směru zdroje akustického signálu. Tlakové mikrofony se vykazují kulovou směrovou charakteristikou a nesměrovostí.

Další skupinou jsou mikrofony gradientní, zde je akustický signál přiveden před i za membránu. U gradientních mikrofonů vychýlení membrány nezáleží na akustickém tlaku, ale na diferenci akustického tlaku snímaného za a před membránou. Když je větší rozdíl těchto hodnot, tak je větší i vychýlení membrány a větší je i jeho gradient. U těchto mikrofonů záleží vychýlení membrány a výsledná elektrická veličina na derivaci akustického tlaku v určitém směru šíření. Rovná-li se vychýlení membrány derivaci prvního řádu, potom je to gradientní mikrofon prvního řádu. Gradientní mikrofony prvního řádu mají přízvisko rychlostní. U gradientních mikrofonů druhého řádu (akceleračních) vychýlení membrány záleží na druhé derivaci a u dalších řádů stejně. U gradientních mikrofonů velikost elektrického signálu závisí na zakřivení akustické vlnoplochy. I zde platí přímá úměra - při větším zakřivení je menší poloměr, zdroj akustického signálu je blíže, a tím pádem lze získat větší elektrický signál. Naopak pokud budeme uvažovat zdroj, který je ve velké vzdálenosti, takže bude vykazovat rovinnou vlnu, bude mít velký poloměr zakřivení a výsledný elektrický signál nulový. Tento typ mikrofonů se nejčastěji využívá pro studiové nahrávky a pro nahrávky v hlučných prostředích. Na obr. 2 je zobrazena změna akustického tlaku v čase [6].



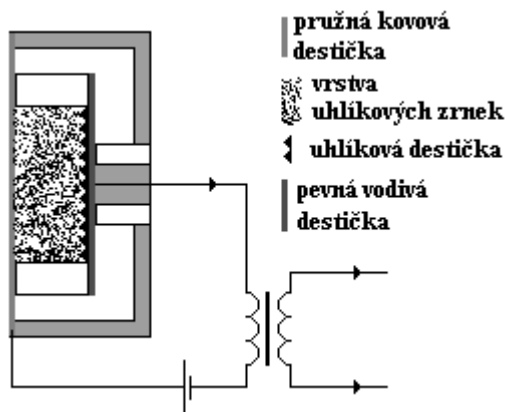
Obr. 2: Změny akustického tlaku v čase [7].

2.2 Druhy mikrofonů

Existuje ohromné množství kritérií, podle kterých lze rozlišovat mikrofony. Dle typu akustického snímání (tlakové, gradientní, vlnové), či podle druhu mechanického systému (membránové a bezmembránové) nebo podle směrových charakteristik. Mikrofony lze také dělit podle druhu využívaných elektromechanických měničů, které mohou být reciproké či nerekiproké. Mezi mikrofony využívající nerekiprokých měničů patří uhlíkové mikrofony. Do skupiny mikrofonů využívajících ke své funkci reciprokových měničů můžeme zařadit elektrodynamické, elektrostatické, elektromagnetické, piezoelektrické a magnetostrikční mikrofony. Reciproké mikrofony můžeme ještě rozvést na rychlostní, kde je elektrický signál závislý na výchylce membrány (elektromagnetické, magnetostrikční a elektrodynamické) a na výchylkové, které závisí na vychýlení membrány (piezoelektrické a elektrostatické) [6].

2.2.1 Uhlíkové mikrofony

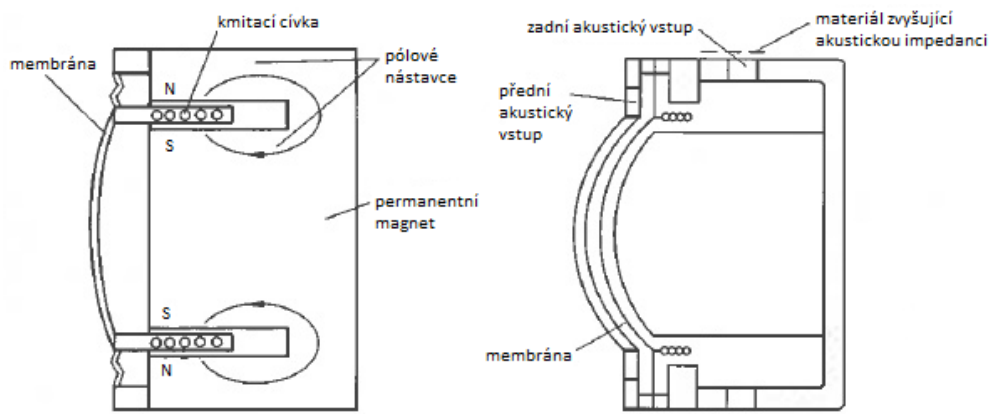
Princip odporového (uhlíkového) mikrofonu je ilustrován na obr. 3 a závisí na kolísání odporu uhlíkových zrněk, která jsou komprimována membránou. Tato vrstva zrněk je umístěna v pouzdru, ve kterém je na jednom konci pružná kovová membrána a na druhém uhlíková destička. Při připojení akustického signálu se membrána začne vychylovat, vrstva uhlíkových zrněk se začne stlačovat a při změnách tlaku se začíná měnit i odpor uhlíkové destičky. Tímto způsobem získáváme přes vinutí transformátoru modulovanou střídavou složku proudu pro nízké frekvence. Tento proud je ovšem proměnný a z toho důvodu bývá zesilován transformátorem. Uhlíkové mikrofony se vykazují velkou citlivostí, ale mají značný vlastní šum. Z toho důvodu jsou používány v přístrojích, kde nedbáme na kvalitu zvuku a požadované kmitočtové pásmo se nachází v rozsahu (200 - 4000 Hz).



Obr. 3: Princip uhlíkového mikrofonu [8].

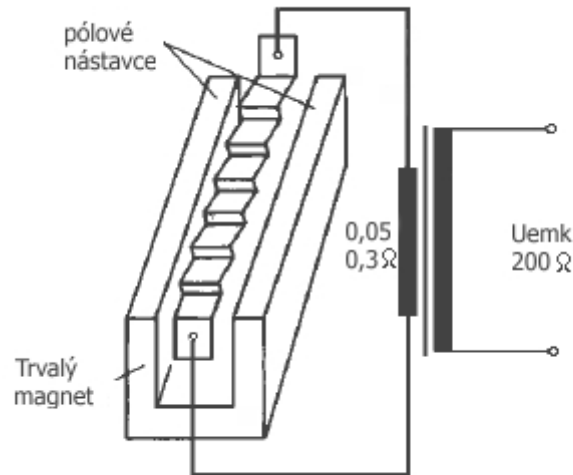
2.2.2 Elektrodynamické mikrofony

Princip funkčnosti elektrodynamických mikrofonů je znázorněn na obr. 4. Elektrodynamické mikrofony jsou velmi rozšířené a mohou se používat v poměrně širokém kmitočtovém pásmu, mají malé zkreslení, nízký šum a odolnou konstrukci. Jedná se o nízkoimpedanční mikrofony s frekvenčním rozsahem 30 Hz – 15 kHz. Elektrodynamické mikrofony dělíme na mikrofony obsahující membránu a na mikrofony bez membrány – tzv. páskové. Elektrodynamické mikrofony s membránou využívají ke své funkci kmitací cívku, která se při výchylkách akustického tlaku pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu. Při těchto pohybech se na cívce indukuje napětí přiměřené změnám akustického tlaku.



Obr. 4: Princip elektrodynamického mikrofonu s membránou a konstrukční provedení gradientního elektrodynamického mikrofonu [6].

Páskové mikrofony využívají namísto membrány zvlněný pásek z hliníku (viz obr. 5). Tento pásek je vložen do magnetického pole a pomocí výchylek akustického tlaku se na něm indukuje nízkofrekvenční elektrický signál. Páskové mikrofony mohou být realizovány v tlakovém provedení či gradientním provedení.



Obr. 5: Princip páskového mikrofonu [6].

2.2.3 Elektrostatické mikrofony

Asi každý si pod pojmem elektrostatické mikrofony představí kondenzátorové mikrofony, které ve skutečnosti fungují na principu kapacity. Mezi elektrostatické mikrofony je nutné zařadit i mikrofony elektretové. Kondenzátorové mikrofony, které jsou ilustrovány na obr. 6, obsahují dvě elektrody: jedna je pevná a druhá tvořena membránou v blízkosti první elektrody zhruba 20 – 30 μm. Na kondenzátor, který je tvořen z těchto dvou elektrod a jehož kapacita je v rozsahu 30 – 100 pF je přiloženo polarizované napětí, které obvykle bývá v rozmezí 30 – 200 V. Kapacita mikrofonu je dána vztahem:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} [F], \quad (7)$$

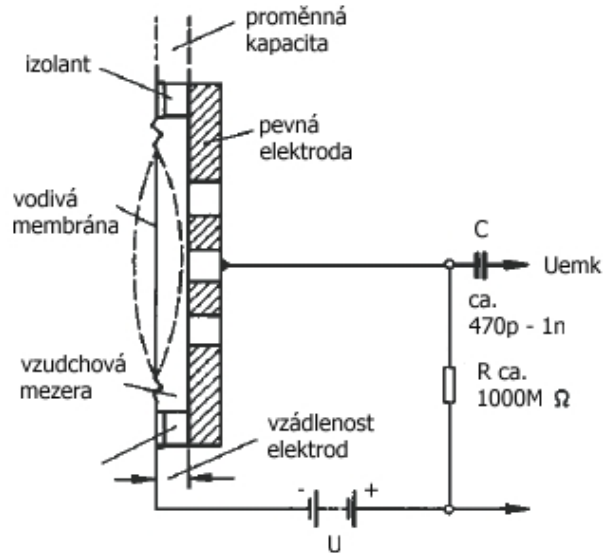
kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r je permitivita dielektrika, S je plocha elektrod kondenzátoru a d je vzdálenost elektrod. Náboj na kondenzátoru lze vypočítat rovnicí:

$$Q = C \cdot U [C], \quad (8)$$

odkud U je polarizované napětí. Při změně akustického tlaku se membrána začne vychylovat, a tak se mění vzdálenost elektrod kondenzátoru d a mění se i kapacita kondenzátoru. Při zajištění konstantní velikosti náboje lze vyvodit, že zmenšením kapacity kondenzátoru dojde k zvýšení příslušného napětí. Toto ošetření se provádí přidáním rezistoru o velikosti odporu R , který zvětší hodnotu vnitřního odporu ve zdroji polarizovaného napětí. Velikost odporu R lze určit vzorcem:

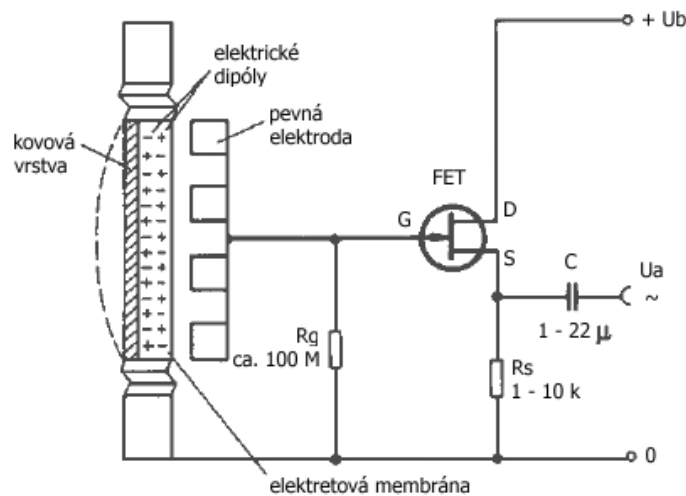
$$R \geq \frac{1}{2\pi \cdot f_d \cdot C} [\Omega], \quad (9)$$

kde f_d vyjadřuje požadovaný nejnižší přenášený kmitočet.



Obr. 6: Princip elektrostatického mikrofonu [6].

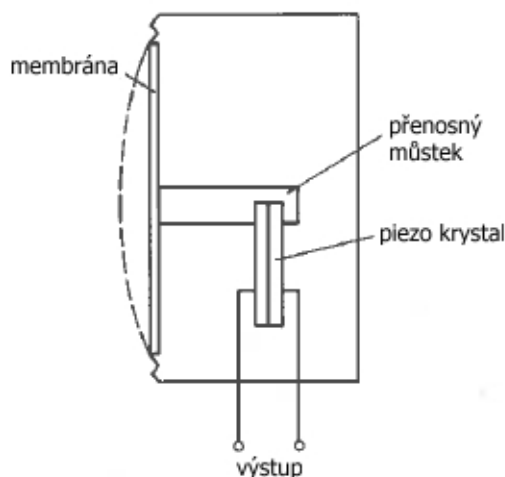
Obr. 7 znázorňuje elektrostatické elektretové mikrofony, které pracují na stejném principu jako elektrostatické kondenzátorové mikrofony, ovšem rozdíl je v tom, že jedna z jeho elektrod je tvořena pomocí vrstvy elektretu. Elektret je dielektrický materiál, který má tu vlastnost, že obsahuje permanentní elektrický náboj. U těchto typů mikrofonů není potřeba připojit polarizovaný zdroj napětí.



Obr. 7: Princip elektrostatického elektretového mikrofonu [6].

2.2.4 Piezoelektrické mikrofony

Piezoelektrické mikrofony, ilustrovány na obr. 8, využívají ke své činnosti krystaly, které při mechanické deformaci vytvářejí elektrický náboj (zobrazeno na obr. 8). Nepotřebují žádný vnější zdroj energie a mohou dodávat velké výstupní napětí. Kmitočtový rozsah mají od 60 Hz – 10 kHz, vyznačují se velkou impedancí a mají citlivost 1 – 3 mV/Pa.



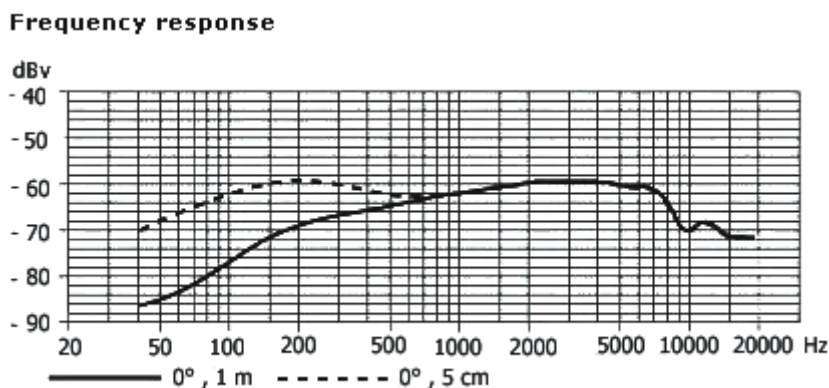
Obr. 8: Princip piezoelektrického mikrofону [6].

2.2.5 Speciální mikrofony

- **Modulové mikrofonní systémy:** Tyto mikrofony umožňují výměnu mikrofonních vložek. Jsou konstruovány z napájení a rukojeti, do které lze vkládat mikrofonní vložky s odlišnými směrovými charakteristikami.
- **Klopové mikrofony:** Z důvodu, že se tento druh mikrofónů připevňuje na klopku řečnicka, vzniklo pojmenování klopové mikrofony. Připevněním klopového mikrofónu se může řečnicka volně pohybovat po místnosti, jelikož mikrofón je udržován ve stejné vzdálenosti od úst řečnicka po celou dobu jeho projevu.
- **Mikrofony se zvukovodem:** Tento druh mikrofónů se využívá nejvíce ve filmech a televizních pořadech. Využívají se tam, kde jsou klasické mikrofony příliš rušeny, nebo na místech se špatným dosahem k zdroji zvuku.
- **Mikrofony s parabolickým zrcadlem:** Jsou používány především k snímání zvuků zvířat a pro další specifická odvětví. Obsahují parabolická nebo kulová zrcadla, v jejichž ohniscích jsou umístěovány mikrofony a tím vykazují velmi vysoký směrový účinek.
- **Mikrofony s měřicí sondou:** Vytvářejí se v provedení sondy, např. o délce 30 cm a průměru 8 mm. Používají se v těžko dosažitelných místech, kde je potřeba bodového měření.
- **Bezdrátové mikrofony:** Namísto propojení kabelem, je zde signál přenášen pomocí infračerveného záření nebo rádiovými vlnami.

2.3 Frekvenční charakteristika

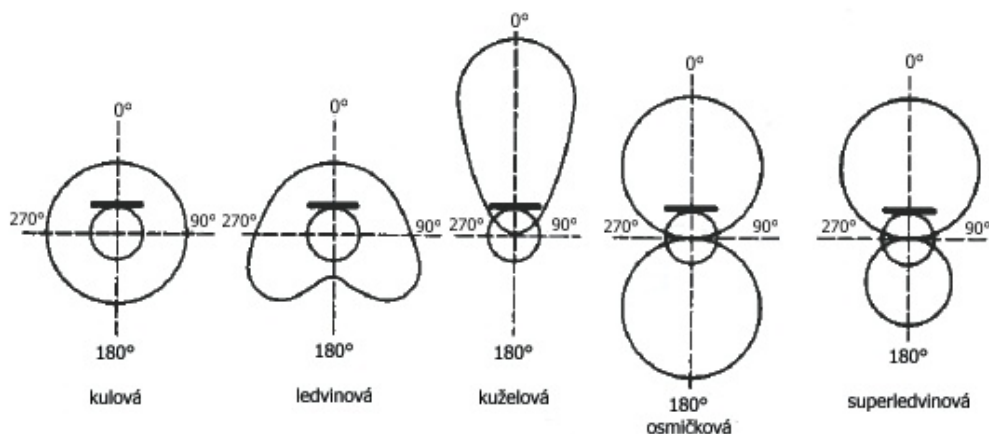
Je to grafické vyjádření výstupního napětí v dB pro různé frekvence v celém slyšitelném pásmu (20 Hz – 20 kHz) za podmínky ustálené hladiny akustického tlaku. Na obr. 9 lze spatřit příklad frekvenční charakteristiky reálného mikrofonu.



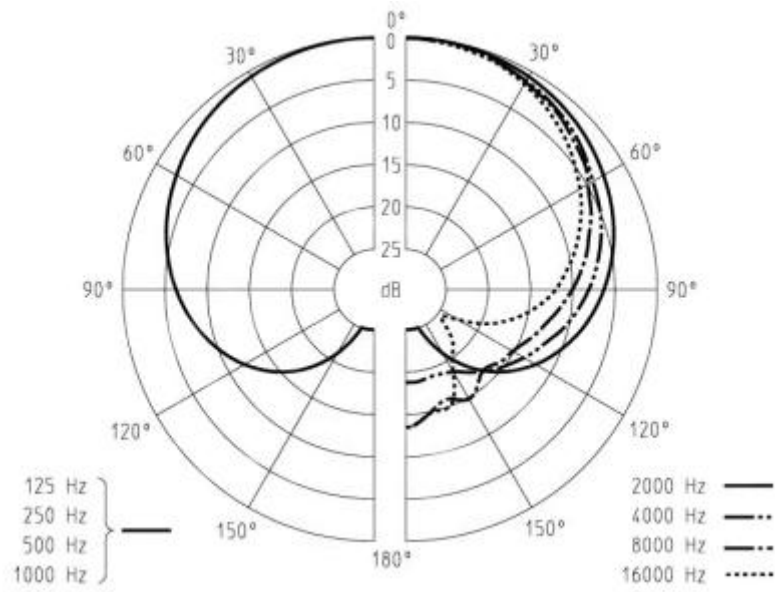
Obr. 9: Frekvenční charakteristika mikrofonu.

2.4 Směrová charakteristika

Je graficky vyjádřená závislost citlivosti mikrofonu na úhlu, který je svírá akustickou osou mikrofonu s akustickou osou zdroje (viz obr. 10). Na obr. 11 je názorně ilustrováno, že tvar směrové charakteristiky je také závislý na kmitočtu vstupního signálu.



Obr. 10: Směrové charakteristiky mikrofonů [6].



Obr. 11: Směrová charakteristika mikrofonu pro různé frekvence [6].

3 NÁVRH MIKROFONU

Následující část pojednává o návrhu elektronického mikrofonu. Jsou zde uvedeny a blíže popsány všechny uskutečněné kroky potřebné k realizaci mikrofonního předzesilovače, který zesiluje vstupní signál v řádech jednotek až desítek mV na výstupní signál o velikosti stovek mV. Největším problémem je zajištění dostatečně velkého odstupů signálu od šumu. V mikrofonních předzesilovačích musí být ošetření malého vlastního šumu, z důvodu dosažení velkého poměru signál/šum. Vlastní šum zesilovače určuje šum aktivních a pasivních součástek, z tohoto důvodu jsou používány kvalitní součástky s nízkým šumem.

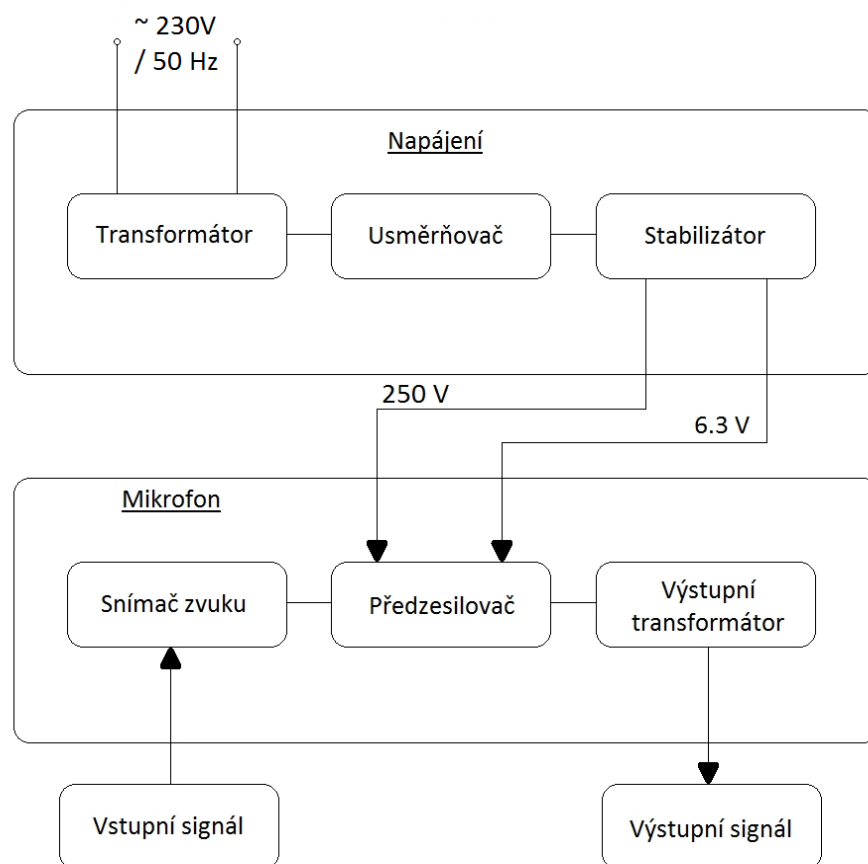
3.1 Blokové schéma

Blokové schéma navrženého mikrofonu je zobrazeno na obr. 12. Jak již bylo řečeno, předmětem této práce je návrh elektronicky kondenzátorového mikrofonu obsahující elektronku ECC81 v předzesilovací části. Z obr. 12 je patrné, že finální návrh lze rozdělit do dvou částí.

První část slouží k napájení celého mikrofonu a obsahuje toroidní transformátor. Střídavé napětí tohoto transformátoru je dále usměrněno přes usměrňovací můstek, vyfiltrováno kondenzátory a stabilizováno na požadovanou hodnotu.

Druhou částí je návrh samotného mikrofonního předzesilovače. Hlas zpěváka, moderátora či jiný zdroj zvuku je snímán mikrofonní vložkou, která vytváří signál střídavého napětí procházející na zesilovací člen, v tomto případě elektronku. Po průchodu elektronkou je signál zesílen nízkofrekvenčním audio transformátorem na požadovaný výstupní symetrický signál.

Funkce a návrhy jednotlivých částí navrženého celku jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 12: Blokové schéma navrženého mikrofonního systému.

3.2 Transformátor

Elektronkový mikrofon potřebuje pro své použití alespoň dva transformátory a to především výstupní transformátor, ze kterého je výsledný výstupní akustický signál snímán a síťový transformátor pro napájení anodového a žhavicího napětí.

3.2.1 Síťový transformátor – návrh

Zvolení správného transformátoru určuje několik podmínek. Materiál jádra musí být magneticky měkký, odpor materiálu musí mít co největší hodnotu, hysterezní smyčka musí být úzká a vysoká, z důvodu velkého sycení. Nejlepší magnetické vlastnosti vykazují válcované plechy, ze kterých jsou vyráběny rozříznutím jádra C, nebo nedělená toroidní jádra. Volíme síťový transformátor s Q- jádrem (dvojitě C jádro) v impregnovaném provedení. Všechny použité vzorce a výpočty pro návrh transformátoru jsou převzaty z návrhu transformátoru.

Žádaná sekundární vinutí:

- $U_{21} = 180 \text{ V}$ $I_{21} = 20 \text{ mA}$
- $U_{22} = 9 \text{ V}$ $I_{22} = 300 \text{ mA}$

Výpočet:

Zdánlivý výkon:

$$P_z = (U_{21\text{ef}} \cdot I_{21\text{ef}}) + (U_{22\text{ef}} \cdot I_{22\text{ef}}) = (180 \cdot 0,02) + (9 \cdot 0,3) = 6,3 \text{ VA} . \quad (10)$$

Změna zdánlivého výkonu P_z vlivem provozní teploty je uvedena v tab. 1, zvolené maximální oteplení okolí je 40°C .

Tab. 1: Změna maxima přeneseného výkonu transformátorem v závislosti na teplotě okolí

ϑ_s [$^\circ\text{C}$]	25	40	45	50	55	60	65	70
ΔP [%]	14	0	-7	-13	-20	-27	-33	-40

$$P_z' = P_z + (\Delta p \cdot P_z) = 6,3 + (0 \cdot 6,3) = 6,3 \text{ VA} . \quad (11)$$

Pro správné napájení elektronového mikrofonu je nezbytné zvolit jádro s výkonem vyšším než 6,3 VA, kvůli optimálnímu činiteli plnění okna, zaplnění by se mělo pohybovat mezi 50 – 80%. Zbývající plocha je využita k izolaci mezi vinutími a pro kostru jádra.

Pro impregnované provedení vypočteme dovolené oteplení podle tab. 2.

Tab. 2: Tepelné třídy normalizovaných izolací

Třída izolace	Y	A	E	B	F	H	200	220
Max. teplota na povrchu vinutí [$^\circ\text{C}$]	80	95	110	115	140	160	180	200
Max. teplota vinutí [$^\circ\text{C}$]	90	105	120	130	155	180	200	220

$$\Delta \vartheta = \vartheta_{\text{max}} - \vartheta_s = 120 - 40 = 80^\circ\text{C} . \quad (12)$$

Dalším krokem je pro vypočtené oteplení a přenesený výkon vybrat vhodné jádro, ovšem už v této části nebylo nalezeno vhodné jádro, muselo by být vybráno jádro s podstatně vyšším výkonem, takže by dost podstatně klesla účinnost a kvalita transformátoru. Proto byl vybrán transformátor, který má podobné parametry a je již zkonstruován.

Z výše uvedených důvodů byl vybrán toroidní transformátor z nabídky firmy TME (Transfer Multisort Elektronik) s parametry uvedenými v tab. 3.

Tab. 3: Parametry zvoleného transformátoru

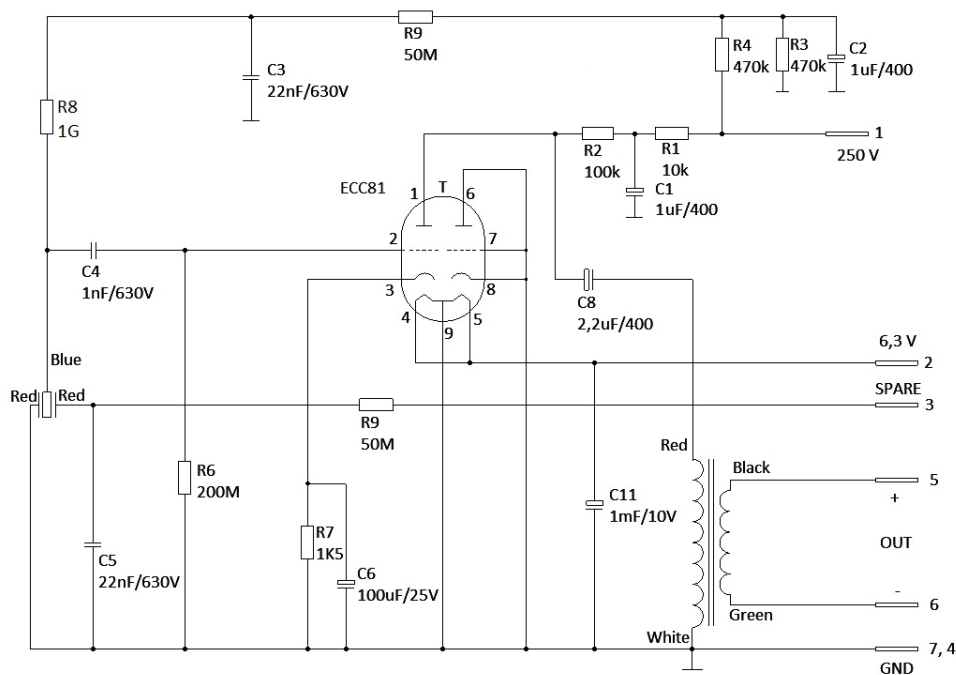
Výkon $P= 15 \text{ VA}$	
$U_{21} = 200 \text{ V}$	$I_{21}= 30 \text{ mA}$
$U_{22} = 9 \text{ V}$	$I_{22}= 1,1 \text{ A}$

3.2.2 Výstupní transformátor

V nízkofrekvenčních obvodech, kde jsou využívány elektronky, je velmi důležité použití výstupního transformátoru, pomocí kterého se přizpůsobuje vysoká impedance anodového obvodu mikrofону k nízké impedanci dalšího článku přenosového řetězce. Z výstupního transformátoru je odebrán výsledný symetrický signál mikrofону. Důležitým parametrem výstupního transformátoru je převodní poměr, který nám určuje úroveň výsledného napětí a také výslednou impedanci. Dále je nutné dodržet žádanou přenosovou frekvenční charakteristiku. Návrh výstupních transformátorů je velice obtížný a je zde potřeba dodržet mnoho parametrů. Samotný návrh výstupního transformátoru je okrajově popsán v [5] a podrobněji v [9].

3.3 Mikrofon

Obvodové zapojení je zobrazeno na obr. 13. Mikrofon je tvořen elektronkou ECC81. Katalogové údaje elektronky jsou popsány v [5].

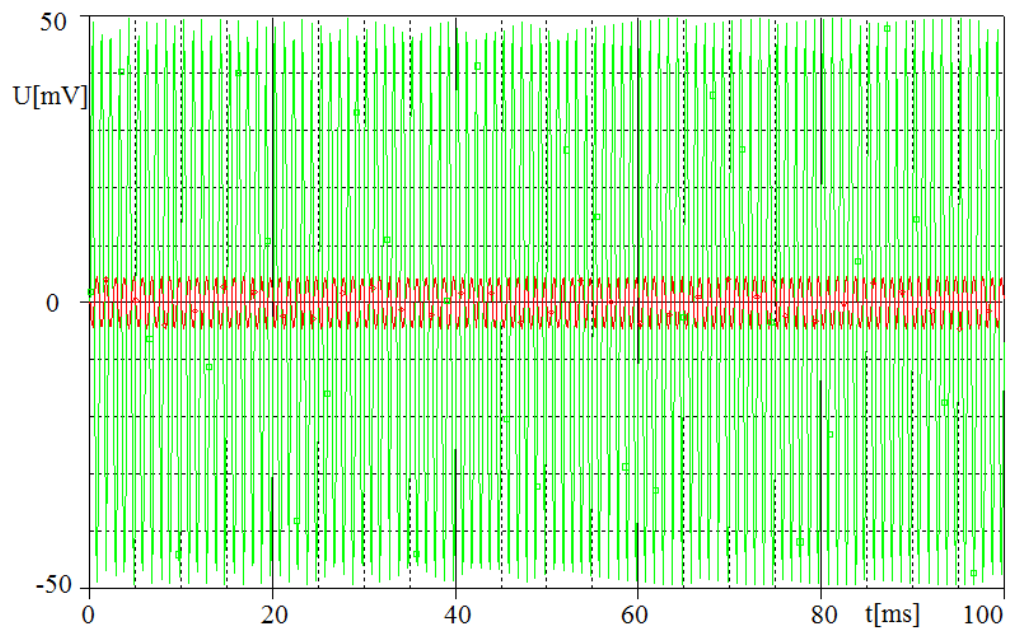


Obr. 13: Schéma zapojení mikrofону.

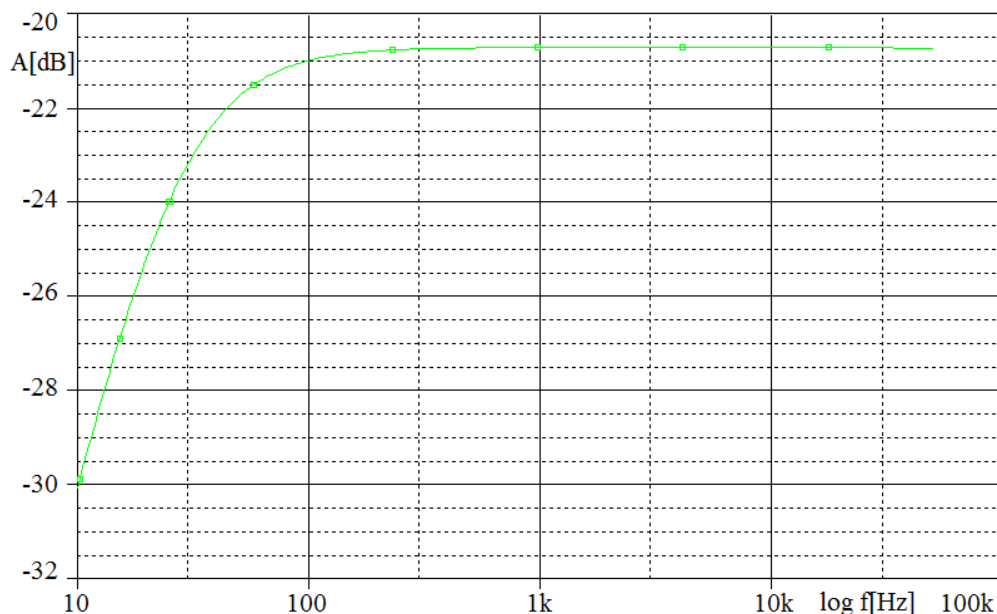
Pro návrh mikrofону byla využita elektronka ECC81, která má při anodovém napájení 250 V zesílení $\mu=60$. Odpor R1 slouží jako srážecí odpor ve zdroji. Odpor R2 a R7 jsou odpory, které nastavují pracovní bod dvojitě triody ECC81. Odpor R2 nastavuje velikost anodového proudu, který vypočteme pomocí Ohmova zákona, takže anodový proud je 2,5 mA. Odporový dělič R3 a R4 rozděluje anodové napětí na dvě poloviny. Dvojice R5, C3 a dvojice R9, C5 slouží jako kompenzace mikrofonní vložky, je nutné dodržet mezní frekvenci integračního členu. Obrovský odpor R8 je zde pro zmenšení proudu, který teče na mřížku elektronky. Dvojice R6, C4 je v obvodu pro zachování tvaru a zvětšení velikosti vstupního signálu, při snížení odporu R6 a zvýšení C4 má signál menší úroveň a jeho průběh není ideální, tyto poznatky byly odsimulovány a rozmítány v programu Pspice. Hodnoty anodového napětí a napětí žhavení je důležité nastavit co nejpřesněji z důvodu životnosti elektronky a pro dosažení hodnot zesilovače ve třídě A.

3.3.1 Simulace v programu Pspice

Navržené části mikrofónu byly simulovány pro ověření funkčnosti v programu Pspice. Níže, na obr. 14, je uveden průběh symetrického výstupního napětí snímaného z výstupního transformátoru a průběh budícího signálu na vstupu simulujícího zpěv, či hlas řečníka. Na obr. 15 je vyobrazena simulace frekvenční charakteristiky mikrofónu, závislosti výstupního napětí na kmitočtu.



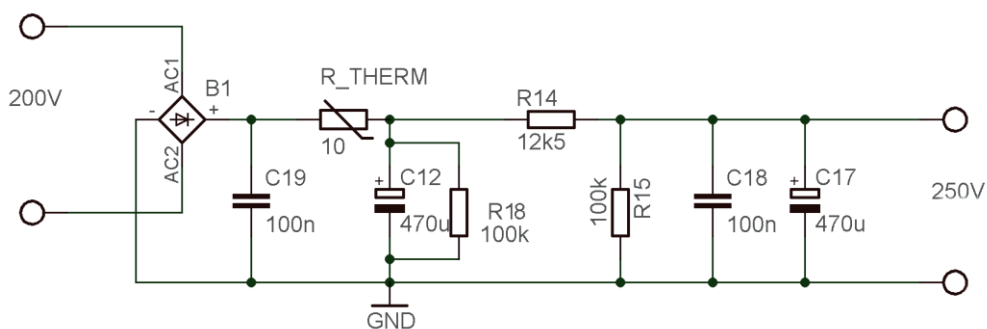
Obr. 14: Simulace výstupního (červená) a vstupního (zelená) signálu.



Obr. 15: Simulace frekvenční charakteristiky mikrofonu.

3.4 Anodové napájení

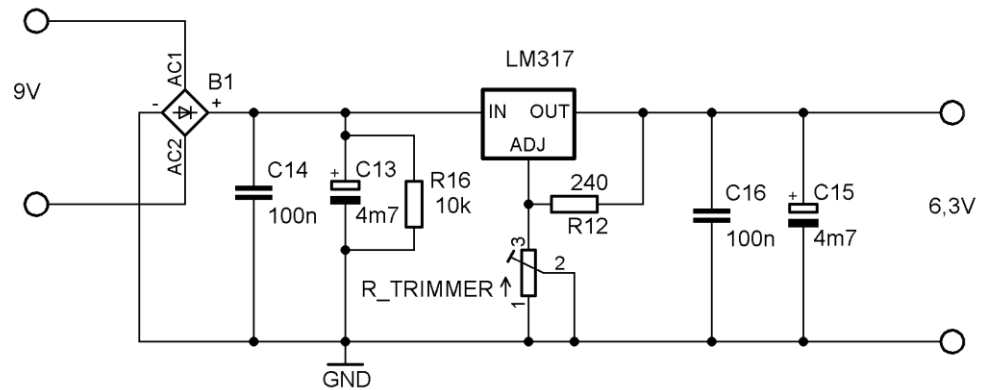
Schéma anodového napájení je zobrazeno na obr. 16. Velikost anodového napájení je 250V. V zapojení za můstkovým usměrňovačem je umístěn NTC termistor, který je v obvodu použit z důvodu ochrany vláken elektronky. NTC termistoru (negastor), označený ve schématu jako R_THERM je součástka s negativním teplotním koeficientem, takže hodnota odporu s rostoucí teplotou klesá. Pomocí tohoto jevu je tlumen protékající proud obvodem, tudíž dochází k rovnoměrnému prohřátí všech vláken elektronky. Toto opatření je zde kvůli prodloužení životnosti elektronky. Pokud by tento prvek nebyl vložen do obvodu, došlo by ke zvýšení pravděpodobnosti přepálení některého z vláken elektronky a jejího zničení. Dále je napětí vyfiltrováno a pomocí odporového děliče nastaveno na hodnotu 250 V.



Obr. 16: Schéma zapojení anodového napájení.

3.5 Napájení žhavení

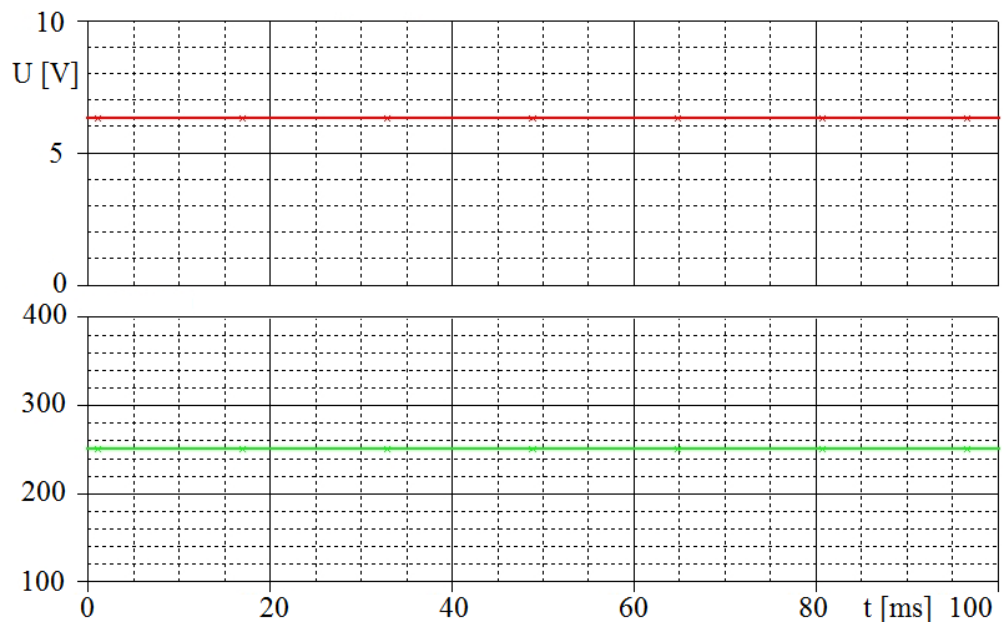
Na obr. 17, napětí po usměrnění diodovým můstkem vstupuje do stabilizátoru LM317, kde je pomocí trimeru (hodnota 1 k Ω) přesně doladěno na hodnotu 6,3 V. Maximální vychýlení žhavicího napětí by nemělo přesáhnout hranici $\pm 5\%$. Podžhavení či přezhavení značně snižuje životnost elektronky, proto je z důvodu životnosti nutné dodržet katalogovou hodnotu [5], [10].



Obr. 17: Schéma žhavicího napětí.

3.5.1 Simulace v programu Pspice pro anodové a žhavicí napětí

Navržené anodové a žhavicí napájení byly odsimulovány v programu Pspice. Na obr. 18 jsou zobrazeny napěťové průběhy výstupních požadovaných hodnot.



Obr. 18: Simulace napěťové úrovně anodového (dole) a žhavicího (nahore) napětí.

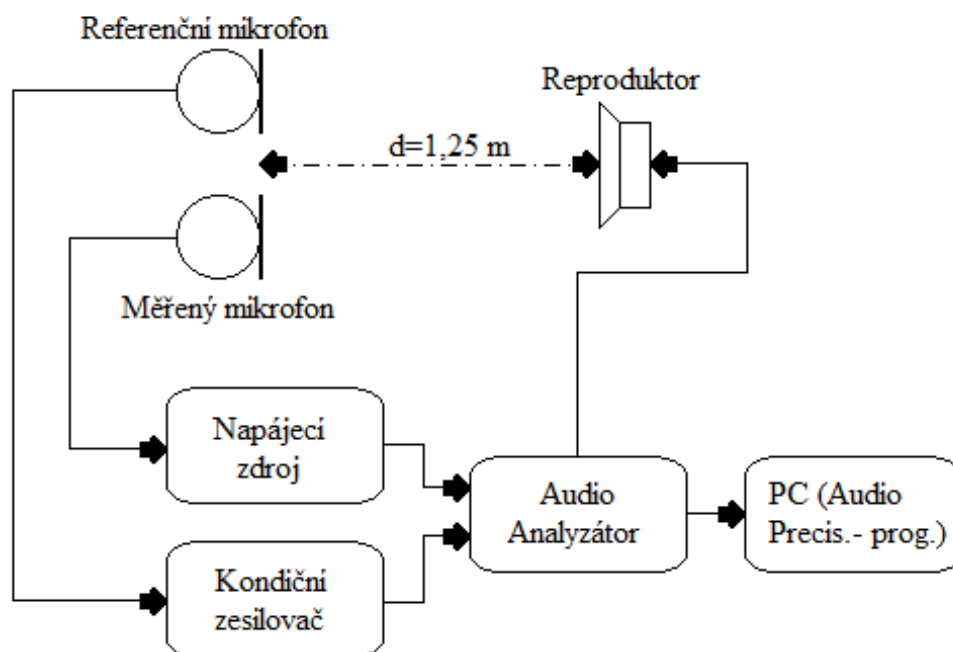
4 MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ

Měření probíhalo pomocí kombinací srovnávací a substituční metody, kdy byl použit k měření kromě neznámého mikrofonu i známý referenční mikrofon. Pomocí tohoto typu měření obou mikrofonů zároveň je omezeno množství chyb, které by zapříčinil okolní hluk. Ovšem referenční mikrofon musí mít vyrovnanou frekvenční charakteristiku a hlavně velkou stabilitu. Měření probíhalo v bezodrazové komoře, takže by okolní hluk prakticky neměl být žádný. Kritický kmitočet bezodrazové komory byl 100 Hz, což způsobuje nerovnoměrné rozložení pole pod kritický kmitočet, a tím jsou výsledky získané pro frekvence nižší než 100 Hz neprůkazné.

4.1 Blokové schéma

Blokové schéma měřicího pracoviště je zobrazeno na obr. 19. Obsahuje kromě vyrobeného mikrofonu i referenční mikrofon, budící reproduktor, napájení vyrobeného mikrofonu, kondiční zesilovač, audio analyzátor a počítač, ve kterém je software pro zobrazení a ovládání měřicího pracoviště. Všechny použité komponenty jsou detailněji popsány v následujících částech práce.

Vzdálenost mezi oběma mikrofony a reproduktorem je 1,25 m. Měřený a referenční mikrofon byl umístěn na otočnou podložku, aby bylo možné změřit směrové charakteristiky mikrofonu.



Obr. 19: Blokové schéma měřicího pracoviště.

4.1.1 Referenční mikrofon Brüel & Kjær 4189

Jako referenční mikrofon byl použit předpolarizovaný 1/2" mikrofon 4189-B-001 s předzesilovačem stejného typu 2669-B. Důležité je, aby tento mikrofon měl co nejlepší stabilitu a vyrovnanou frekvenční charakteristiku v co možná nejširším frekvenčním pásmu. Mikrofon je spolu s předzesilovačem zobrazen na obr. 20 a parametry mikrofonu jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4: Vlastnosti mikrofonu Brüel & Kjær 4189-B-001

Citlivost mikrofonu:	50 mV/Pa
Frekvenční rozsah:	6,3 Hz - 20 kHz
Dynamický rozsah:	14,6 - 146 dB
Polarizační napětí:	0 V



Obr. 20: Kondenzátorový mikrofon B & K 4189 s předzesilovačem B & K 2669 [11].

4.1.2 Reprobox Event TR8

Dvoupásmová aktivní bi-amp soustava je nejčastěji využívána jako studiový monitor pro blízký poslech, nebo součást domácího kina. Zkratka TR nebo-li "Tuned Reference" znamená, že výhybka je naladěna tak, aby byl zajištěn v celém slyšitelném pásmu 20 Hz – 20 kHz co nejstabilnější přenos. Tato reproduktorová soustava obsahuje 8" basový a 1,5" kalotový výškový reproduktor. Frekvenční rozsah udávaný výrobcem je 35 Hz – 20 kHz, při toleranci <3 dB. Maximální hladina akustického tlaku reproduktorové soustavy TR8 je 108 dB. Reproduktorová soustava je zobrazena na obr. 21 [12].



Obr. 21: Reprobox Event Tuned Reference 8 [12].

4.1.3 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj anodového a žhavicího napětí je zobrazen na obr 22. Tento zdroj obsahuje také 7- pinový konektor pro připojení reproduktoru a 3- pinový konektor výstupního signálu. Jeho návrh a parametry jsou popsány ve výše uvedených částech. Napájecí zdroj splňuje veškeré požadavky, které byly předpokládány a odsimulovány v programu Pspice. Na prvním pinu 7- pinového konektoru je připojeno anodové napětí 250 V, na druhém pinu žhavicí napětí 6,3 V, na třetím, čtvrtém a sedmém pinu je připojena zem a z pátého a šestého pinu je odebrán výstupní signál mikrofonu, který je propojen na druhý a třetí pin 3-pinového konektoru. První pin je připojen na zem.



Obr. 22: Zdroj anodového a žhavicího napětí.

4.1.4 Kondiční zesilovač

Kondiční zesilovač, zobrazený na obr. 23, zlepšuje výkonnost a spolehlivost měřeného systému (v tomto případě mikrofonu). Každý kondiční zesilovač zahrnuje hardware pro úpravu signálů, který funguje jako rozhraní mezi neznámými signály a korekčními křivkami pro kalibraci mikrofonu. Kondiční zesilovač dodává mikrofonu dostatečné zesílení, vyrábí pro něj napájecí a polarizační napětí, čte elektronická data z mikrofonu, obsahuje širokou škálu filtrů na vyhlazení signálu a obsahuje data o citlivosti mikrofonu pro kalibraci. Kondiční zesilovač je velmi flexibilní, je možno si jej nastavit podle potřeb a ulehčit si měření. Může mít nastaveny akustické a vibrační vstupy ve stejném rozhraní s jedním až čtyřmi nezávislými vstupními kanály. Je velice nízkošumový a může být napájen i z baterií, takže umožňuje měření v laboratoři i v terénu. Obsahuje sériové rozhraní RS-232, takže snadno komunikuje s počítačem [11].



Obr. 23: Kondiční zesilovač Brüel & Kjaer NEXUS [11].

4.1.5 Audio analyzátor APx525

Na obr. 24 je zobrazen Audio analyzátor APx525, který obsahuje dva vyvážené a dva nevyvážené vstupní a výstupní kanály, dva digitální sériové vstupy a výstupy, specifikace pro PDM komunikaci, dále HDMI vstupy a výstupy pro zobrazení na monitor a anténu pro bluetooth komunikaci. Nové technologie umožňují přístrojům APx generovat signály stále o nižších hodnotách frekvence už od 0,1 Hz. Maximální vstupní napětí je 300 V_{ef} pro symetrický signál a 160 V_{rms} pro nesymetrický. Hodnota zkreslení THD+N je -108 dB (při 1 kHz a napětí 2,5 V). Tato vlastnost je největší plus analyzátoru APx525, protože na trhu není žádný analyzátor ve střední cenové kategorii, který by dokázal dosáhnout této úrovně výkonu. Tento přístroj je vhodný pro vědecké účely, protože veškerá nastavení jsou uložena v jednom souboru, tudíž je možné zopakovat stejné nastavení všech hodnot a měřené objekty vyzkoušet kdekoliv na světě. APX dokáže vygenerovat graficky kvalitní výstupní informace a je také možné si výsledky exportovat do datových formátů jako *.pdf, *.xls či *.txt [13].



Obr. 24: Audio analyzátor Audio Precision [13].

4.1.6 PC – Audio Precision software

Měřeno bylo pomocí programu firmy Audio Precision APx500 v.34. Program je plně kompatibilní se zmíněným audio analyzátozem a je součástí tohoto produktu. Uživatelské rozhraní je velice jednoduché na ovládání a většina měření se po správně nastavených parametrech vykoná pouze pomocí jednoho kliknutí myši. Tento program vykonává veškeré operace s velkou rychlostí a přesně [13].

5 VYROBENÝ MIKROFON

Mikrofon byl vyroben podle předloženého návrhu. Jediná změna oproti původnímu designu je náhrada elektretové mikrofonní vložky za původní membránovou vložku, a to zejména z důvodu dostupnosti a ceny. Z tohoto důvodu je zřejmé, že mikrofon nebude dosahovat všech hodnot a předpokladů. Ovšem i přes tuto změnu bylo dosaženo uspokojivých výsledků, přestože rozdíl v kvalitě těchto vložek je markantní a značně se liší i cenou. Dále bylo nutno vyrobit šasi mikrofonu, veškeré vnitřní plíšky, držáky na konektory a desku plošného spoje. Dále byla realizována konstrukce pro napájecí zdroj a 7 -pinový kabel k propojení mikrofonu a napájení. Všechny konstrukce, ať už mikrofonu či napájení, byly vyrobeny z hliníku. Vnitřní uspořádání mikrofonu je zobrazeno na obr. 25. Mikrofon včetně veškerého příslušenství k jeho měření a používání je zobrazen na obr 26. Změřené hodnoty citlivosti, impedance mikrofonu, odstupu signálu od šumu, hodnoty zkreslení a hladiny šumu mikrofonu jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 25: Vnitřní uspořádání mikrofonní části bez krytu



Obr. 26: Vyrobený mikrofonní systém

Tab. 5: Naměřené hodnoty mikrofonu

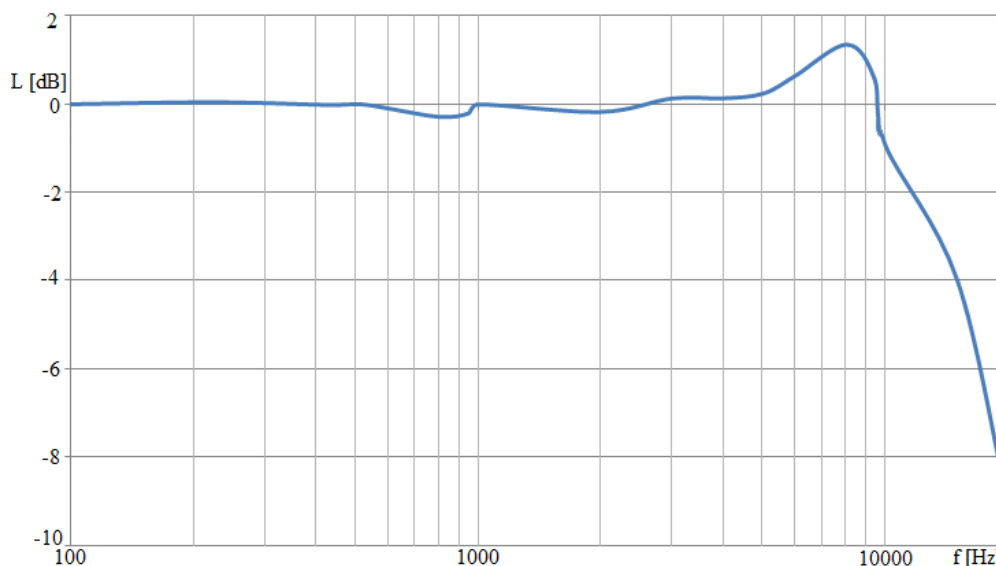
Citlivost mikrofonu:	41,83 mV/Pa
Impedance mikrofonu:	200 Ω
Odstup signálu od šumu:	46,61 dB
<i>THD</i> :	0,68%
<i>THD+N</i> :	0,78%
Hladina šumu:	24,85 μ V

5.1 Frekvenční charakteristika

Změřená frekvenční charakteristika zobrazená na obr. 27 byla vynesena v logaritmickém měřítku pro normalizované hodnoty při natočení 0° a úrovni 0 dB na frekvenci 1 kHz. Průběh frekvenční charakteristiky navrženého mikrofonu vychází v podobných hodnotách, které byly předpokládány a odsimulovány v programu Pspice. Zvlnění frekvenční charakteristiky v kmitočtovém pásmu (100 - 15000 Hz) by nemělo pro kvalitní záznam přesáhnout hodnotu ± 5 dB, což je dle změřené frekvenční charakteristiky vyrobeného mikrofonu splněno. Informativní tabulka 10 hodnot frekvenční charakteristiky je uvedena v tab. 6.

Tab. 6: Stručná tabulka frekvenční charakteristiky

f [Hz]	100	500	800	1000	2000	5000	8000	10000	15000	20000
L [dB]	0,004	-0,003	-0,283	0,000	-0,171	0,247	1,358	-0,933	-3,981	-9,055



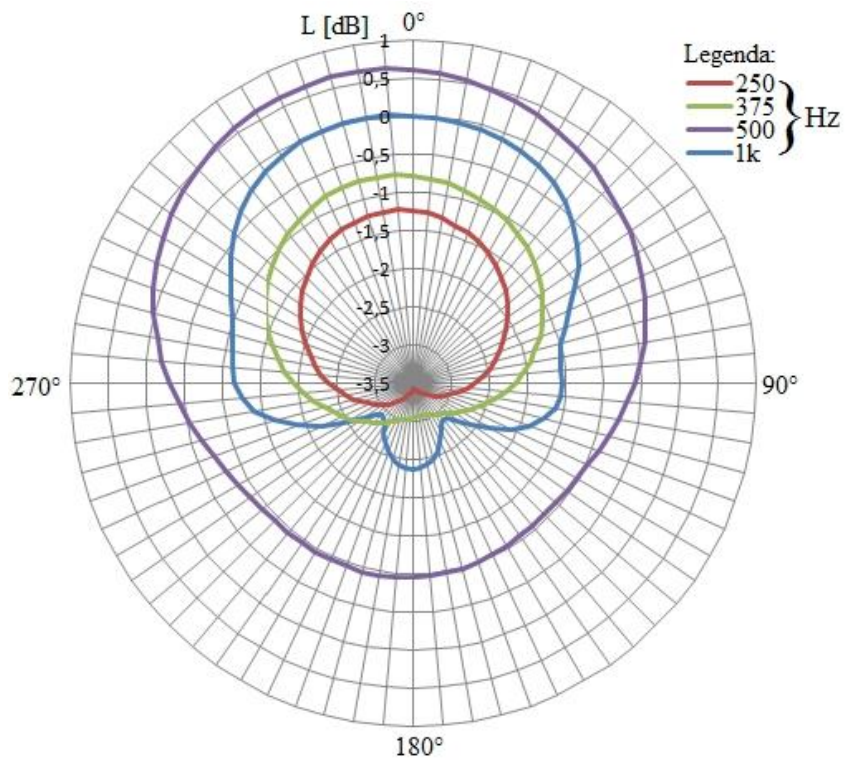
Obr. 27: Frekvenční charakteristika vyrobeného mikrofonu.

5.2 Směrová charakteristika

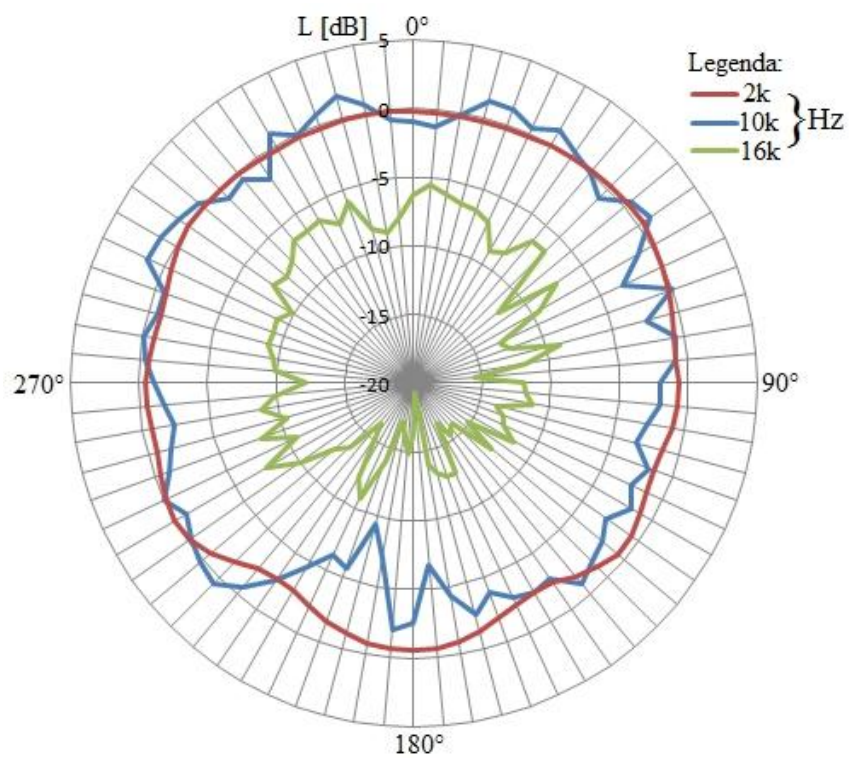
Všechny hodnoty směrových charakteristik byly normalizovány při natočení 0° a úrovni 0 dB na kmitočtu 1 kHz. Směrové charakteristiky vyrobeného mikrofonu zobrazené na obr. 28 a obr. 29 vychází kardioidní až hyperkardioidní pro frekvence do hodnoty 2 kHz. Ovšem směrové charakteristiky pro vyšší frekvence už nejsou ideálního tvaru, což je způsobeno horšími vlastnostmi elektretové vložky na vyšších frekvencích. Tento jev je patrný i z frekvenční charakteristiky. Měření směrových charakteristik bylo zaznamenáváno pro úhel natočení $0 - 355^\circ$ a kroku 5° , takže bylo změřeno celkem 72 charakteristik pro frekvence 100 Hz – 20 kHz. Tyto změřené hodnoty byly vyexportovány do Excelu a poté vyneseny do paprskových grafů. Výběr 8 naměřených hodnot směrové charakteristiky pro různé frekvence je uveden v tab. 7.

Tab. 7: Tabulka naměřených hodnot pro různé frekvence

úhel natočení [$^\circ$]	0	45	90	135	180	225	270	315
L [dB] $f=250$ Hz	-1,238	-1,782	-2,686	-3,304	-3,400	-3,133	-2,398	-1,536
L [dB] $f=375$ Hz	-0,786	-1,255	-2,160	-2,934	-3,043	-2,778	-1,935	-1,026
L [dB] $f=500$ Hz	0,604	0,106	-0,591	-1,065	-0,949	-0,941	-0,305	0,478
L [dB] $f=1$ kHz	0,000	-0,531	-1,546	-2,848	-2,366	-2,921	-1,166	-0,316
L [dB] $f=2$ kHz	-0,161	0,349	-0,719	-1,099	-0,566	-1,587	-0,434	-0,075
L [dB] $f=10$ kHz	-0,923	-0,987	-2,027	-1,631	-2,588	0,555	-1,164	-0,986
L [dB] $f=16$ kHz	-6,309	-6,480	-11,919	-15,947	-16,223	-13,494	-12,150	-7,530



Obr. 28: Směrová charakteristika pro kmitočty: 250 Hz, 375 Hz, 500 Hz a 1 kHz.



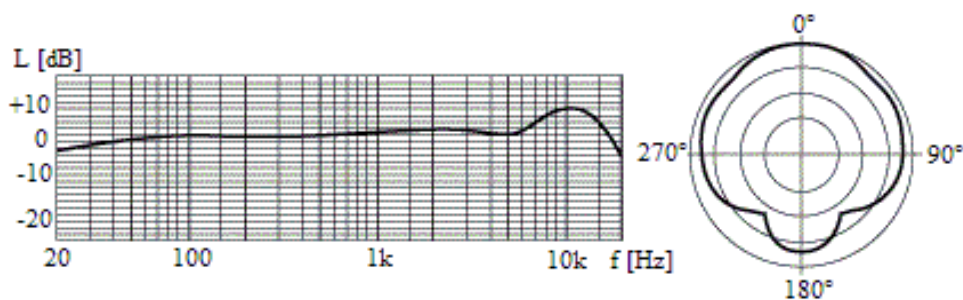
Obr. 29: Směrová charakteristika pro kmitočty: 2 kHz, 10 kHz a 16 kHz.

6 POROVNÁVÁNÍ

V této části práce byla porovnávána frekvenční a směrová charakteristika vyrobeného mikrofonu s komerčními typy. Pro porovnávání byl vybrán mikrofon MXL 960, který by se dal zařadit do stejné cenové kategorie. Dále mikrofon Rode K2, který byl zařazen do vyšší cenové skupiny a mikrofon firmy Neumann M 150, který je zařazen mezi nejlepší lampové mikrofony na světě.

6.1 Lampový mikrofon MXL 960

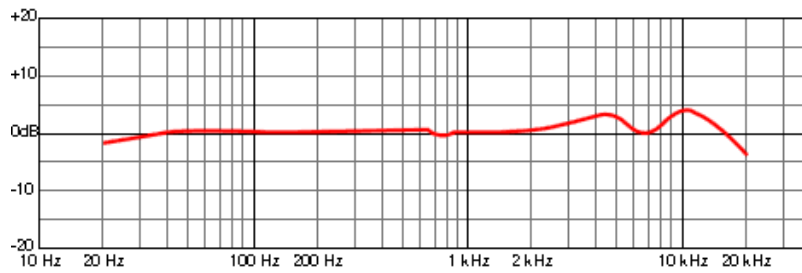
Na obr. 30 je zobrazena frekvenční a směrová charakteristika mikrofonu MXL 960. Při porovnání s vyrobeným mikrofonem je poznat, že jsou mikrofony prakticky identické. Vyrobený mikrofon ovšem od frekvence 7 kHz obsahuje překmit pouze 1,5 dB, takže vykazuje lepší vlastnosti. Směrová charakteristika je hyperkardioidní obdobně jako u vyrobeného mikrofonu. Mikrofon MXL 960 ovšem obsahuje u směrové charakteristiky větší lalok při úhlu natočení 180°.



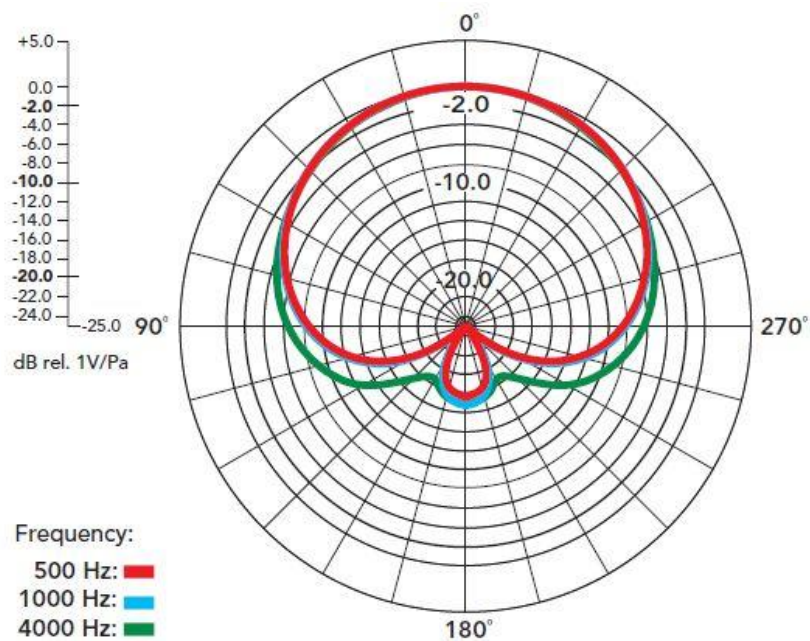
Obr. 30: Frekvenční (vlevo) a směrová (vpravo) charakteristika mikrofonu MXL 960 (upraveno) [14].

6.2 Lampový mikrofon Rode K2

Na obr. 31 a obr. 32 je zobrazena frekvenční a směrová charakteristika mikrofonu Rode K2. Tento mikrofon obsahuje přepínač směrových charakteristik, a z toho důvodu je porovnáván s kardioidní pozicí přepínače. Při porovnání s vyrobeným mikrofonem je směrová charakteristika na 1 kHz identická. Frekvenční charakteristika obsahuje zvlnění okolo kmitočtu 800 Hz, což je identické pro vyrobený mikrofon. Zvlnění mezi 5 – 10 kHz vykazuje lepší vyrobený mikrofon.



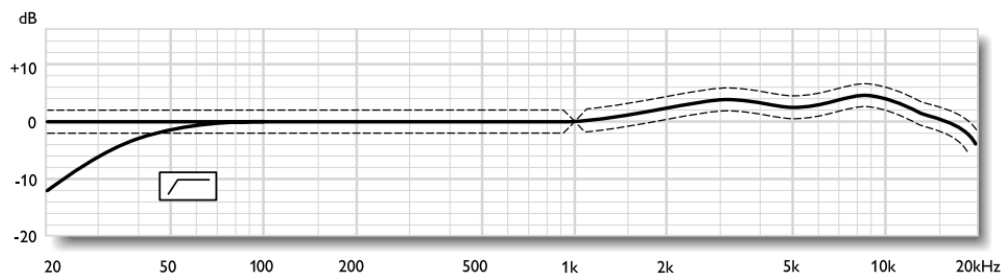
Obr. 31: Frekvenční charakteristika mikrofonu Rode K2 [14].



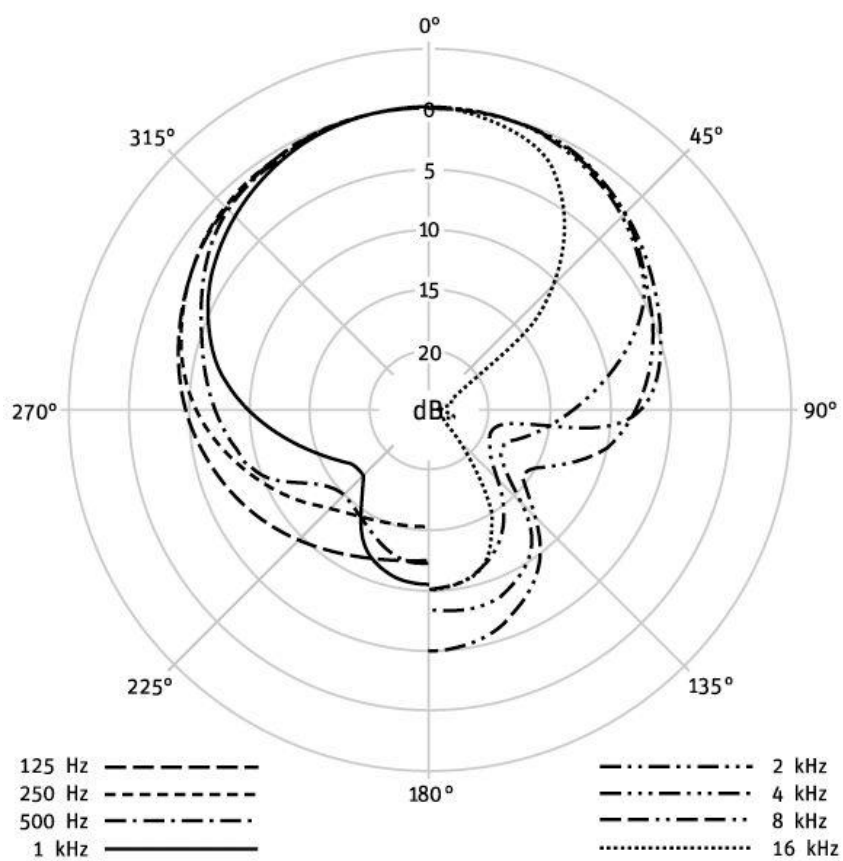
Obr. 32: Směrová charakteristika mikrofonu Rode K2 [14].

6.3 Lampový mikrofon Neumann M 150

Na obr. 33 a obr. 34 jsou zobrazeny frekvenční a směrová charakteristika mikrofonu Neumann M 150. Tento mikrofon obsahuje přepínač směrových charakteristik, a z toho důvodu je porovnáván s kardioidní pozicí přepínače. Při porovnání s vyrobeným mikrofonem je směrová charakteristika na 1 kHz hyperkardioidní, obdobně jako u vyrobeného mikrofonu, ovšem obsahuje větší lalok v natočení 180°. Směrové charakteristiky na vyšších kmitočtech vykazují lepší parametry, než u vyrobeného mikrofonu. Frekvenční charakteristika obsahuje menší hodnoty zvlnění mezi frekvencemi 2 – 10 kHz. Z frekvenční charakteristiky je dále patrné, že od frekvence 10 kHz do 20 kHz vykazuje sklon -8 dB/oktávu.



Obr. 33: Frekvenční charakteristika mikrofonu Neumann M 150 [14].



Obr. 34: Směrová charakteristika mikrofonu Neumann M 150 [14].

7 ZÁVĚR

Zadáním bakalářské práce bylo prostudování a vhodné navrzení lampového mikrofonu. Nejprve bylo vybráno schéma uvedené v [1], které bylo vhodně modifikováno a pozměněno, za pomoci simulačního programu Pspice. Poté byl zvolen vhodný toroidní transformátor, který slouží k návrhu zdroje anodového napětí a zdroje žhavicího napětí. Každý lampový mikrofon potřebuje ke své existenci tato napájení. Hodnoty potřebných napájení elektronky ECC81 byly zjištěny z datasheetu uvedeném v [5].

Pomocí simulací je patrné, že by všechny navržené části měly být funkční podle předpokladů. Dále byly vytvořeny konstrukční podklady pro realizaci lampového mikrofonu. Všechny potřebné desky plošných spojů byly navrženy v programu Eagle a jsou spolu s osazovacími plány uvedeny v příloze.

Nejprve byly sehnány všechny vhodné součástky pro osazení desek plošných spojů. Následně byly poupraveny desky plošných spojů, a to z důvodu dostupnosti některých použitých součástek. Poté byl kompletní napájecí systém vyzkoušen a byla vyrobena konstrukce napájecího zdroje včetně propojovacího kabelu. V dalším kroku byla navrhnutá a sestavená šasi mikrofonní části včetně uchycení desky uvnitř mikrofonu. V této fázi byl celý mikrofonní systém sestaven a vyzkoušen.

Díky správné funkčnosti celého systému následovalo kompletní proměření veškerých charakteristik a vlastností v bezdrazové komoře na Ústavu telekomunikací VUT v Brně. Naměřené směrové a frekvenční charakteristiky vycházely podle předpokladů a jejich průběhy a tvary jsou popsány podrobněji v předchozích kapitolách.

Směrová charakteristika na kmitočtu 1 kHz nabývá hyperkardioidního charakteru. Frekvenční charakteristika je ustálená od 100 Hz – 7 kHz, poté nastává mírný překmit přibližně na hodnotu 1,3 dB a od frekvence 10 kHz charakteristika vykazuje sklon -8 dB/oktávu. Citlivost mikrofonu vyšla 41,83 mV/Pa, odstup signálu od šumu 46,61 dB, THD 0,68 %, THD+N 0,78 % a hladina šumu 24,85 μ V.

Při porovnávání s podobnými komerčními typy bylo zjištěno, že mikrofon se může vyrovnat mikrofonům MXL 960 a Rode K2, avšak nedosahuje kvality mikrofonu Neumann M 150 z důvodu použití kvalitnějších součástek. V případě použití lepší mikrofonní vložky se mikrofon může rovnat i s mikrofonem Neumann 150. Budoucí postup by byl v porovnání hudebních nahrávek vyrobeného a porovnávaných mikrofonů.

Z předložených výsledků je patrné, že všechny body zadání byly splněny. Navržený a sestavený mikrofon byl ověřen, odměřen a je zcela funkční. Lze jej vzhledem k naměřeným parametrům používat jako studiový mikrofon pro záznam řeči a vokálu.

LITERATURA

- [1] Aurycle: A5500MP DIY. *Home of the DIY Microphone Kits!* [online]. 2009 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <<http://www.aurycle.com/aurycle-a5500MP-large-diaphragm-tube-condenser-diy-microphone.html>>.
- [2] Muzikus.cz: Hudební portál. KAŠPÁREK, Michal. *Vynález mikrofonu* [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <<http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-workshopy/Vyvoj-zaznamovych-zarizeni-X-vynalez-mikrofonu~10~zari~2013/>>.
- [3] Muzikus.cz: Hudební portál. KAŠPÁREK, Michal. *Mikrofony dříve a dnes* [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <<http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-workshopy/Vyvoj-zaznamovych-zarizeni-XI-mikrofony-drive-a-dnes~14~listopad~2013/>>.
- [4] VLACHÝ, Václav. *Praxe zvukové techniky*. 3., aktualiz. a dopl. vyd. Praha: Muzikus, 2008, 257 s. ISBN 978-80-86253-46-5.
- [5] VLACH, Jaroslav. *Lampárna: aneb Co to zkusit s elektronkami*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 151 s. ISBN 80-730-0091-1.
- [6] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda NF techniky*. 1. vyd. Praha: BEN, 1998, 191 s. ISBN 80-860-5626-0.
- [7] OLD-SCHOOL ELETRONIC MUSIC. *Co je to zvuk: Jeho chápání a vznik* [online]. 2008, 2012 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <<http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/o-zvuku>>.
- [8] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. *Mikrofony* [online]. 2006 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/377-mikrofony>>.
- [9] LUKEŠ, Jaroslav. *Věrný zvuk*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1962, 325 s.
- [10] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 136 s. ISBN 80-730-0002-4.
- [11] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT A/S. *Brüel & Kjør: BEYOND MEASURE* [online]. 2013 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <<http://www.bksv.com/Products>>.
- [12] Muzikus.cz: Hudební portál. TUREČEK, Oldřich. *Reproboxy EVENT TR5, TR8 a 20/20 S250* [online]. 2003 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <<http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-testy/Reproboxy-EVENT-TR5-TR8-a-2020-S250~13~duben~2003/>>.
- [13] AUDIO PRECISION. *AP: THE RECOGNIZED STANDARD IN AUDIO TEST* [online]. 2012 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <<http://www.audioprecision.com/products>>.
- [14] AUDIOTEK MEGASTORE. *Lampové mikrofony* [online]. 2010 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <<http://www.audiotek.cz/mikrofony/lampove-mikrofony>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

I_a	anodový proud
U_g	mřížkové napětí
U_a	anodové napětí
ΔU_a	změna anodového napětí
ΔI_a	změna anodového proudu
ΔU_g	změna napětí mřížky
S	strmost elektronky
μ	zesilovací činitel elektronky
R_i	vnitřní odpor elektronky
D	průnik elektronky
R_a	anodový odpor elektronky
C	kapacita mikrofону
ε_0	permitivita vakua
ε_r	permitivita dielektrika
S	plocha elektrod kondenzátoru
d	vzdálenost elektrod kondenzátoru
Q	náboj kondenzátoru
U	polarizované napětí kondenzátoru
f_d	nejnižší přenášený kmitočet
U_{21}	sekundární napětí prvního vinutí
U_{22}	sekundární napětí druhého vinutí
I_{21}	sekundární proud prvního vinutí
I_{22}	sekundární proud druhého vinutí
P_z	zdánlivý výkon
Δp	navýšení zdánlivého výkonu
ϑ_s	teplota okolí
$\Delta \vartheta$	oteplení
U_{in}	vstupní napětí
f	frekvence
d	vzdálenost mezi mikrofonom a reproduktorem
L	úroveň napětí

THD celkové harmonické zkreslení

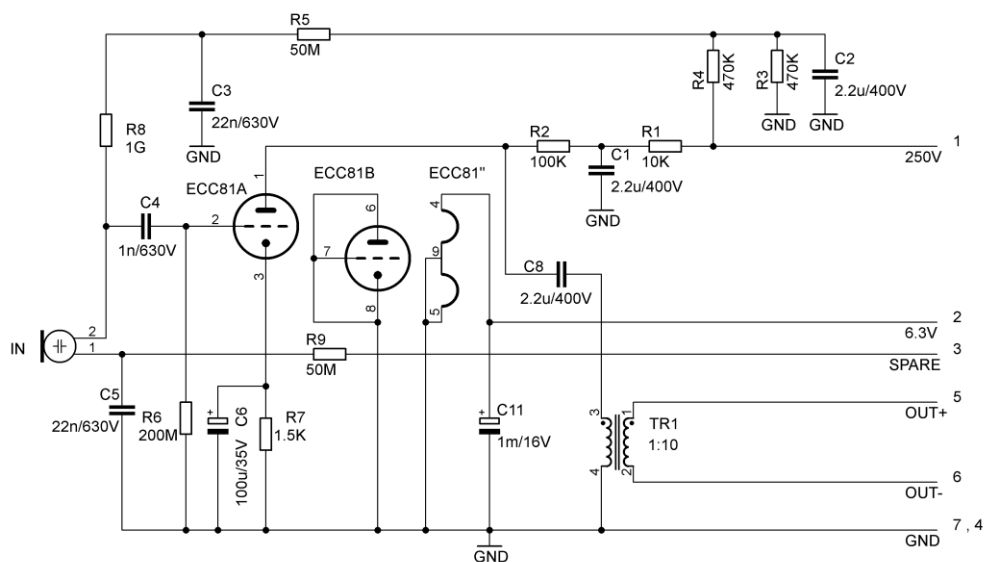
THD+N celkové harmonické zkreslení se šumem

SEZNAM PŘÍLOH

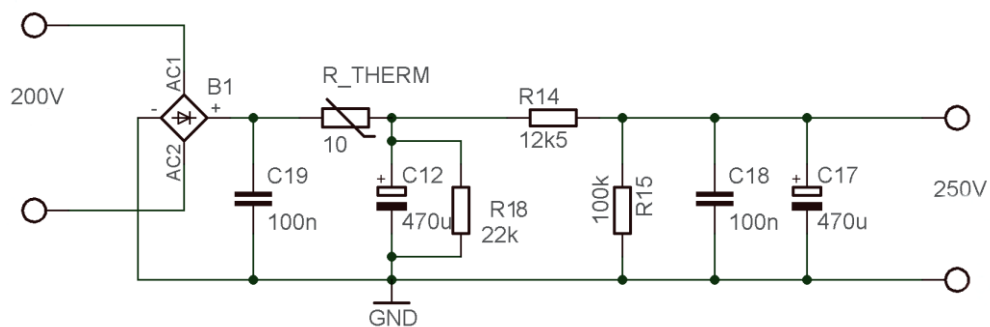
A	Obvodová zapojení	40
A.1	Schéma mikrofonu	40
A.2	Schéma anodového napájení.....	40
A.3	Schéma žhavicího napájení.....	41
B	desky plošných spojů	42
B.1	Deska mikrofonu – bottom (strana spojů)	42
B.2	Deska panelu mikrofonu – bottom a top.....	42
B.3	Deska anodového napájení – bottom (strana spojů)	43
B.4	Deska napájení žhavení – bottom (strana spojů)	43
C	osazovací plán desek	44
C.1	Osazovací plán desky mikrofonu.....	44
C.2	Osazovací plán desky panelu mikrofonu	44
C.3	Osazovací plán desky anodového napětí	44
C.4	Osazovací plán desky napětí žhavení	45
D	Seznam součástek	46
D.1	Seznam součástek mikrofonu	46
D.2	Seznam součástek panelu mikrofonu.....	46
D.3	Seznam součástek anodového napájení	47
D.4	Seznam součástek napájení žhavení	47

A OBVODOVÁ ZAPOJENÍ

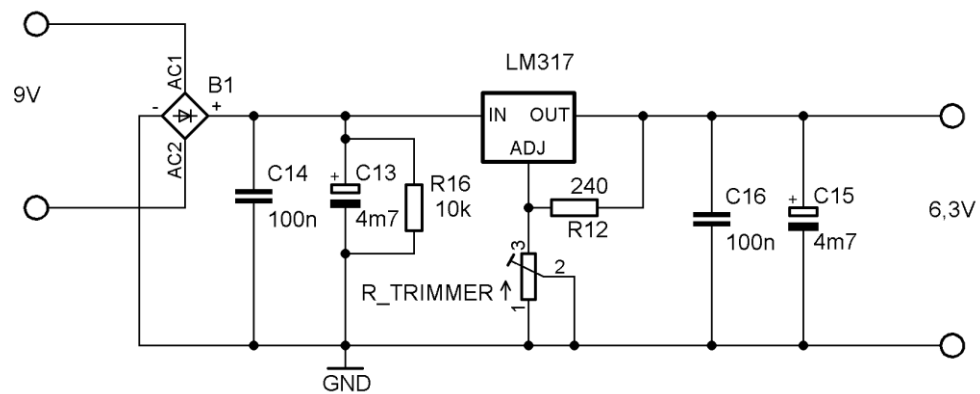
A.1 Schéma mikrofonu



A.2 Schéma anodového napájení

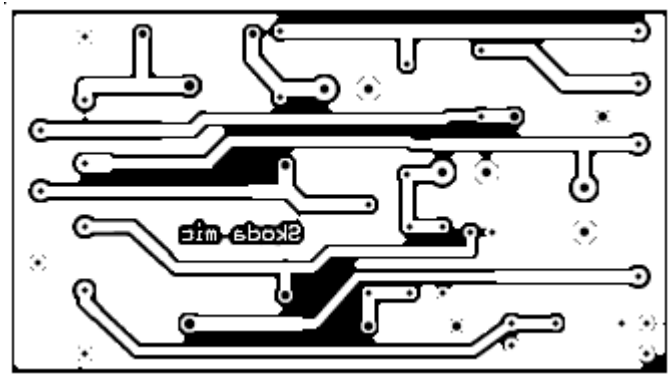


A.3 Schéma žhavičího napájení



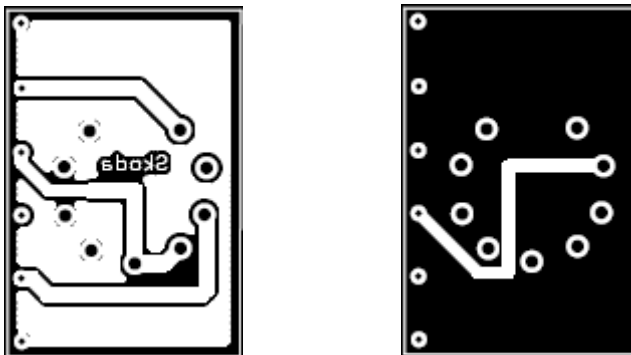
B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 Deska mikrofonu – bottom (strana spojů)



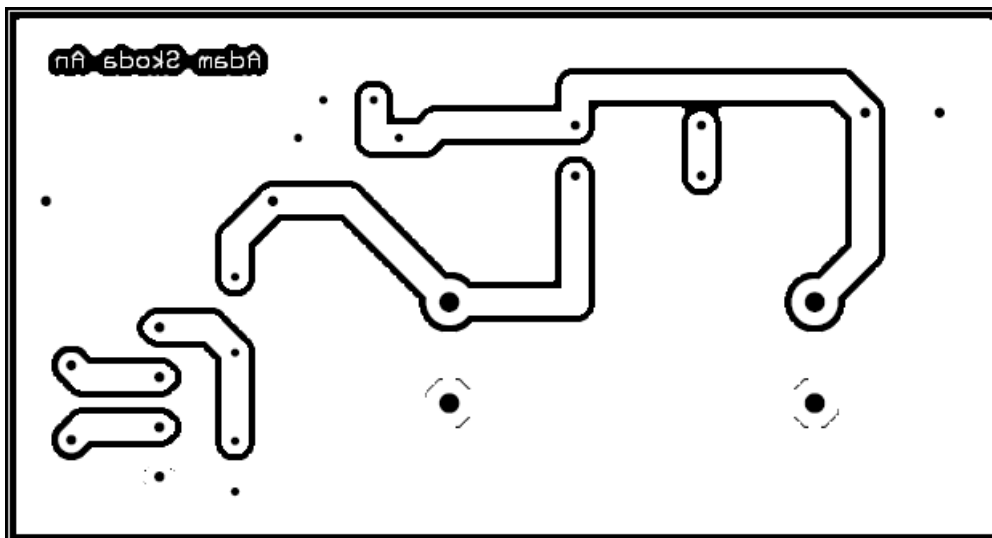
Rozměr desky 74,5 x 41 [mm], měřítko M1:1

B.2 Deska panelu mikrofonu – bottom a top



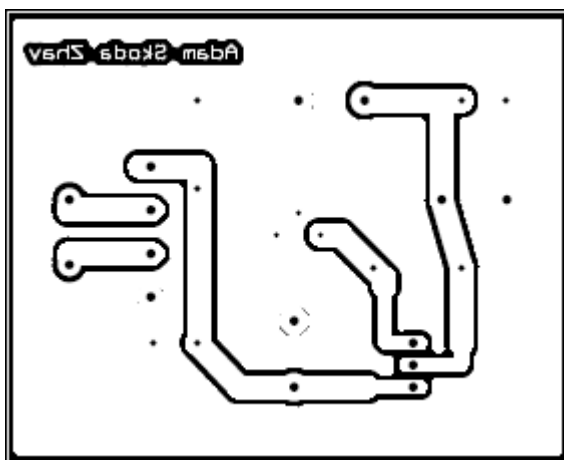
Rozměr desky 38,4 x 25,3 [mm], měřítko M1:1

B.3 Deska anodového napájení – bottom (strana spojů)



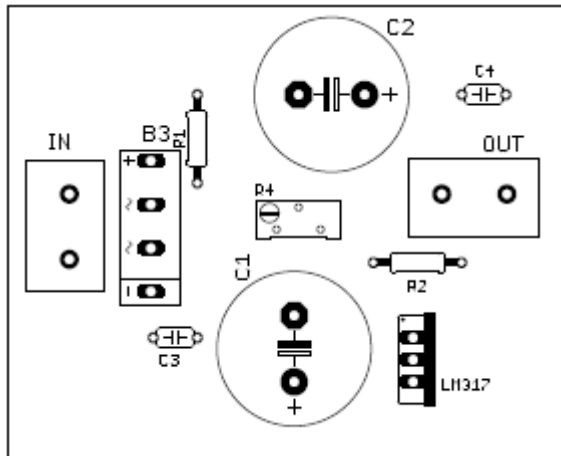
Rozměr desky 99 x 52 [mm], měřítko M1:1

B.4 Deska napájení žhavení – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 63 x 50 [mm], měřítko M1:1

C.4 Osazovací plán desky napětí žhavení



D SEZNAM SOUČÁSTEK

D.1 Seznam součástek mikrofону

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	1 uF/400V	C275-134X316	Elektrolytický kondenzátor
C2	1 uF/400V	C275-134X316	Elektrolytický kondenzátor
C3	22 nF/630V	C102-043X133	Fóliový kondenzátor
C4	1 nF/630V	C075-042X103	Fóliový kondenzátor
C5	22 nF/630V	C102-043X133	Fóliový kondenzátor
C6	100 uF/35V	E2,5-7	Elektrolytický kondenzátor
C8	2.2 uF/400V	C275-134X316	Fóliový kondenzátor
C11	1 mF/16V	E5-13	Elektrolytický kondenzátor
R1	10k	0207/7	Rezistor
R2	100k /2W	0411/12	Výkonový rezistor
R3	470k	0207/7	Rezistor
R4	470k	0207/12	Rezistor
R5	50M	0207/7	Rezistor
R6	200M	0207/2V	Rezistor
R7	1k5	0207/7	Rezistor
R8	1G	0207/10	Rezistor
R9	50M	0207/7	Rezistor
TR1	Transformátor 1:10	NTE10/3	Audio transformátor

D.2 Seznam součástek panelu mikrofону

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
V1	ECC81	NOVAL	Keramická patice

D.3 Seznam součástek anodového napájení

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C12	470 uF/400V	EB35D	Elektrolytický kondenzátor
C17	470 uF/400V	EB35D	Elektrolytický kondenzátor
C18	100 nF/630V	C050-024X044	Fóliový kondenzátor
C19	100 nF/630V	C050-024X044	Fóliový kondenzátor
R14_1	12k	0411/12	Rezistor
R14_2	500R	0411/12	Rezistor
R15	100k	0207/10	Rezistor
R18	22k /5W	0922/22	Výkonový rezistor
R_THERM	10R	0207/10	NTC Termistor
B1	B380C1500F	2KBB-R	Usměrňovací můstek

D.4 Seznam součástek napájení žhavení

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C13	4m7	E7,5-18	Elektrolytický kondenzátor
C14	100 nF	C050-024X044	Fóliový kondenzátor
C15	4m7	E7,5-18	Elektrolytický kondenzátor
C16	100nF	C050-024X044	Fóliový kondenzátor
R12	240R	0207/10	Rezistor
R_TRIMM	1K	RTRIM64Y	Trimmer
R16	10k	0207/10	Rezistor
B2	B380C1500F	2KBB-R	Usměrňovací můstek
I1	LM317	317TS	Stabilizátor napětí