



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ELEKTRONKOVÝ MIKROFON

TUBE MICROPHONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Kupka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Šimon Kupka

ID: 240175

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Elektronkový mikrofón

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou elektronkových mikrofónů a srovnajte parametry komerčně známých řešení. Zvolte vybrané řešení, které upravte dle požadavků na vlastní parametry. Zhodnoťte možnost doplnit výchozí řešení o další snímač s malou membránou, který by byl přepínatelný se stávajícím snímačem s velkou membránou. V tomto případě řešte jak elektrické tak i konstrukční požadavky. Pozornost věnujte stejné citlivosti mikrofónu pro oba snímače. Navržené řešení prakticky realizujte a experimentálně ověřte jeho chování a dosahované parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ELA M 215E - Vacuum Tube Microphone, Telefunken Elektroakustik, dostupné online: <https://www.telefunken-elektroakustik.com/product/ela-m-251e/>, cit. [2023-06-01]

[2] AKG C12VR – Reference Multi-Pattern Tube Condenser Microphone, AKG Harman, dostupné online: https://www.ake.com/Microphones/Tube%20Microphones/C12VR.html?dwvar_C12VR_color=Green-GLOBAL-Current&cgid=Tube%20Microphones#start=1, cit. [2023-06-01]

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 28.5.2024

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Tato práce se zabývá principem elektronového kondenzátorového mikrofonu. Blíže se věnuje mikrofonu Telefunken ELA M-251E a zkoumá možnost rozšíření jeho obvodu o další membránu. Při návrhu takového řešení je k ověření předpokladů užitá simulace. Následně se práce zabývá výběrem vhodných součástek, samotnou konstrukcí mikrofonu a měřením jeho klíčových vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrofon, elektronka, kondenzátorový mikrofon, elektronkový mikrofon, mikrofonní kapsle

ABSTRACT

This thesis is focused on the principle of a vacuum tube condenser microphone. It takes a closer look at the Telefunken ELA M-251E microphone and explores the possibility of extending its circuit by additional diaphragm. In the design of such a solution, simulation is used to verify the assumptions. Subsequently, the thesis deals with the selection of suitable components, the actual construction of the microphone and the measurement of its key properties.

KEYWORDS

microphone, vacuum tube, condenser microphone, vacuum tube microphone, microphone capsule

KUPKA, Šimon. *Elektronkový mikrofon*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2030. Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Šimon Kupka
VUT ID autora: 240175
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Elektronkový mikrofon

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 autorského 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.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce panu prof. Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
Cíle práce	12
1 Teorie elektronkového mikrofonu	13
1.1 Význam elektronkového mikrofonu	13
1.1.1 Krátká historie	13
1.1.2 Význam v dnešní době	13
1.2 Vlastnosti a konstrukce elektronkového kondenzátorového mikrofonu .	14
1.2.1 Kapsle	15
1.2.2 Předzesilovač	17
1.2.3 Výstupní transformátor	21
1.2.4 Napájení	22
1.3 Sledované parametry kondenzátorového mikrofonu	23
1.3.1 Citlivost mikrofonu	23
1.3.2 Směrová charakteristika mikrofonu	23
1.3.3 Frekvenční odezva mikrofonu	24
1.3.4 SNR a ekvivalentní úroveň šumu mikrofonu	24
1.3.5 Maximální SPL	25
2 Telefunken ELA M-251	26
2.1 Vznik a význam	26
2.2 Obvod a specifikace	27
3 Návrh a simulace řešení	29
3.1 Výchozí pracovní bod	29
3.2 Simulace	30
3.2.1 Popis	30
3.2.2 Výsledky simulace	31
3.2.3 Další možnosti úpravy pracovního bodu	32
3.3 Fyzické provedení úprav	34
4 Realizace navrženého řešení	36
4.1 Obvod a realizace napájecího zdroje	36
4.2 Realizace mikrofonu	37
4.2.1 Konstrukce obvodu	37
4.2.2 Mechanická konstrukce	38

5	Měření vlastností mikrofonu	39
5.1	Měřicí zařízení	39
5.1.1	Konfigurace pro měření kmitočtových charakteristik	39
5.1.2	Konfigurace pro měření směrových charakteristik	39
5.2	Výsledky měření	40
5.2.1	Kmitočtové charakteristiky	41
5.2.2	Směrové charakteristiky	43
5.2.3	Hodnocení výsledků měření	45
	Závěr	48
	Literatura	49
	Seznam příloh	51
	A Grafy kmitočtových charakteristik poskytované výrobcem	52
	B Fotodokumentace	55
	C Návrh plošného spoje	59
	D Kompletní schéma mikrofonu	61
	E Obsah elektronické přílohy	62

Seznam obrázků

1.1	Blokové schéma elektronkového mikrofону	14
1.2	Nákres mikrofonní kapsle (převzat z [4])	15
1.3	Vpravo kapsle s kontaktem na přítlačném kroužku, vlevo s kontaktem uprostřed (obrázek převzat z [5])	15
1.4	Princip třídy A popsán na voltampérové charakteristice	17
1.5	Seskupení elektrod triody	18
1.6	Základní zapojení triody (převzato z [10])	19
1.7	Graf anodové charakteristiky elektronky 12AT7 (převzat z [11])	19
1.8	Základní zapojení elektronky	21
1.9	Blokové schéma napájení pro elektronkový mikrofón	22
1.10	Druhy směrových charakteristik [7]	23
1.11	Váhovací křivky (převzato z [4])	25
2.1	Telefunken ELA M-251E (převzat z [15])	26
2.2	Schéma předzesilovače Telefunken ELA M-251E	27
2.3	Schéma přepínacího obvodu s kapslemi Telefunken ELA M-251E	27
3.1	Pracovní bod triody mikrofónu ELA M-251E (graf převzat z [16])	29
3.2	Graf závislosti výstupního napětí na velikosti katodového odporu	31
3.3	Graf závislosti THD na velikosti katodového odporu	31
3.4	Graf závislosti výstupního napětí na velikosti katodového odporu pro různé hodnoty anodového odporu	33
3.5	Graf závislosti THD na velikosti katodového odporu pro různé hod- noty anodového odporu	33
3.6	Schéma předzesilovače s přepínáním dvou různých hodnot katodového a anodového odporu	34
3.7	Přepínací obvod se dvěma kapslemi	35
4.1	Schéma navrženého napájecího zdroje	36
4.2	Pohled do vnitřku napájecího zdroje	37
4.3	Vnitřní konstrukce mikrofónu z různých úhlů	38
5.1	Schéma konfigurace pro měření kmitočtových charakteristik	39
5.2	Schéma konfigurace pro měření směrových charakteristik	40
5.3	Graf kmitočtové charakteristiky - kardioida, velká membrána	41
5.4	Graf kmitočtové charakteristiky - kardioida, malá membrána	41
5.5	Graf kmitočtové charakteristiky - osmičková, velká membrána	42
5.6	Graf kmitočtové charakteristiky - omni, velká membrána	42
5.7	Graf směrové charakteristiky kardioidy velké membrány	43
5.8	Graf směrové charakteristiky kardioidy malé membrány	43
5.9	Graf osmičkové směrové charakteristiky velké membrány	44

5.10 Graf kulové (omni) směrové charakteristiky velké membrány	44
A.1 Kardioidní charakteristika - přední strana	52
A.2 Osmičková charakteristika - přední strana	52
A.3 Osmičková charakteristika - zadní strana	53
A.4 Kulová charakteristika - přední strana	53
A.5 Kulová charakteristika - zadní strana	54
B.1 Mikrofon - vnější pohled	55
B.2 Mikrofon - pohled vnitřní	55
B.3 Napájecí zdroj - přední panel	56
B.4 Napájecí zdroj - zadní panel	56
B.5 Napájecí zdroj - pohled vnitřní	57
B.6 Mikrofon - komplet	57
B.7 Propojovací kabel	58
C.1 Návrh plošného spoje - horní pohled	59
C.2 Návrh plošného spoje - spodní pohled	59
C.3 Návrh plošného spoje - spodní pohled, osazení	60
D.1 Kompletní schéma mikrofonu zahrnující přepínání charakteristik . . .	61

Úvod

Tato práce se věnuje tématu elektronkového mikrofonu, zejména jeho konstrukci a návrhu. V teoretické části práce je nejprve obsažen popis vlastností a parametrů, kterými elektronkové mikrofony mohou disponovat, krátce je shrnuta historie jejich vývoje a též je obsažena krátká rozvaha nad jejich významem pro dnešní dobu. Navzdory tomu, že mikrofony s elektronkovými předzesilovači využívají již poměrně archaickou technologii, se dodnes, zejména při studiových aplikacích, těší velké oblibě.

Jedním z nejkoničtějších typů takového mikrofonu je velkomembránový Telefunken ELA M-251. Ten je oblíbený zvláště pro záznam vokálů a lidského hlasu. Druhá praktická část práce se bude věnovat právě návrhu a konstrukci mikrofonu, který z něj bude vycházet. Je zde ale zvážena možnost rozšíření tohoto typu mikrofonu o druhý snímač, kapsli o menším průměru, která by jeho už tak velmi univerzální spektrum užití ještě více rozšířila. Mikrofon by tak byl více vhodný i pro záznam instrumentálních zdrojů zvuku. Vezmeme-li v úvahu, že přepínání mezi těmito dvěma snímači by bylo možné na jeho vzdáleném napájecím zdroji a výstupní úrovně snímačů by byly sladěny, dělalo by to z mikrofonu poměrně multifunkční nástroj pro studiový styl práce.

V rámci konstrukce bude kladen důraz jak na elektroakustické vlastnosti mikrofonu, tak i na jeho mechanické zpracování a na to, aby výsledkem bylo uživatelsky snadno obsluhovatelné a spolehlivé zařízení.

Cíle práce

Cílem této práce je přiblížit problematiku elektronického mikrofону v obecném hledisku. Dále má práce za cíl zaměřit se na některé komerčně známé řešení a vyhodnotit možnost jeho úpravy rozšířením o druhou membránu. Následně navrhnout řešení této problematiky, to zrealizovat a měřením ověřit jeho výsledné kvality.

1 Teorie elektronkového mikrofону

Elektronkový mikrofón je jedním z možných konstrukčních řešení kondenzátorového mikrofónu. Kondenzátorový mikrofón pro snímání zvuku užívá kapsli, která je koncipována jako vzduchový kondenzátor, jedna z jeho desek je však velmi jemná plastová membrána s naprášenou vodivou vrstvou. Vlivem zvukového vlnění se tato membrána pohybuje blíže a dále od druhé pevné kovové desky, se změnou velikosti jejich vzdálenosti se mění i kapacita kapsle.

Jelikož změny napětí, které polarizovaná kapsle generuje, jsou velmi malých hodnot, tak je potřeba tento signál zesílit co nejbližší kapsli, aby nedošlo k nezanedbatelným ztrátám. K tomu slouží předzesilovač, který může k zesílení užívat polovodičových součástek, nebo právě starší elektronkovou technologii. Proto se dnes užívá označení „elektronkový mikrofón“.

1.1 Význam elektronkového mikrofónu

1.1.1 Krátká historie

Vynález kondenzátorového mikrofónu je dle [1] připisován americkému fyzikovi Edwardu Christopheru Wentu. S ideou kondenzátorového mikrofónu přišel během svého působení v Bellových laboratořích v roce 1916. Jeho patent byl zamýšlen primárně jako nová technologie pro telefonní využití, avšak principiálně popsal kondenzátorovou vložku, která našla své hlavní využití zejména ve studiových mikrofónech.

Tomu ve 40. letech 20. století napomohl Němec George Neumann se svojí stejnojmennou značkou. Mezi nejslavnější elektronkové modely značky Neumann patří U47, U48, U67 a další. Ve stejné době již produkuje i značka AKG. Obě tyto značky úzce spolupracují s výrobcem televizních a rozhlasových zařízení Telefunken, též výrobcem elektronek. Kromě toho, že jim Telefunken poskytuje potřebné elektro-součástky, tak také pod svým jménem dodává jimi vyvinuté mikrofóny. [1]

1.1.2 Význam v dnešní době

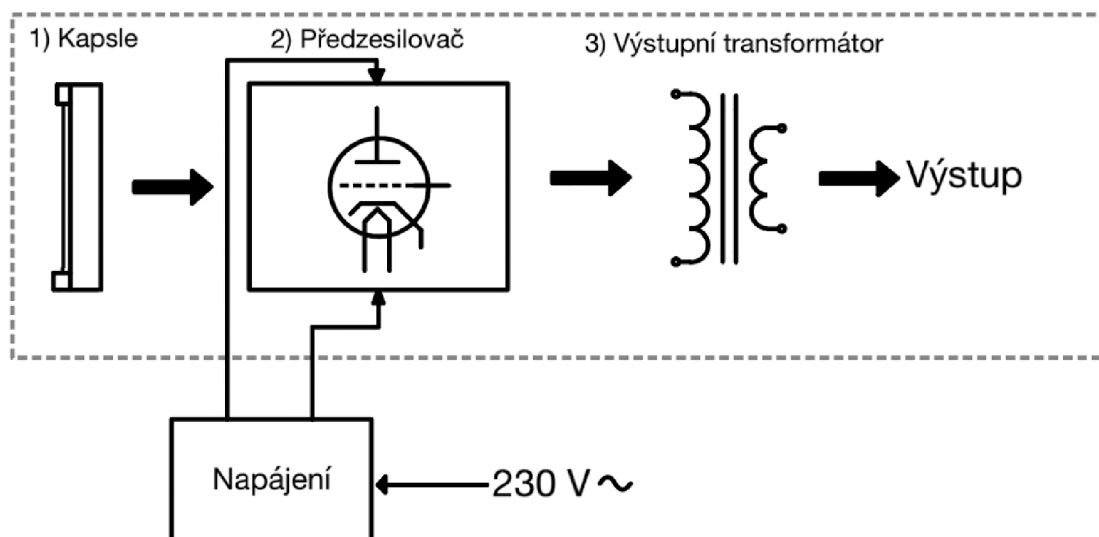
V 60. a 70. letech přichází polovodičová technologie a předzesilovače jsou stavěny s využitím FET tranzistorů. Ty s sebou nesou výhody jako jsou vyšší odolnost, větší odstup signálu od šumové složky a menší náročnost na napájení. Mohou být napájeny podstatně menšími napětími, kupříkladu později standardizovaným fantomovým napětím (48 V).

Navzdory tomu, že užívání elektronkových mikrofónů by se tedy mohlo v dnešní době jevit jako zbytečné, jsou tyto mikrofóny stále hojně užívány pro hudební na-

hrávání. Jisté obecné, avšak velmi drobné, zvukové rozdíly zde jistě jsou, ale těžko říci, jestli jen ony by zapříčinily popularitu užívání těchto mikrofonů v současnosti. Velkou roli zde může sehrávat i fakt, že na slavné modely z 50. let byly nahrány mnohé zásadní nahrávky, které formovaly, jak jsme na zvuk a způsob jeho záznamu zvyklí nahlížet, ať už jako posluchači, nebo zvukoví mistři. Jsou to nástroje, které se užívají dlouhou dobu a většina zvukových mistrů tak tedy může dobře vědět, jaké výsledky od nich očekávat, jedná se o standardy zvukového průmyslu. Dovolují v hudebním smyslu jistou stylizaci, která je žádaná, a proto se i v dnešní době vyvíjí nové typy, či se stále produkují klasické modely a mnohé jejich napodobeniny. V posledních letech lze zaznamenat i rozmach jejich digitálních emulací (například Universal Audio Sphere [2] či systémy od Antelope Audio [3]), snažících se více zpřístupnit zvuk jinak velmi drahých zařízení.

1.2 Vlastnosti a konstrukce elektronkového kondenzátorového mikrofonu

Na obrázku 1.1 je zobrazeno jednoduché blokové schéma mikrofonu. Konstrukčně je elektronkový mikrofón zpravidla rozdělen na mikrofón samotný (v obrázku orámován přerušovanou čarou) a na jeho napájecí zdroj. Jednotlivé stavební prvky budou dále podrobněji rozebrány.

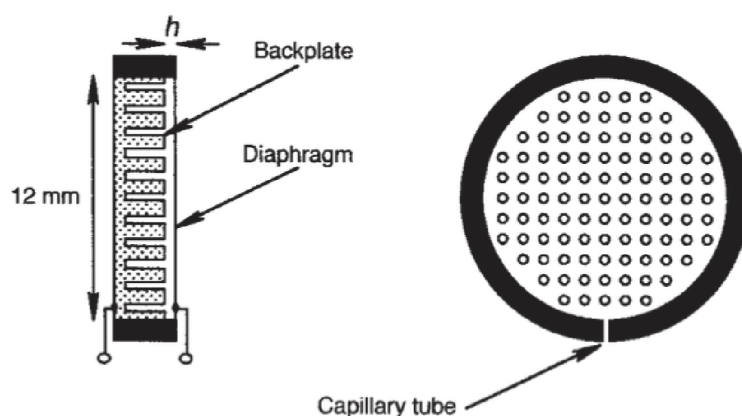


Obr. 1.1: Blokové schéma elektronkového mikrofonu

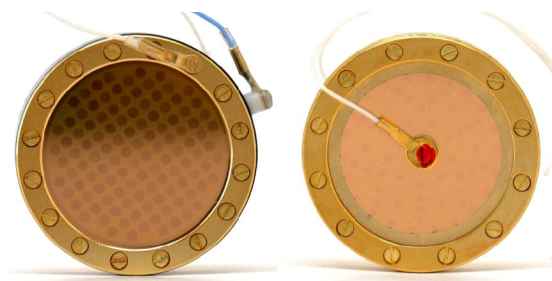
1.2.1 Kapsle

Stavba kapsle

Kondenzátorová kapsle je tlakový snímač, který přeměňuje zvukové vlny na elektrický signál, a na výsledný zvuk mikrofonu má velmi významný vliv. Její nákres vidíme na obrázku 1.2. Skládá se ze zadní desky (Backplate), která je povětšinou vysoustružena z bronzu. Dále z membrány (Diaphragm), která se vyrábí z mylaru, na něž je naprášena vrstva zlata. Vodivá vrstva se nachází zpravidla na vnější straně membrány a může či nemusí být nanесena po celé její ploše. Pak rozlišujeme kapsle s kontaktem na středu membrány, nebo na jejím přitlačném kroužku, jak vidíme na obrázku 1.3. Mezi zadní deskou a membránou může být distanční kroužek, nebo může být mezery (v obrázku značeno „h”) mezi nimi docíleno tvarem samotné zadní desky. Záleží pak na konkrétním typu kapsle, zda je nutno od sebe membránu se zadní deskou izolovat. Jak vidíme, v zadní desce jsou vyvrtány otvory, které, jak uvádí [4], slouží k útlumu rezonance na vlastní frekvenci membrány.



Obr. 1.2: Nákres mikrofonní kapsle (převzat z [4])



Obr. 1.3: Vpravo kapsle s kontaktem na přitlačném kroužku, vlevo s kontaktem uprostřed (obrázek převzat z [5])

John Eargle [4] také uvádí podstatu kapilární trubice (Capillary tube). Ta slouží k vyrovnání vnějšího atmosferického tlaku s tlakem uvnitř kapsle, přičemž je dostatečně tenká tak, aby vzduch uvnitř kapsle zvyšoval tuhost pohybu membrány směrem k zadní desce. To je důležité, jelikož vzdálenost membrány a desky je přibližně 0,02 mm. Ze své rovnovážné polohy se pak membrána vychyluje jen asi o 5%.

Pro mikrofony s více směrovými charakteristikami je zapotřebí dvou membrán v opačném úhlu, což se řeší spojením dvou kapslí za pomoci několika delších šroubů procházejících skrz přitlačný kroužek a celou zadní desku. Zadní desky mohou být vodivě spojeny, anebo jsou navzájem odizolovány.

Rozměry kapslí jsou různé, v základu je však rozlišujeme na velkomembránové a malomembránové. Běžně se uvádí, že rozměry pro velkou membránu jsou od jednoho palce výše a pro malomembránu od 1/2 palce níže. [9]

- **Velká membrána** - velkomembránové mikrofony jsou častěji užívané pro vokály. Ve většině případů mají lepší odstup signálu od šumu. Jejich směrovost je však více frekvenčně závislá a celkově nejsou spektrálně tolik neutrální. Více zabarvují a zvuku přidávají na velikosti.
- **Malá membrána** - jedná se spíše o nástrojové mikrofony. Pro vokální užití jsou příliš náchylné na ploviva. Mají vyšší úroveň vlastního šumu. Jsou však frekvenčně vyrovnanější a i jejich směrovost neprojevuje tak velkou frekvenční závislost, jako je tomu u velkomembránových mikrofonů.

Princip přeměny akustického signálu na elektrický

Jak již bylo zmíněno, kapsle pracuje na principu vzduchového kondenzátoru, pro nějž platí známý vztah:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{l}. \quad (1.1)$$

Výsledná kapacita je rovna násobku permitivity prostředí ε s podílem plochy desek S a jejich vzdálenosti l . Permitivita prostředí je ve vzorci vyjádřena jako násobek permitivity vakua a relativní permitivity. Zde konkrétně jde o permitivitu vzduchu. V případě mikrofону je takovýto kondenzátor polarizován za pomoci stejnosměrného napětí. Dle [4] se toto napětí nejčastěji pohybuje v rozmezí 48 až 65 V a pro kapsli pak uvádí vztah:

$$Q = CU, \quad (1.2)$$

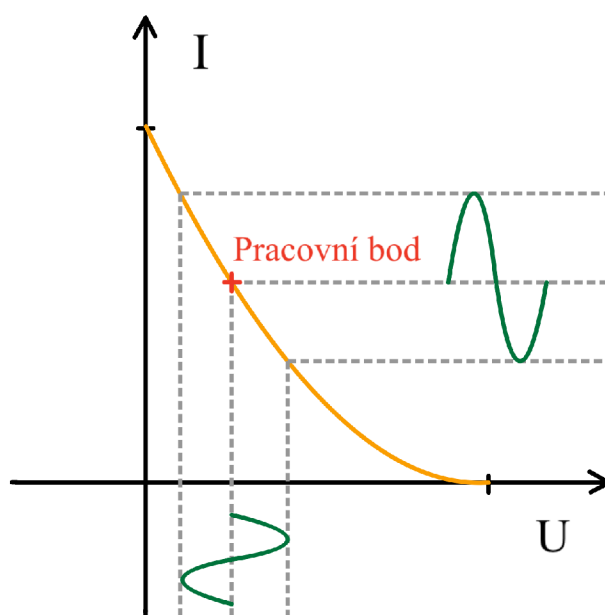
kde náboj v kondenzátoru je roven součinu jeho kapacity s polarizačním napětím značeným U .

Tyto dva vztahy nám mohou poskytnout dobré pochopení principu, na němž kapsle pracuje. Ze vztahu (1.1) je dobře patrný vliv vzdálenosti dvou desek na kapacitu a ze vztahu (1.2) pak plyne, že změna kapacity se poté při konstantním náboji Q projeví jako nárůst, či úbytek napětí U .

1.2.2 Předzesilovač

Jelikož výstupní napětí mikrofonní kapsle se pohybuje v řádu desítek milivoltů, je co nejlépe za ní umístěn předzesilovač, který signál zesílí, aby bylo možné jej vést kabelem na větší vzdálenost. Delší vedení mezi kapslí a předzesilovačem by mohlo mít za důsledek větší vlastní šum mikrofonu. Předzesilovač musí být také konstruován tak, aby byl schopen zpracovat signál z kapsle, která je zdrojem s vysokou impedancí.

Předzesilovače tohoto typu jsou převážně konstruovány ve třídě A. Zesilovač tak zesiluje kladné i záporné hodnoty vstupního signálu jedním zesilovacím prvkem.



Obr. 1.4: Princip třídy A popsán na voltampérové charakteristice

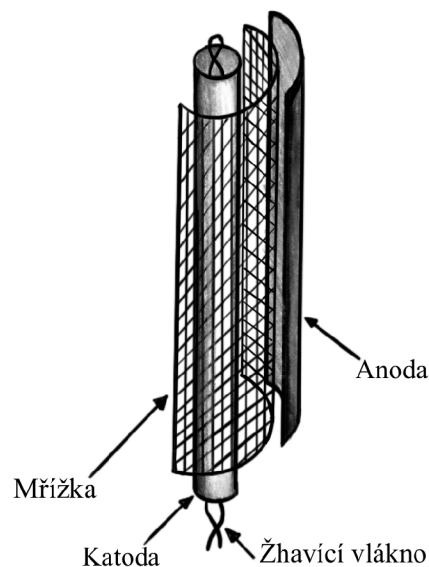
Křivku v grafu (viz obr. 1.4) chápeme jako voltampérovou charakteristiku zesilovacího prvku. Pod osou X je zakreslen vstupní harmonický signál a vpravo výstupní, zesílený signál. Charakteristika elektronek, či tranzistorů vždy vykazuje nelinearitu. Proto hledáme určitý pracovní bod a úroveň vstupního napětí, kde je charakteristika lineárně nejbližší.

Zesilovače ve třídě A mají velmi nízkou efektivitu. Chceme-li docílit co nejmenšího zkreslení signálu, pak je tato efektivita většinou ještě nižší. Oproti zesilovačům

v jiných třídách nám však třída A zaručuje absenci parazitních přechodových jevů na pomezí kladné a záporné půlvlny, způsobených tím, že každou část signálu zesiluje jiný prvek.

Princip elektronek

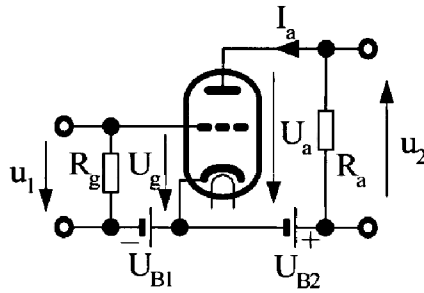
Elektronka běžně obsahuje několik elektrod uvnitř skleněné či kovové trubice, ve které je vakuum. Na obrázku 1.5 vidíme, jak může vypadat vnitřní struktura triody, tedy elektronky se třemi elektrodami. První z nich je katoda (anglicky „cathode”), která je zahřívána žhavicím vláknem (anglicky „filament”). Díky energii, kterou jí předává žhavicí vlákno, se ve vakuu z katody začnou uvolňovat elektrony. Na dvě elektrody připojíme napětí, záporný pól na katodu a kladný na anodu, pak budou elektrony anodou (anglicky „anode”) přitahovány a mezi elektrodami vznikne elektrický proud. Pokud mezi ně vložíme třetí elektrodu, mřížku (anglicky „grid”), jež bude děrovaná tak, aby jí mohly elektrony proniknout, pak můžeme napětím na této elektrodě (tzv. předpětím) řídit proud mezi katodou a anodou. Malými změnami napětí na mřížce jsme tak schopni regulovat mnohonásobně větší proud.



Obr. 1.5: Seskupení elektrod triody

Parametry elektronek, jejich význam a výpočet

Na obrázku 1.6 vidíme základní zapojení triody s vyznačenými proudy a napětími. Reálný odpor mřížky U_g je velmi vysoký, a proto při výpočtech postupujeme

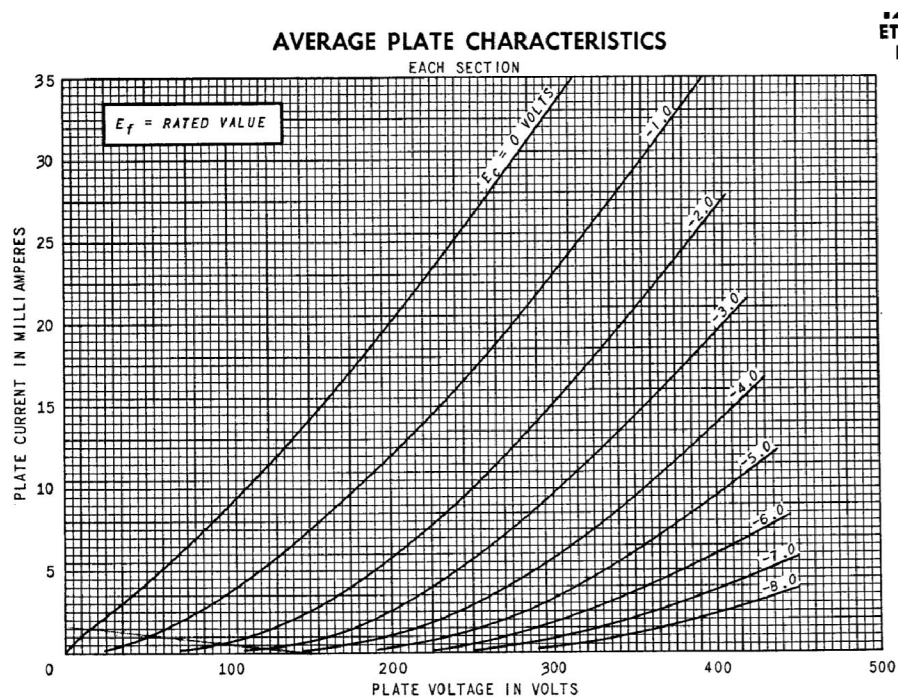


Obr. 1.6: Základní zapojení triody (převzato z [10])

tak, jako by byl proud do mřížky nulový. Jak uvádí [10], pro výsledné zesílení triody v tomto jejím zapojení platí vztah:

$$A_U = \frac{u_2}{u_1}. \quad (1.3)$$

Pro nastavení pracovního bodu elektronky nejčastěji slouží grafy anodové charakteristiky, ty jsou často poskytovány přímo výrobcem dané součástky. Graf uvádí, jaký anodový proud I_a nastane za jistého stálého anodového napětí U_a při určitých diskrétních hodnotách mřížkového napětí U_g . Příklad toho, jak takový graf vypadá, je přiložen na obrázku 1.7.



Obr. 1.7: Graf anodové charakteristiky elektronky 12AT7 (převzat z [11])

K nalezení pracovního bodu v rámci grafu se užívají zatěžovací přímky. Na ose X nám bodem této přímky bude zvolené U_a . Druhý bod přímky protínající osu Y se dle [11] nalezne s pomocí následujícího vztahu:

$$I_a = \frac{U_a}{R_a + R_k}. \quad (1.4)$$

Pro nastavení pracovního bodu je pak zásadní hodnota katodového odporu R_k . Katodovou zatěžovací přímku nalezneme pomocí Ohmova zákona tak, že některé dvě hodnoty mřížkového napětí podělíme právě hodnotou R_k , získáváme tak dva body definující přímku. Pracovní bod se nachází v průsečíku zatěžovací přímky a katodové zatěžovací přímky.

Dle [10] nám k výpočtu dynamických vlastností pro drobné změny signálů v rámci nastaveného pracovního bodu slouží tyto diferenciální parametry:

Strmost S je poměrem přírůstku anodového proudu k přírůstku mřížkového napětí. Jeho užívanou jednotkou je [mA/V].

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}, U_a = \text{konst.} \quad (1.5)$$

R_i je takzvaný vnitřní odpor a je poměrem přírůstku anodového napětí s přírůstkem anodového proudu, za konstantního mřížkového napětí.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, U_g = \text{konst.} \quad (1.6)$$

Zesilovací činitel μ je poměrem přírůstku anodového napětí a napětí mřížkového za konstantního anodového proudu.

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}, I_a = \text{konst.} \quad (1.7)$$

Průnik je pouze převrácenou hodnotou zesilovacího činitele.

$$D = \frac{1}{\mu} \quad (1.8)$$

Pro tyto diferenciální parametry pak platí takzvaná Barkhausenova rovnice.

$$S \cdot R_i \cdot D = 1 \quad (1.9)$$

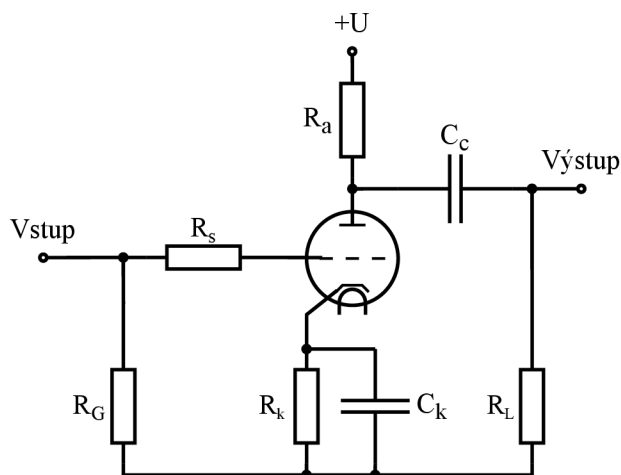
Kromě těchto parametrů se v technickém listu elektronek uvádí i typ patice, jaký elektronka užívá, napětí a proud nutný pro žhavení (typicky indexován písmenem „f” od anglického „filament”) a dále se uvádí i kapacity vznikající navzájem mezi jednotlivými elektrodami. Ty jsou nežádoucí, jelikož jsou příčinami některých parazitních jevů.

Výpočet zisku elektronky

Zisk elektronky je možné vypočítat dle vzorce převzatého z [12].

$$A_v = \frac{\mu \cdot R_{tot}}{R_i + R_{tot} + (R_k \cdot (\mu + 1))}, \quad (1.10)$$

kde R_{tot} je paralelní kombinací R_a a odporu zátěže R_L . Pro přehlednost je uveden obrázek (obr.1.8) základního zapojení elektronky:



Obr. 1.8: Základní zapojení elektronky

C_C je anodový vazební kondenzátor a C_k je mřížkový vazební kondenzátor. Slouží k oddělení stejnosměrné složky a ke kompenzaci frekvenční charakteristiky na vyšších kmitočtech.

1.2.3 Výstupní transformátor

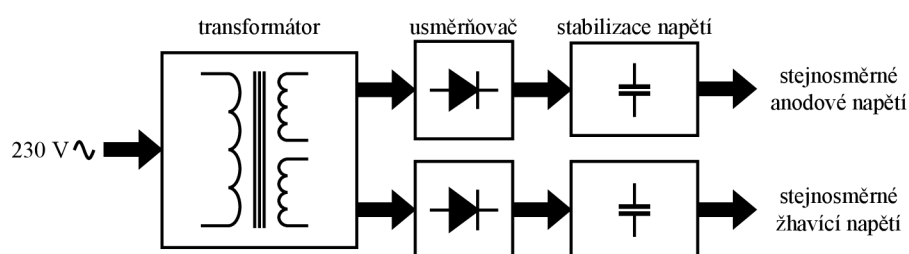
Hlavním úkolem výstupního transformátoru je impedanční přizpůsobení výstupu mikrofonu a vzájemná izolace vnitřního obvodu mikrofonu od jeho výstupu. Abychom mohli mikrofon připojit k mikrofonnímu předzesilovači a předzesilovač byl adekvátně impedančně zatížen, je požadována nízká impedance výstupu pohybující se standardně v rozmezí 50 až 600 Ω . Většina mikrofonů určená k profesionálnímu užití má impedanci v rozmezí 150 až 250 Ω . [6]

Existují i kondenzátorové mikrofony konstruované bez výstupního transformátoru. Kupříkladu u značky Neumann se jedná o celou řadu TLM (transformerless microphone). U elektronkových mikrofonů jsou však konstrukce bez výstupního transformátoru málo časté.

Samotný transformátor i to, jakým způsobem zatěžuje další stupeň zesilování, má vliv i na frekvenční charakteristiku zvuku mikrofonu. Obecně lze říci, že mikrofony s transformátorem mají většinou silnější středové pásmo a celkově jsou méně frekvenčně vyrovnané. To je však u mnohých klasických modelů žádané. Měřicí mikrofony z tohoto důvodu zpravidla užívají beztransformátorové konstrukce.

1.2.4 Napájení

Jedná se o zdroj stejnosměrného napětí. Jedna větev slouží k dodání anodového napětí a druhá pro žhavení vláken elektronky. Typická žhavicí napětí jsou 6,3 V a 12,6 V. Anodová napětí užívaná pro mikrofony se nejčastěji pohybují v rozmezí 100 až 150 V. U anodového napětí je důležité dosáhnout co nejmenšího zvlnění, jelikož má přímý vliv na zesílení předzesilovače mikrofonu.



Obr. 1.9: Blokove schéma napájení pro elektronkový mikrofon

Součástí některých napájení je i přepínač směrových charakteristik mikrofonu. Mezi napájením a mikrofonem jsou pak vedeny kabely s větším počtem žil kvůli tomu, že samotné přepínání charakteristik se musí odehrávat v blízkosti kapsle pomocí přepínacích relé.

1.3 Sledované parametry kondenzátorového mikrofonu

K popisu kvalit a vlastností mikrofonů slouží mnoho parametrů. Pro účely této práce bylo vybráno následujících 6 často uváděných parametrů.

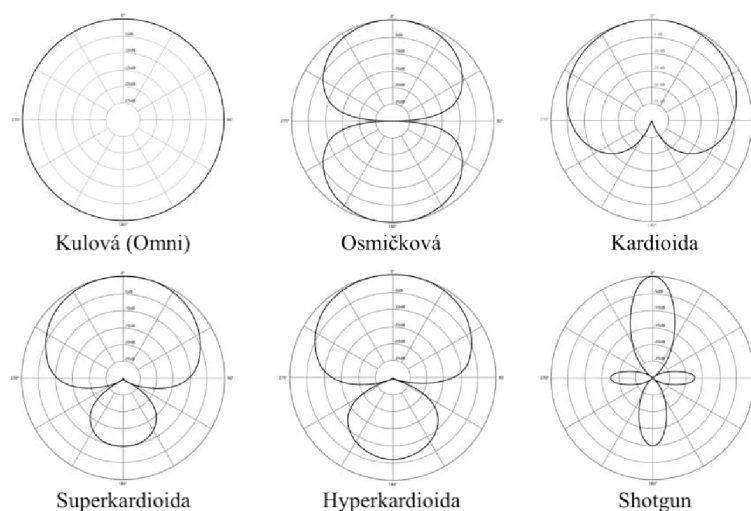
1.3.1 Citlivost mikrofonu

Citlivost vyjadřuje vztah mezi akustickým tlakem působícím na mikrofon a jeho výstupním napětím. Dle [4] je pro měření citlivosti mikrofon vystaven akustickému tlaku 1 Pa(RMS) tedy 94 dB(SPL) a výstupní napětí (mV/Pa) je měřeno pro otevřený obvod, tedy bez zátěže. Běžně se může citlivost uvádět i v přepočtu na jednotku dB vztažené k hodnotě 1 V.

1.3.2 Směrová charakteristika mikrofonu

Směrová charakteristika mikrofonu vyjadřuje jeho citlivost v závislosti na úhlu, který zaujímá jeho akustická osa s osou zdroje zvuku. Standardně výrobci uvádí měření směrové charakteristiky při frekvenci 1 kHz, případně ještě pro několik dalších frekvencí napříč slyšitelným pásmem, a to z toho důvodu, že se jedná o frekvenčně závislou charakteristiku a svou roli zde hraje i geometrie samotného mikrofonu. Jeho rozměry jsou srovnatelné s vlnovými délkami ve slyšitelném pásmu.[4]

V zásadě rozlišujeme několik základních druhů směrových charakteristik, například kardioida, kulová charakteristika či osmičková charakteristika (obrázek 1.10). Těch se u kondenzátorových mikrofonů docíluje pomocí kombinací dvou vzájemně opačně směřovaných membrán.



Obr. 1.10: Druhy směrových charakteristik [7]

Frekvenční závislost směrových charakteristik

Směrové charakteristiky reálných mikrofonů jsou závislé na frekvenci. Nejméně postižené tímto jevem jsou nižší frekvence mající větší vlnovou délku, která není srovnatelná s rozměry mikrofonu a především membrány samotné. S rostoucí frekvencí, a tedy s vlnovou délkou blížící se rozměrům mikrofonu, však dochází k větší míře difrakce zvukového vlnění na konstrukci mikrofonu. To pak v praxi zapříčiňuje, že například všesměrová charakteristika u vysokých frekvencí začne vykazovat směrovost. Pro vyjádření závislosti směrovosti mikrofonu na frekvenci se zavádí takzvaný index směrovosti:

$$ka = 2\pi a/\lambda, \quad (1.11)$$

kde a je poloměrem kruhové membrány a λ je vlnovou délkou dopadající vlny. Index vyjadřuje poměr mezi mírou signálu snímaného v akustické ose mikrofonu a integrovanou mírou snímání ve všech směrech. Hodnota indexu je udávána v dB. [4] [7]

1.3.3 Frekvenční odezva mikrofonu

Jde o úroveň výstupního signálu mikrofonu vztaženou k frekvenci akustického signálu, typicky v rozmezí 20 Hz až 20 kHz. Roli hraje i vzdálenost zdroje, zde je při měření nejčastěji užívána vzdálenost 1 m, avšak někteří výrobci přidávají i křivky bližších vzdáleností pro ukázkou míry takzvaného proximity efektu. Ten se projevuje zejména u směrově zaměřených charakteristik (kardioda, superkardioda). [4]

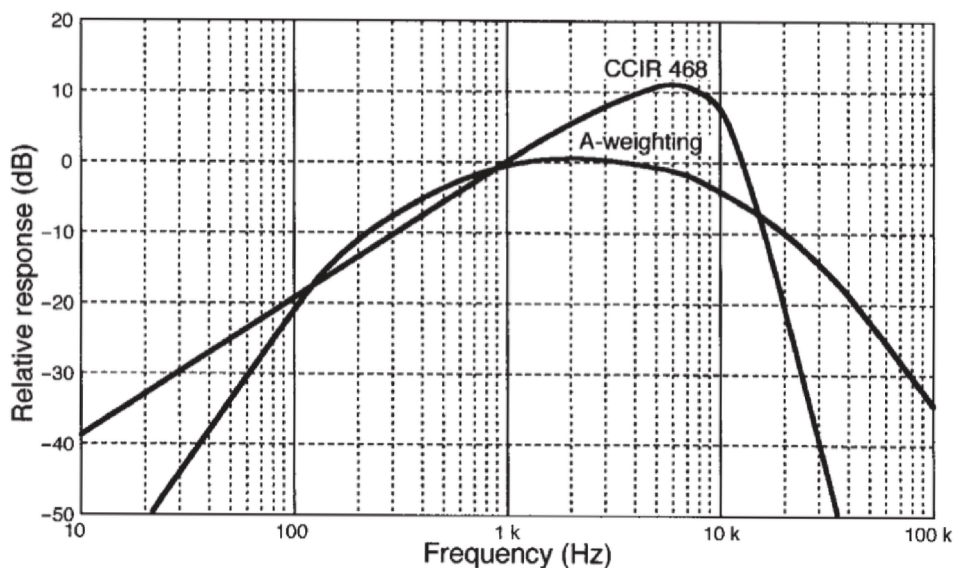
1.3.4 SNR a ekvivalentní úroveň šumu mikrofonu

Každý reálný mikrofon produkuje nežádoucí vlastní zvuk, šum. Pro popis jeho úrovně slouží SNR (odstup šumu od zvuku) a též ekvivalentní úroveň vlastního šumu (EIN).

V případě SNR se dle [8] jedná o rozdíl úrovně šumu v jednotkách dB(SPL) a akustického signálu o tlaku 1 Pa tedy 94 dB(SPL). Samotný šum je nutno měřit v tichém bezodrazovém prostředí.

Ekvivalentní úroveň šumu, jak uvádí [4], odpovídá úrovni akustického tlaku v jednotkách dB(A), který by na výstupu mikrofonu (kdyby měl pomyslnou nulovou úroveň vlastního šumu) vyprodukoval stejné elektrické napětí jako právě vlastní šum mikrofonu. Zdroj také uvádí, že tato úroveň šumu se u moderních kondenzátorových mikrofonů určených pro studiové využití pohybuje v rozmezí 7 dB(A) až 15 dB(A). O něco hůře na tom jsou mikrofony elektronkové, kde se hodnota pohybuje od 17 dB(A) do 23 dB(A).

Jelikož šum pokrývá široké frekvenční pásmo, tak má smysl pro jeho úroveň užívat váhování, které více odpovídá tomu, které frekvence jsou pro lidský sluch kritičtější. Pro tyto účely se využívají zejména dvě váhovací křivky, váhování typu A a váhování dle normy ITU-R BS.468-4 (též známo jako CCIR). Křivky jsou na obrázku 1.11 níže.



Obr. 1.11: Váhovací křivky (převzato z [4])

1.3.5 Maximální SPL

Maximální SPL (sound pressure level) dle normy IEC 60268-4 stanovuje maximální hodnotu akustického tlaku, kterou je mikrofón schopen snímat bez překročení hodnoty 0,5 % THD. Jednotkou je tedy dB(SPL).

2 Telefunken ELA M-251

2.1 Vznik a význam

Telefunken ELA M-251 je velmi známý mikrofon navržený rakouským výrobcem AKG pro značku Telefunken. Předěšlé mikrofony pod značkou Telefunken byly navrhovány německým výrobcem Neumann. Uveden na trh byl v roce 1959 a jde o velkomembránový elektronkový mikrofon se třemi měnitelnými směrovými charakteristikami, kardioidou, kulovou charakteristikou a osmičkovou charakteristikou. Konstrukčně mikrofon vychází ze svého taktéž velmi známého předchůdce AKG C12. Oba mikrofony užívají stejnou kapsli CK12. Vnitřní obvod mikrofonů už je ale poměrně odlišný. Telefunken má například otočenou polohu elektronky tak, aby vodiče mezi kapslí a elektronikou byly co nejkratší, a přepínání směrových charakteristik je zjednodušeně realizováno přepínačem na těle mikrofonu. Oproti C12 je Telefunken také snadněji servisovatelný, což byl jeden z požadavků tehdejších uživatelů. [13]

Vyráběny byly dva typy ELA M-251 a ELA M-251E, z nichž druhý byl určen pro export do USA, a proto užíval elektronku 6072 (12AY7). Z důvodu její dostupnosti se i dnes opětovně vyrábí právě exportní verze mikrofonu. Proto se i v této práci bude vycházet právě z tohoto modelu. První, evropská verze užívala elektronku AC701k, ta dnes již není dostupná.[13][14]

Pro jeho zvukové vlastnosti a užití s vokály se jedná o jeden z nejuznávanějších mikrofonů. Původní kusy se prodávají za statisíce korun. Z toho důvodu byla obnovena i produkce pod převzatou značkou Telefunken v USA. Na trhu také nalezneme velký počet napodobenin a mikrofonů z něj vycházejících. [13]

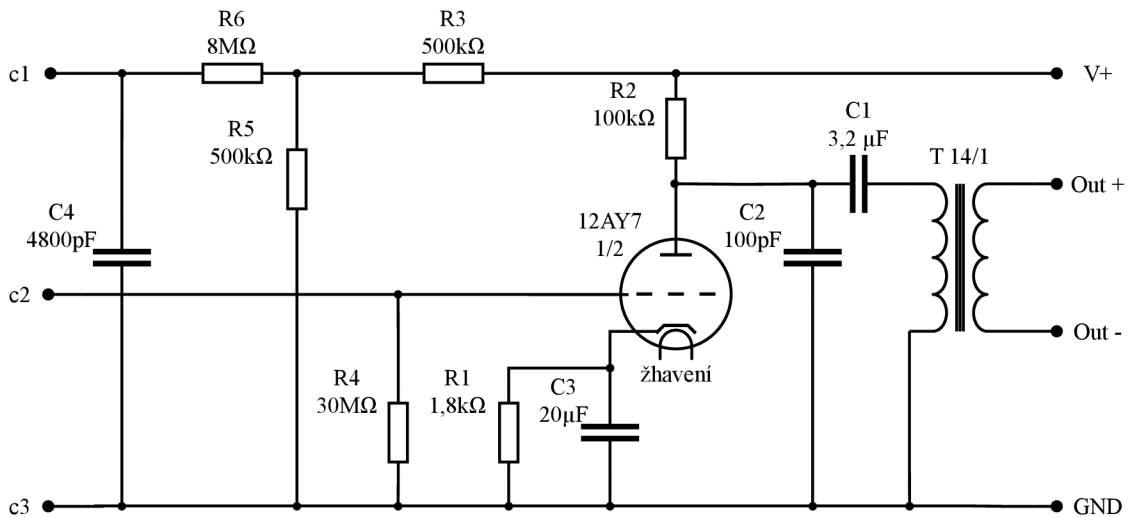


Obr. 2.1: Telefunken ELA M-251E (převzat z [15])

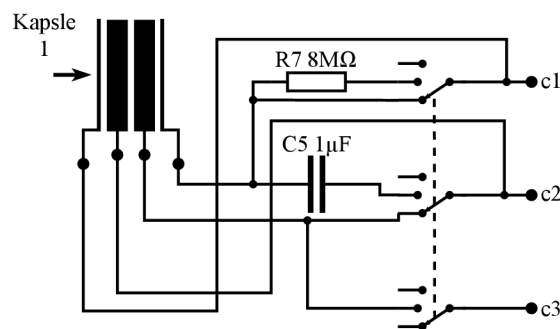
2.2 Obvod a specifikace

ELA M-251E užívá dvojitou triodu 12AY7 se zesilovacím činitelem 40. Ve schématu předzesilovače (viz obr. 2.2) lze vidět, že mikrofon užívá pouze jednu polovinu, jednu triodu. Stejnosměrné anodové napětí činí 110 V (ve schématu přiváděno na uzel V+). Žhavicí napětí je 6,3 V při 300 mA. Pracovní bod elektronky zde nastavuje anodový odpor R2 a katodový odpor R1. Mezi zemí a signálními cestami z kapsle (označeno c1 a c2) se nachází odpory R6 a R4 o hodnotách v řádu M Ω . Ty, dle [4], zaručují, že popsané změny na kapsli, zapříčiněné akustickým signálem, nebudou ovlivňovat náboj na kapsli, ale projeví se jako drobné změny napětí, tedy výchozí signál z kapsle. Vstupní impedance obvodu je tedy velice vysoká.

Výstupní transformátor dodává Telefunken značka Haufe, výstupní transformátor je označován T14/1, avšak jeho transformační poměr je 11,5:1, v obvodu je zapojen jako snižovací.



Obr. 2.2: Schéma předzesilovače Telefunken ELA M-251E



Obr. 2.3: Schéma přepínacího obvodu s kapslemi Telefunken ELA M-251E

Na obrázku 2.3 vidíme, jakým způsobem je realizováno přepínání směrových charakteristik mikrofonu. K němu slouží trojitý třípolohový přepínač. Kapsle CK12 užívá kontakt na přitlačném kroužku membrány a její zadní desky jsou navzájem izolovány.

V tabulce 2.1 jsou uvedeny měřené parametry udávané současným výrobcem Telefunken Elektroaustik:

Tab. 2.1: Parametry udávané výrobcem [15]

Frekvenční rozsah	20 Hz - 20 kHz, ± 3 dB
Citlivost	17 mV/Pa, ± 1 dB
THD při 1 kHz, 1 Pa (zesilovače)	<0,2%
Výstupní impedance	200 Ω
Maximální SPL (při 1% THD)	130 dB
SNR	85 dB(A)
Vlastní šum mikrofonu	9 dB(A)

Vezmeme-li v úvahu, že se jedná o elektronkový mikrofon, tak ve srovnání s hodnotami udávanými [4] je hladina vlastního šumu mikrofonu překvapivě nízká. Současný výrobce však neuvádí směrové charakteristiky.

Nahlédneme-li do jiných údajů měření než těch, co uvádí dnešní výrobce, jako například těch, co jsou uvedeny na [14], hodnoty některých parametrů se od těch udávaných výrobcem značně liší. [14] například uvádí hodnotu vlastního šumu mikrofonu 16 dB(A), či citlivost 12 mV/Pa.

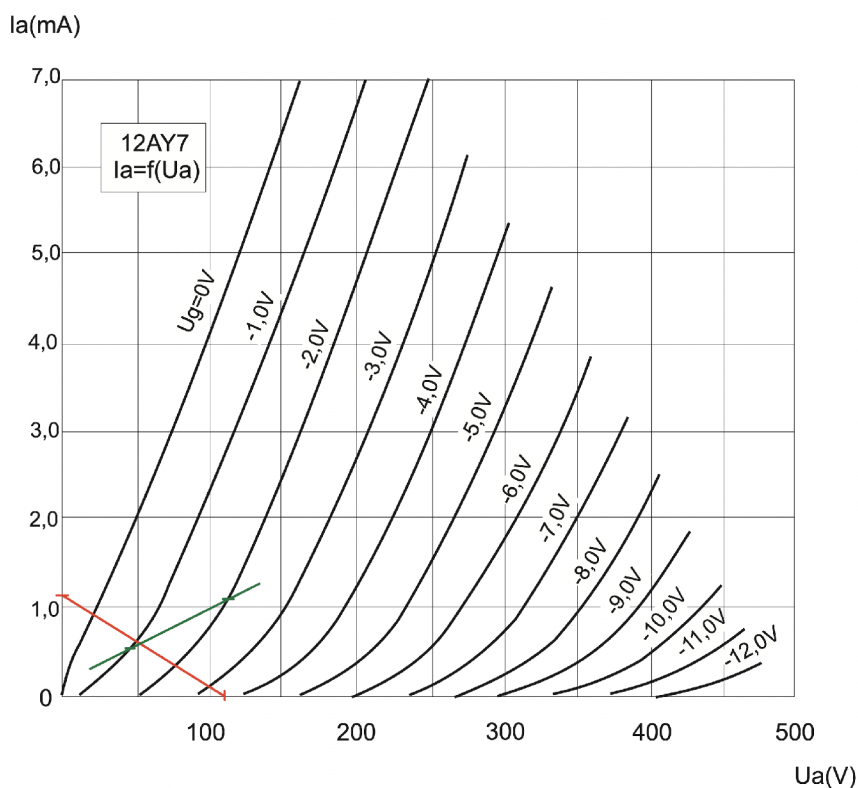
3 Návrh a simulace řešení

Chceme-li obvod mikrofону rozšířit o malomembránovou kapsli, je nejprve nutné zhodnotit, zdali je to možné a za jakých podmínek. Mezi membránami chceme zajistit plynulé přepínání, ideálně tak, aby bylo docíleno srovnatelně silného výstupního signálu za působení určitého akustického tlaku, tedy srovnatelné citlivosti.

Pracujeme s předpokladem, že rozdíl v hodnotách výstupního signálu malé a velké membrány nebude tak velký, aby bylo nutné přidávat do signální cesty další zesilovací prvek, či silnější z těchto měničů nějakým způsobem tlumit. To je ideální i v rámci zachování charakteru a kvality zvuku mikrofону, který by měl být co nejbližší své předloze. Pak zbývá prověřit možnost sladění za pomoci nastavení rozdílného pracovního bodu elektronky mikrofону pro každý z měničů.

3.1 Výchozí pracovní bod

Dle postupu zmíněného v teoretické části práce lze v grafu anodové charakteristiky vynést křivky udávající nastavení pracovního bodu, v němž trioda 12AY7 pracuje (viz obr. 3.1). Užita bude elektronka od výrobce JJ Electronic, charakteristika je tedy zakreslena do grafu dodávaného přímo výrobcem.



Obr. 3.1: Pracovní bod triody mikrofону ELA M-251E (graf převzat z [16])

V grafu na obrázku 3.1 je zakreslena červeně zátěžová křivka a zeleně katodová zátěžová křivka, jejich průsečíkem je pak výsledný pracovní bod. Při anodovém napětí 110 V je prostor pro posuv pracovního bodu směrem nahoru (ve směru osy Y) po zátěžové křivce poměrně malý.

3.2 Simulace

Možnost kompenzace rozdílného výstupu malé a velké kapsle posunutím pracovního bodu za pomoci změny velikosti katodového odporu by však vzhledem k tomu, v jak nízkých hodnotách se výstupní napětí kapslí pohybuje, mohlo být reálné. Tento předpoklad zkouší ověřit následující simulace.

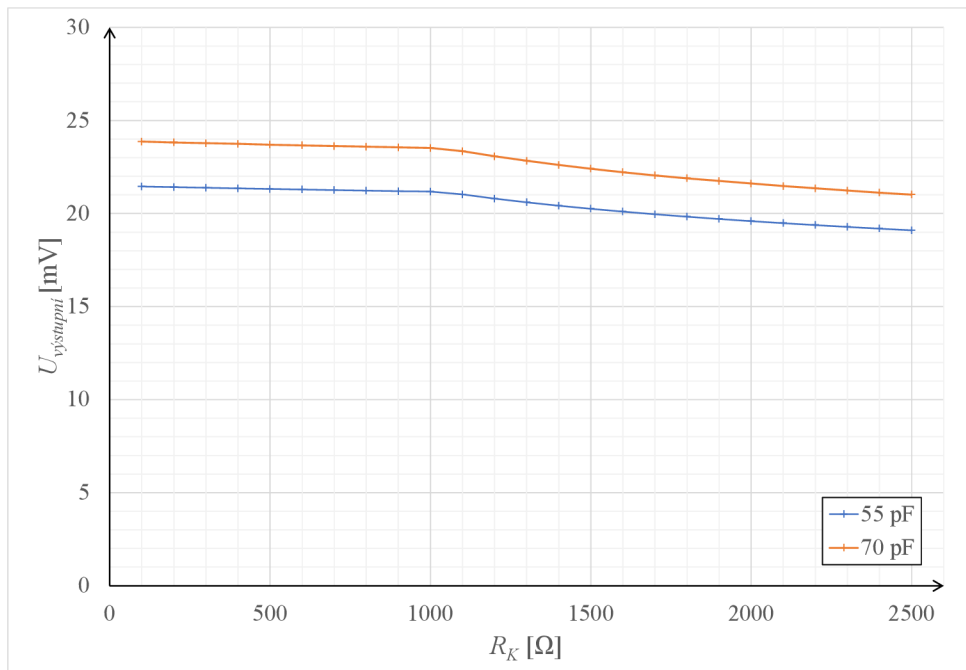
3.2.1 Popis

Pro simulace byl užit program LTspice. Tento program neobsahuje modely pro simulaci elektronek. Model pro simulaci elektronky 12AY7 byl tedy přebrán z [17]. Simulováno bylo celé zapojení mikrofону, jak je na obrázku 2.2.

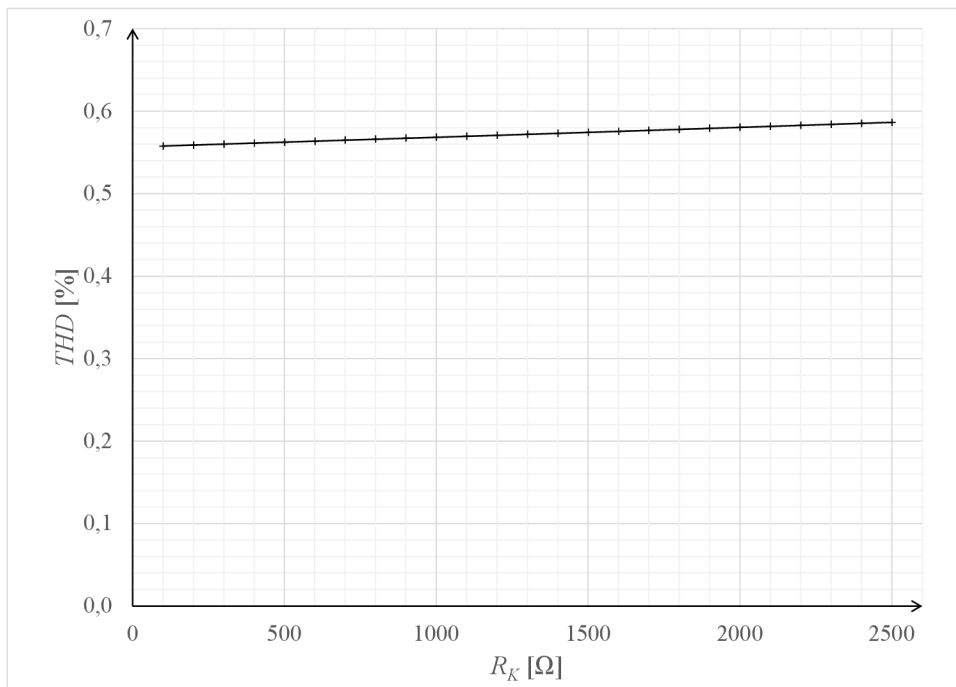
Samotná kapsle byla zjednodušeně simulována jakožto zdroj napětí s harmonickým průběhem 1 kHz v sériovém zapojení s kondenzátorem představujícím změřenou kapacitu kapslí, které budou užity ke konstrukci mikrofону. Pro stavbu mikrofону byla vybrána velkomembránová kapsle CTS-12 vyrobená společností Takstar a malomembránová RODE NT45-C. U obou kapslí bohužel nejsou informace dodané výrobcem dostatečné pro odvození rozdílu hodnot jejich výstupního napětí. Proto jediný parametr, který můžeme pro kapsli v simulaci měnit, je její kapacita C_i . V případě malé membrány je C_i rovna 55 pF a u velké je 70 pF. Pro hodnotu výstupního harmonického signálu zdroje nahrazujícího kapsli bylo užito amplitudy 12 mV_{rms}, což je hodnota, již uvádí [4] pro malou membránu o velikosti půl palce, při akustickém tlaku 1 Pa. Jakákoli hodnota pro výstupní signál velké membrány se nepodařila najít.

Pro zjištění vlivu změny katodového odporu na THD byl simulován obvod mikrofonního předzesilovače s připojeným generátorem harmonického signálu 1 kHz o amplitudě 12 mV_{rms} a výsledný signál za předzesilovačem byl snímán před výstupním transformátorem.

3.2.2 Výsledky simulace



Obr. 3.2: Graf závislosti výstupního napětí na velikosti katodového odporu



Obr. 3.3: Graf závislosti THD na velikosti katodového odporu

Na grafu v obrázku 3.2 je závislost výstupního napětí na velikosti katodového odporu pro kapacity obou kapslí. Vidíme, že velikost katodového odporu má na výsledné zesílení vliv.

Uvážíme-li však, že rozdíl kapslí byl v rámci simulace redukován pouze na změnu jejich kapacit, a že reálné kapsle budou nejspíše při daném akustickém tlaku vykazovat i rozdílné výstupní napětí, pak zůstává otázkou, bude-li v realitě tato úprava pro srovnání citlivosti dostačující.

V grafu (viz obr. 3.3) pak vidíme výsledek simulace mající za cíl zjištění dopadu změny katodového odporu na THD předzesilovače. Vidíme, že změna vzniklá vlivem katodového odporu je velmi malá a pakliže bychom jeho odpor zmenšovali, pak THD klesá též. Pro tak malé výstupní signály, jako generuje mikrofonní kapsle, patrně nedochází k limitaci a pracovní bod elektronky posouváme do oblasti, kde se chová více lineárně.

3.2.3 Další možnosti úpravy pracovního bodu

Na nastavení pracovního bodu a tedy na výsledné zesílení má vliv i anodový odpor. Dle [10] při základním zapojení elektronky pro zesílení A_U platí vztah:

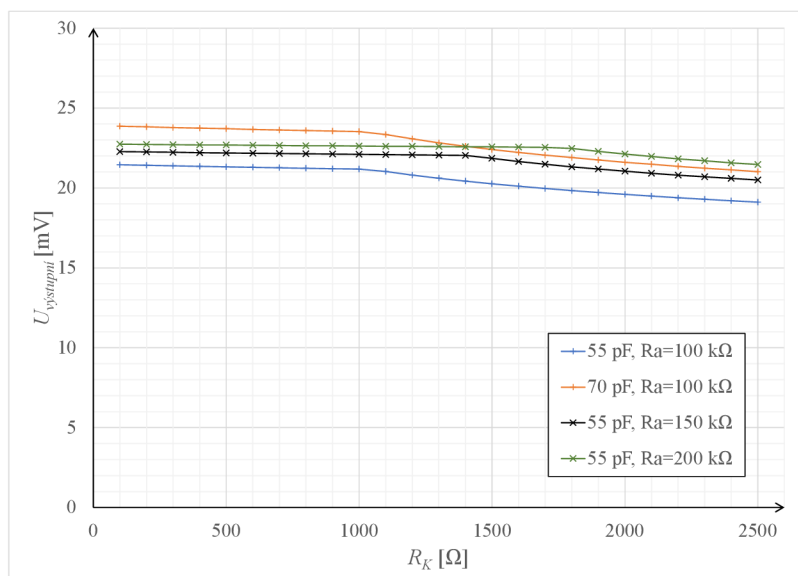
$$A_U = \mu \cdot \frac{R_a}{R_i + R_a}. \quad (3.1)$$

Ve výchozím stavu našeho zapojení ($R_i = 22,8 \text{ k}\Omega$, $R_a = 100 \text{ k}\Omega$ a $\mu = 40$) je pak výsledek tohoto vztahu následující:

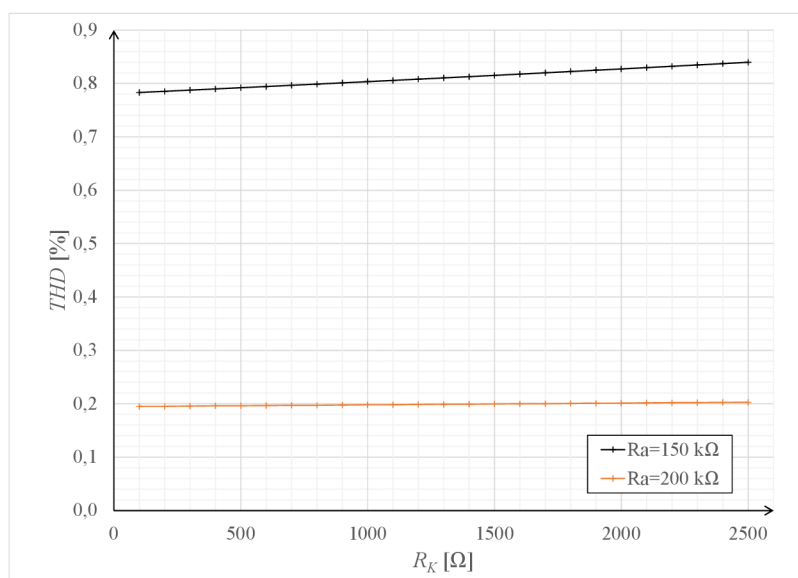
$$A_U = 40 \cdot \frac{100}{22,8 + 100} = 32,6. \quad (3.2)$$

Zvýšením hodnoty anodového odporu na $150 \text{ k}\Omega$ pak dostáváme hodnotu zesílení 34,7. A při odporu $200 \text{ k}\Omega$ je pak zesílení rovno 35,9. S dalším navýšením hodnoty anodového odporu už se však nárůst hodnoty zesílení rychle zmenšuje a navyšování odporu tak pozbývá většího smyslu.

Vliv anodového odporu na zesílení v našem zapojení byl tedy opět ověřen simulací, která tento předpoklad potvrdila. Výsledek simulace je vyneseno do grafu společně s předešlými výsledky, aby byl patrný celkový rozdíl výsledného napětí, jehož jsme schopni takto docílit.



Obr. 3.4: Graf závislosti výstupního napětí na velikosti katodového odporu pro různé hodnoty anodového odporu



Obr. 3.5: Graf závislosti THD na velikosti katodového odporu pro různé hodnoty anodového odporu

V grafu (viz obr.3.4) vidíme, jaký vliv má na výsledné výstupní napětí změna anodového odporu. Při jeho hodnotě 200 kΩ jsme při hodnotách katodového odporu v rozmezí 1,5 kΩ až 2,5 kΩ dle simulace schopni původní výstupní napětí velké kapsle převýšit a za našich předpokladů tak docílit stejné citlivosti pro obě kapsle.

Na obrázku 3.5 je pak graf velikosti THD v závislosti na katodovém odporu, opět pro dvě různé velikosti odporu anodového (150 kΩ a 200 kΩ). Vidíme, že při

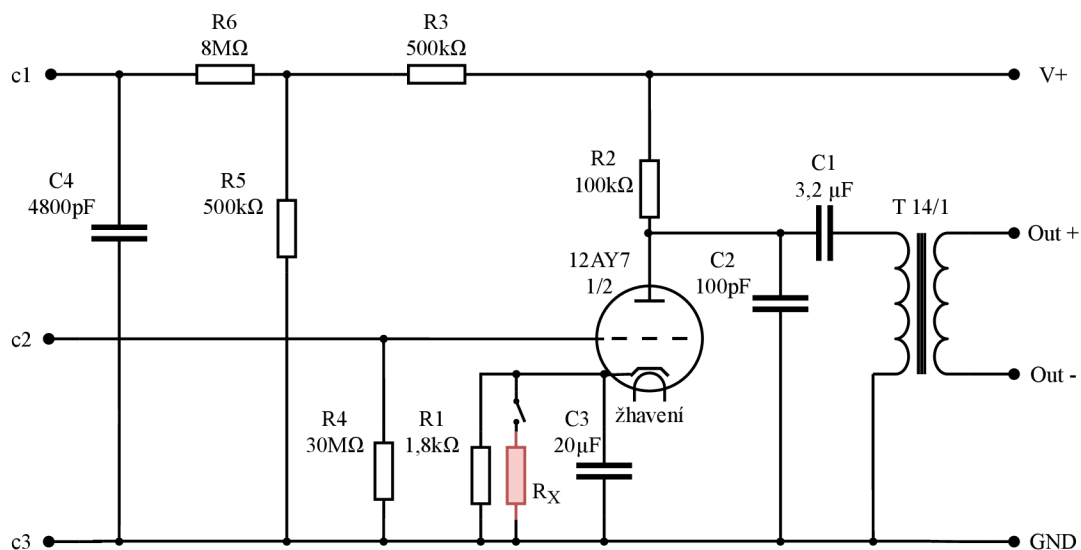
hodnotě $R_a=150\text{ k}\Omega$ hodnota THD celkově vzrostla. Při hodnotě $200\text{ k}\Omega$ však došlo k výraznému poklesu. Zde již je možné, že narážíme na jisté limity simulace. Ty mohou být zapříčiněny například nedokonalostí užitého modelu elektronky 12AY7.

3.3 Fyzické provedení úprav

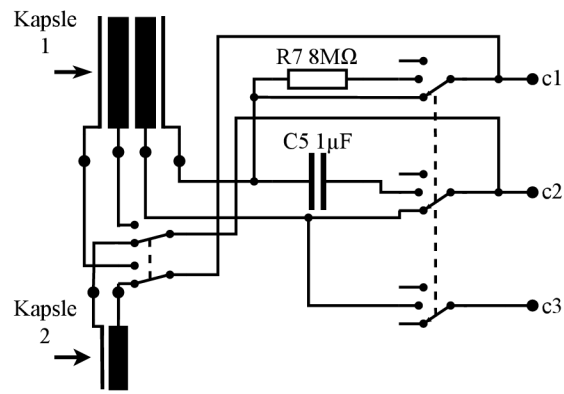
Budeme-li pracovat s předpokladem, že našeho cíle lze docílit úpravami pracovního bodu elektronky popsanými výše, pak jednotlivé hodnoty odporů a též i samotné kapsle je třeba fyzicky přepínat. Toho můžeme docílit buďto spínači, které by byly umístěny na těle mikrofonu, či spínacími relé umístěnými uvnitř jeho těla. Samotné přepínání by bylo možné řídit spínacím napětím, jehož ovládání by mohlo být umístěno na napájení mikrofonu. Toto řešení by bylo v praxi praktičtější. Záležet však bude na místě, které by tato relé zabírala uvnitř mikrofonu a také na ceně tohoto řešení. Které řešení bude užito, bude vyhodnoceno až při samotné konstrukci.

Během konstrukce by pro nalezení ideálních hodnot rezistorů mohly být užity rezistory laditelné. Ty by po nalezení hodnot byly nahrazeny pevnými rezistory, či jejich složením o dané hodnotě.

Níže uvedená schémata ukazují úpravy výchozího schématu. Rezistor R_X s předem neznámou hodnotou je ve schématu vyznačen červenou barvou. Sepnutím spínače lze pak měnit výchozí hodnotu katodového odporu na hodnotu paralelní kombinace výchozího odporu a odporu přidaného.



Obr. 3.6: Schéma předzesilovače s přepínáním dvou různých hodnot katodového a anodového odporu



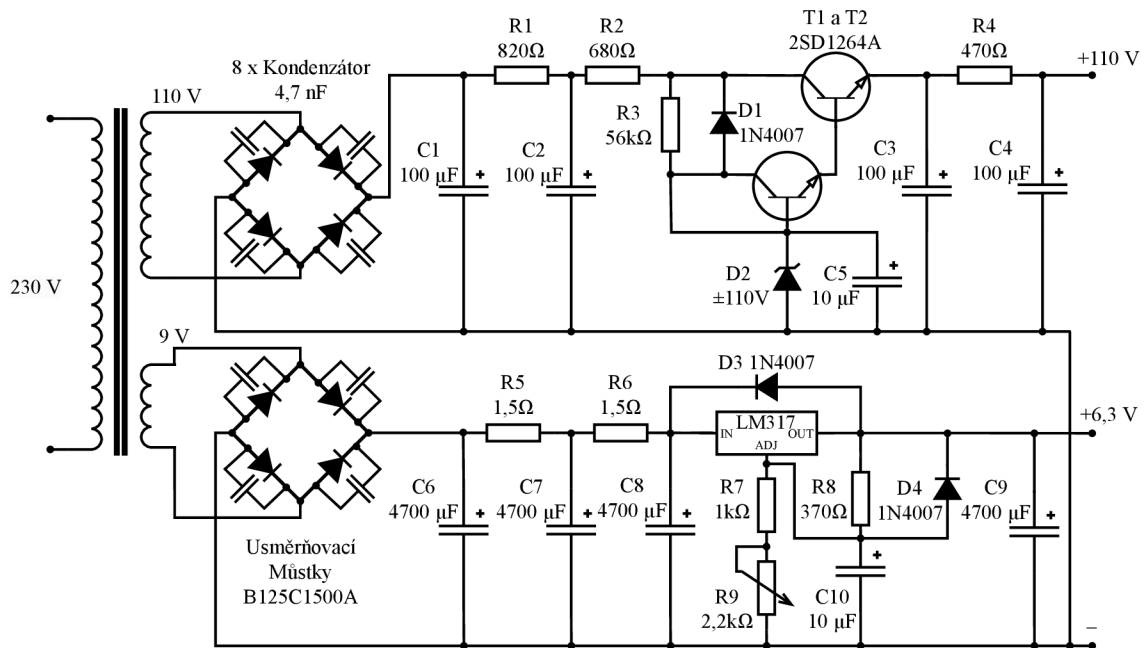
Obr. 3.7: Přepínací obvod se dvěma kapslemi

4 Realizace navrženého řešení

4.1 Obvod a realizace napájecího zdroje

Stavba napájecího zdroje nebude přímo vycházet z originálního návrhu z éry AKG, a to zejména kvůli nedostupnosti součástí, jako je například napájecí transformátor, či tranzistor sloužící pro stabilizaci napětí jeho žhavicí větve. Na zvukový projev mikrofону má napájení minimální vliv, důležité však je, aby do mikrofону nevnášelo rušení a aby byla jeho napětí stabilní a nedocházelo k jejich zvlnění.

Dostupnost součástek pro takto specifické zařízení je poměrně omezená a jedinou variantou napájecího transformátoru, již se podařilo sehnat, je zakázkově vinutý transformátor Tezo 6874001 pro malého českého výrobce mikrofónů navinutý firmou TBP Transformátory Blatná. Transformátor disponuje dvěma sekundárními vinutími 9 V/0.6 A a 110 V/0.05 A. Nebylo tak nutné se uchýlovat k možnosti konstrukce se dvěma oddělenými transformátory pro dvě větve, které by vedlo k větším rozměrům celého zařízení.



Obr. 4.1: Schéma navrženého napájecího zdroje

Výsledný užitý návrh vidíme na obrázku 4.1 výše. Větev poskytující žhavicí napětí je postavena na konvenčním zapojení stabilizátoru LM317. Zapojení bylo nejdříve odsimulováno v LTspice, aby bylo optimalizováno pro výstupní napětí užitého transformátoru. Větev pro anodové napětí užívá dvou totožných NPN tranzis-

torů, z nichž jeden je zapojen jako dioda pro teplotní kompenzaci. Obvod byl taktéž odsimulován pro ověření jeho vlastností.

Součástí napájecího zdroje je pak i přepínač sloužící k přepínání směrových charakteristik a též i k přepínání mezi dvěma kapslemi. Přepínač přivádí spínací napětí na žíly kabelu propojujícího napájení s mikrofonem. Samotné přepínání je pak realizováno v těle mikrofonu pomocí relé.

Obvod je zhotoven na plošném spoji, jehož návrh je zahrnut v příloze této práce.



Obr. 4.2: Pohled do vnitřku napájecího zdroje

4.2 Realizace mikrofonu

4.2.1 Konstrukce obvodu

Při výrobě mikrofonu byl užit ručně leptaný plošný spoj, který však sloužil převážně k držení pájecích oček, na kterých byl obvod konstruován. Tato možnost byla zvolena z důvodu případné snadnější modifikace obvodu. V horní části obvodové desky se nachází relé odpovědná za přepínání konfigurací kapslí a též i spínání přídatného katodového odporu dle schématu na obrázku 3.6 a 3.7. Samotné zapojení relé vychází z [18] a je rozšířeno o dvě další relé právě pro přepínání na malou kapsli a přepínání katodového odporu (D.1). V co nejmenší možné vzdálenosti je pak umístěna elektronka, tím se zkracuje délka vodičů z výstupů kapslí, z důvodu minimalizace případného nežádoucího rušení. Užit byl stříbrný vodič s teflonovou izolací jinak určený pro gramofonové přenosky. Ve střední části desky se nachází na straně jedné

elektronka umístěná v porcelánové patici a na druhé straně desky je pak realizován obvod předzesilovače. V dolní části se nachází výstupní transformátor a rozměrný kondenzátor C1. Výstupní transformátor je ručně vinutý VM14 výrobcem Moby Transformers a jedná se o kopii originálního Haufe T14. Kondenzátor C1 se nachází přímo v signální cestě předzesilovače a z toho plyne, že na kvalitu zvuku má vysoký vliv. Proto jde o fóliový kondenzátor s naddimenzovaným jmenovitým napětím (250 V) ve snaze o minimalizaci jeho parazitního odporu.

4.2.2 Mechanická konstrukce

Vnitřní konstrukce mikrofону se skládá ze dvou soustružených kovových kroužků, mezi nimiž jsou distanční sloupce. Tento celek tvoří obvodovou komoru. Na horním z kroužků je pak držák kapslí, který byl zhotoven pomocí 3D tisku. Obvodová deska je na distančních sloupcích držena pomocí mosazných oček, která jsou k desce přiletována. Plášť mikrofону tvoří titanová trubice o průměru 50 mm. Do ní byla vyfrézována okénka, která tvoří koš pro kapsle mikrofону. Koš je dále tvořen ochrannou nerezovou mřížkou. Horní a spodní podstavy mikrofону jsou vysoustruženy z ovangkolového dřeva, které vyniká svou tvrdostí, ale zároveň má jakožto materiál vhodné vlastnosti pro útlum případných rezonancí titanové trubice. Horní z podstav je stíněna hliníkovou fólií.

Vnitřní konstrukce je uvedena na obrázku 4.3 níže. Fotografie mikrofону s vnějším pláštěm jsou součástí příloh (obr. B.1).



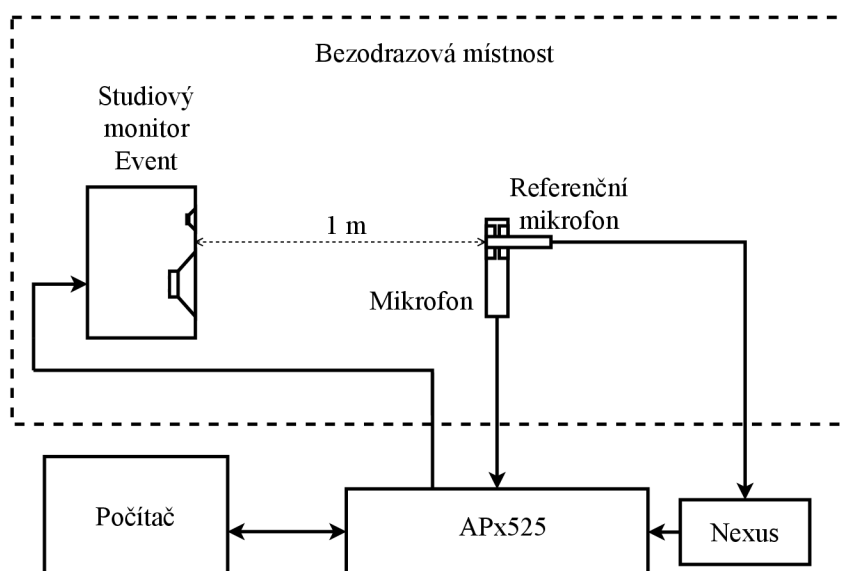
Obr. 4.3: Vnitřní konstrukce mikrofону z různých úhlů

5 Měření vlastností mikrofonu

5.1 Měřicí zařízení

5.1.1 Konfigurace pro měření kmitočtových charakteristik

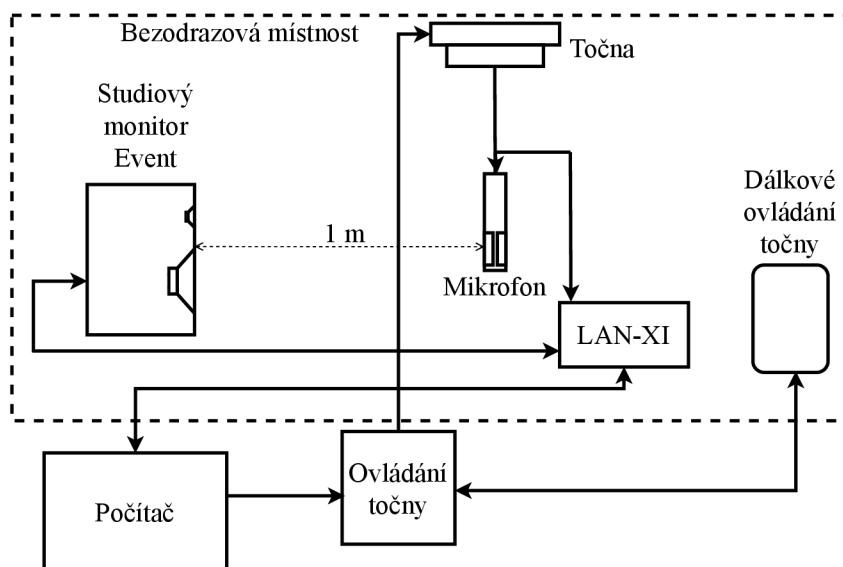
Veškerá měření probíhala v bezodrazové místnosti. K měření kmitočtových charakteristik byl užit analyzátor Audio Precision APx525, kondiční zesilovač Brüel & Kjaer Nexus, referenční mikrofon Brüel & Kjær 4189, aktivní studiový monitor Event 20/20 BAS V3. Se stejnou konfigurací byl měřen i EIN, pouze referenční mikrofon byl vyměněn za mikrofon značky Gras s nižším vlastním šumem. Mikrofony byly umístěny v referenční ose reproduktorové soustavy ve vzdálenosti jednoho metru.



Obr. 5.1: Schéma konfigurace pro měření kmitočtových charakteristik

5.1.2 Konfigurace pro měření směrových charakteristik

Měření směrových charakteristik mikrofonu probíhalo za užití měřicího systému Brüel & Kjær LAN-XI s příslušným softwarem Pulse LabShop. Mikrofon byl opět buzen studiovým monitorem Event 20/20 BAS V3. Pro rotaci mikrofonu byla užitá točna Brüel & Kjær Turntable System Type 9640. Mikrofon byl umístěn v referenční ose reproduktorové soustavy ve vzdálenosti jednoho metru. Krok úhlu otáčení byl nastaven na 1° .



Obr. 5.2: Schéma konfigurace pro měření směrových charakteristik

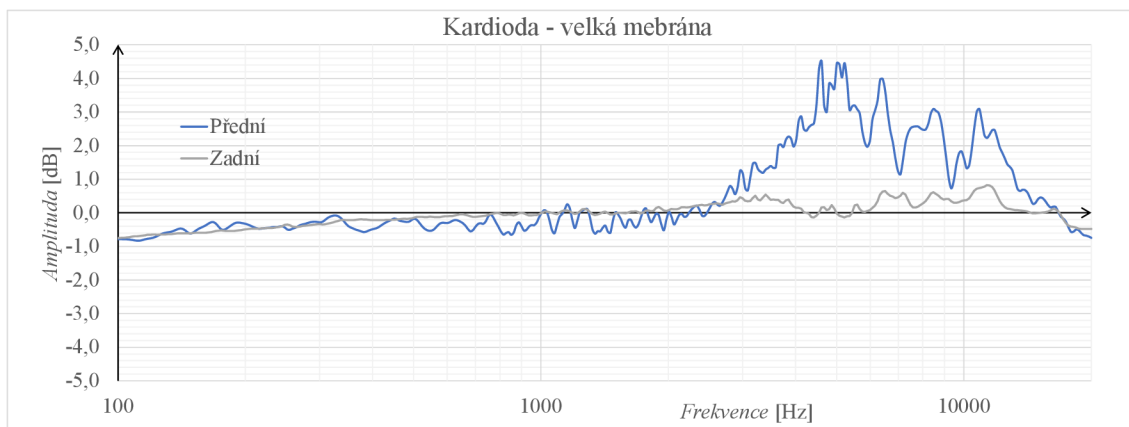
5.2 Výsledky měření

Základní parametry, jež bylo možné změřit za podmínek daných laboratoří, uvádí následující tabulka 5.1. Dále pak následují vynesené grafy kmitočtových a směrových charakteristik.

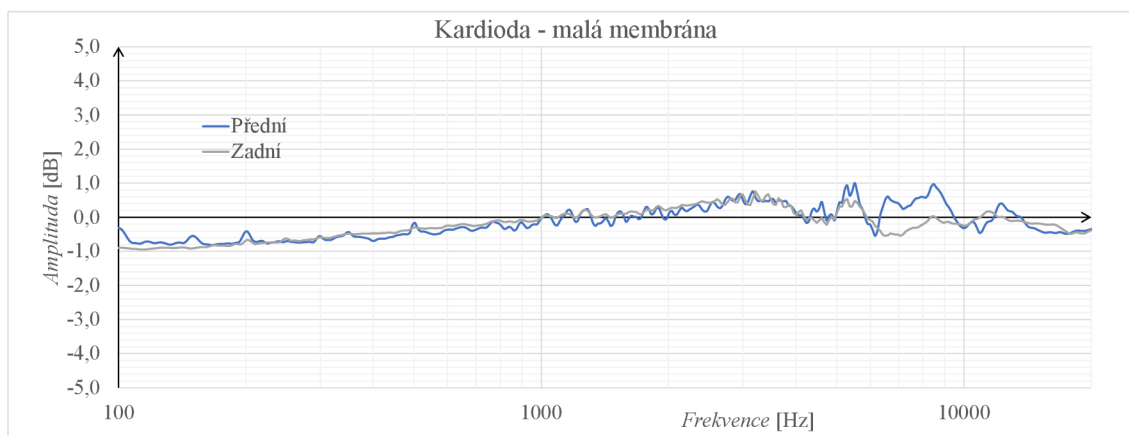
Tab. 5.1: Změřené parametry vyrobeného mikrofonu

Citlivost (Kardioida - velká membrána)	21,8 mV/Pa
Citlivost (Osmičková - velká membrána)	12,3 mV/Pa
Citlivost (Omni - velká membrána)	11,7 mV/Pa
Citlivost (Kardioida - malá membrána)	7,4 mV/Pa
Výstupní impedance	200 Ω
SNR	72 dB(A)
Vlastní šum mikrofonu	22 dB(A)

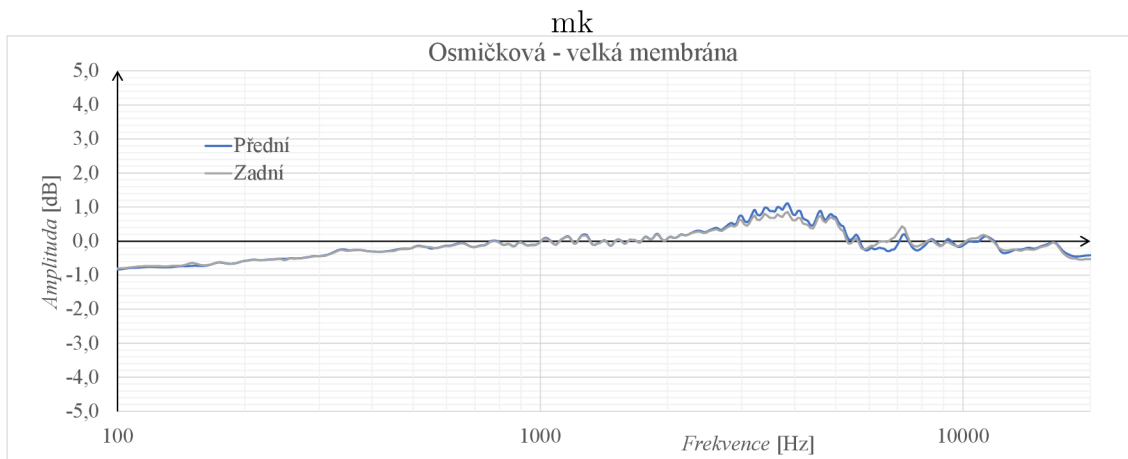
5.2.1 Kmitočtové charakteristiky



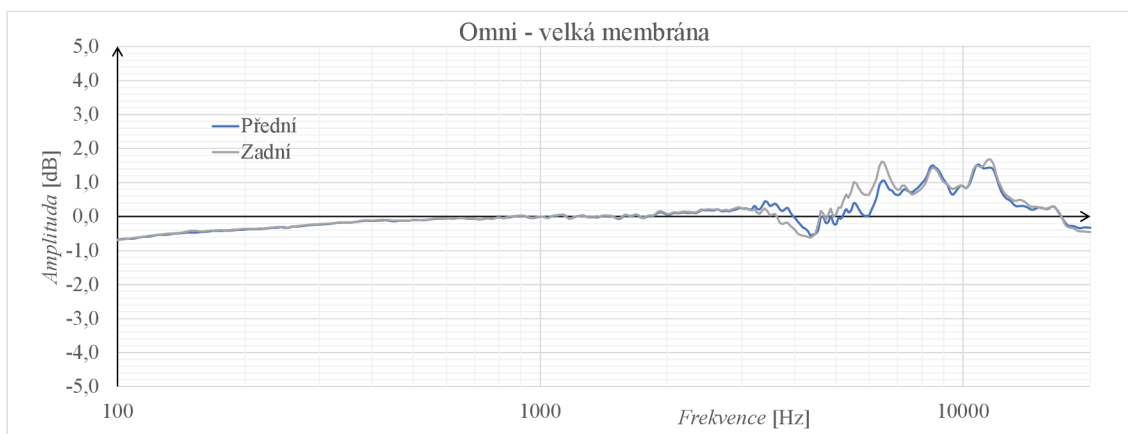
Obr. 5.3: Graf kmitočtové charakteristiky - kardioida, velká membrána



Obr. 5.4: Graf kmitočtové charakteristiky - kardioida, malá membrána

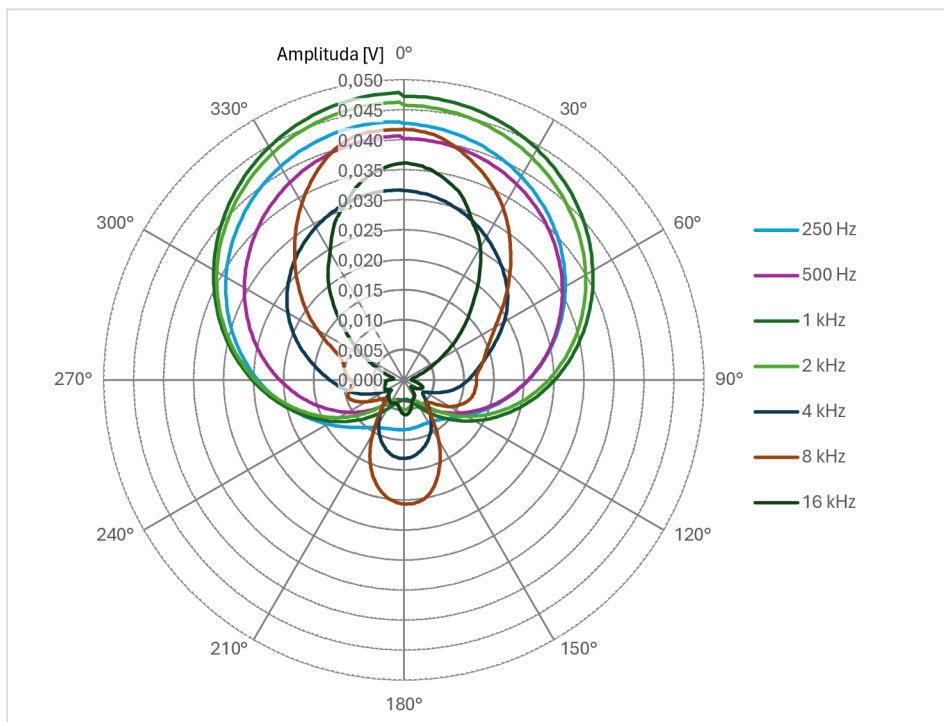


Obr. 5.5: Graf kmitočtové charakteristiky - osmičková, velká membrána

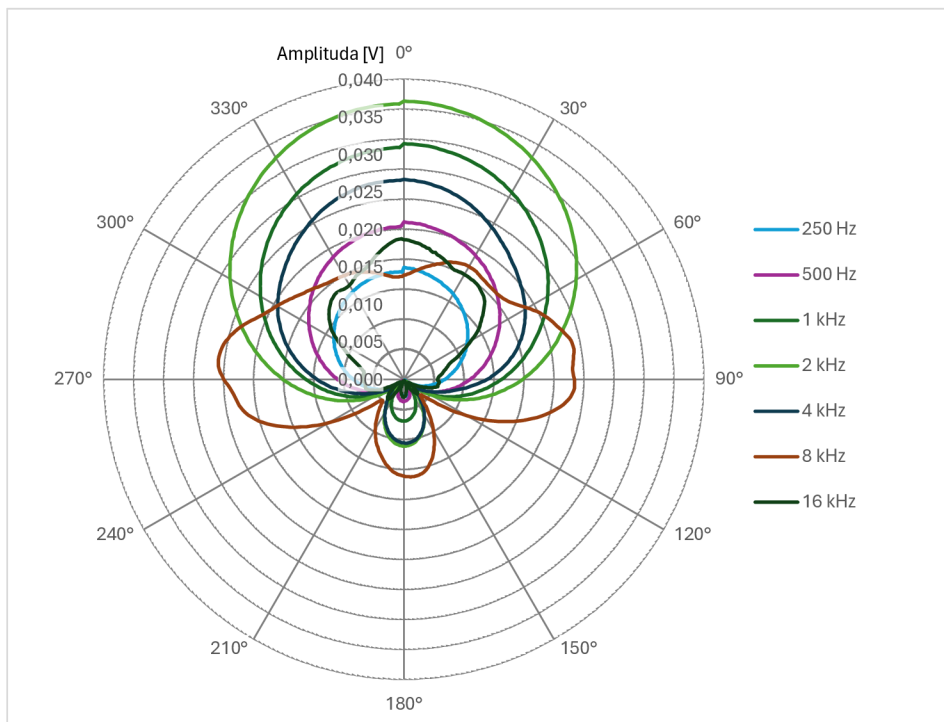


Obr. 5.6: Graf kmitočtové charakteristiky - omni, velká membrána

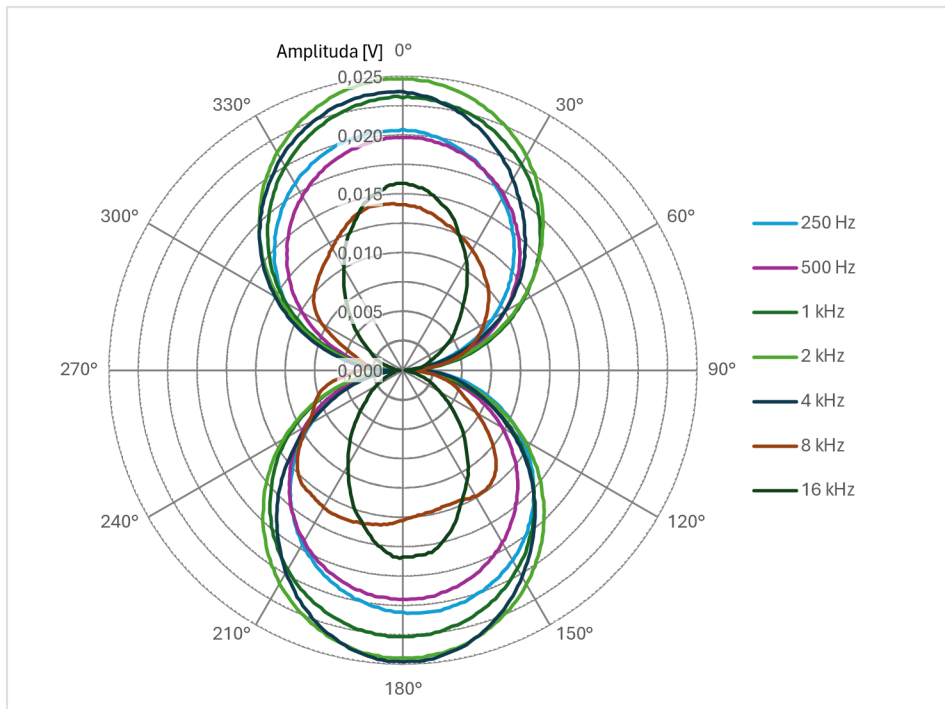
5.2.2 Směrové charakteristiky



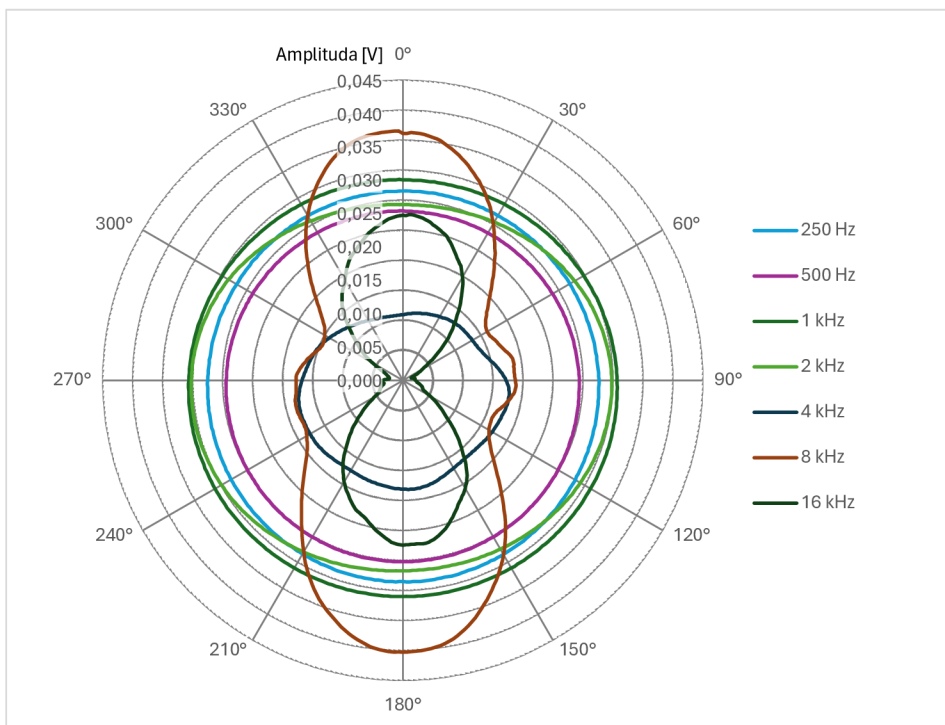
Obr. 5.7: Graf směrové charakteristiky kardioidy velké membrány



Obr. 5.8: Graf směrové charakteristiky kardioidy malé membrány



Obr. 5.9: Graf osmičkové směrové charakteristiky velké membrány



Obr. 5.10: Graf kulové (omni) směrové charakteristiky velké membrány

5.2.3 Hodnocení výsledků měření

Citlivost mikrofону

Co se citlivostí mikrofónu pro jednotlivé směrové charakteristiky a též pro malou kapsli týče, tak nejvyšší citlivost vykazuje velká membrána v kardioidním nastavení a to 21,8 mV/Pa. Hodnota citlivosti pro osmičkovou a kulovou charakteristiku klesá k hodnotám blízkým 12 mV/Pa. Citlivost malé membrány je pak 7,4 mV/Pa a to při připojení rezistoru R_X o hodnotě 180 Ω paralelně k tomu katodovému. Výsledný katodový odpor je pak roven 164 Ω . Navržená úprava je tedy nedostatečná a její účinek nebyl patrný. Citlivost při odpojení paralelního rezistoru zůstala prakticky stejná.

Chtěli bychom-li tedy kompenzovat rozdíl mezi citlivostmi vzhledem k některé z citlivostí dosahované velkou membránou, pak by z důvodu jejich většího vzájemného rozdílu bylo nejspíše nutné navrhnout jiné řešení než posun pracovního bodu elektronky. Na polohu pracovního bodu má vliv i anodový odpor, dle simulací by však ani jeho změna na kompenzaci rozdílu citlivosti nebyla dostačující. Pro změnu anodového odporu by také muselo být zvoleno jiné relé, které by mělo dostatečné maximální napětí. Možným řešením, které by nevyžadovalo větší změny obvodu, či užití aktivních prvků, by mohla být úprava výstupního transformátoru. Ten, jak již bylo popsáno dříve, je zapojen ve snižovacím poměru. Mohlo by se tedy jednat o výstupní transformátor s dvěma různými primárními vinutími, kterými bychom měnili transformační poměr a tedy i výstupní úroveň signálu. Toto řešení by však s našimi možnostmi bylo finančně nákladné.

To, že výsledky simulací nebyly v realitě potvrzeny, může být zapříčiněno tím, že užitý simulační model elektronky byl vytvořen na základě reálného kusu podrobeného měřením. Parametry této elektronky se mohly více či méně rozcházet s parametry elektronky užití ve vyrobeném mikrofónu. Taktéž model elektronky nemusí zohledňovat některé její reálné vlastnosti, například v jejích krajních pracovních nastaveních.

V porovnání s originálním mikrofónem, jehož citlivost je udávána 17 mV/Pa, je citlivost vyrobeného mikrofónu pro kardioidní charakteristiku o 5 mV/Pa vyšší. Lze se také domnívat, že mezi jednotlivými směrovými charakteristikami bude, stejně jako u mikrofónu vyrobeného, docházet ke srovnatelným změnám citlivosti v jeho referenční ose i v případě originálu a to navzdory tomu, že výrobce udává pouze jednu hodnotu.

Vlastní šum mikrofonu

Změřený vlastní šum vyrobeného mikrofonu (22 dB(A)) je hodnota, která není pro elektronkový mikrofon překvapivá. Podobnou míru šumu vykazují kupříkladu i některé modely značky Neumann. Oproti hodnotě udávané dnešním výrobcem Telefunken je však tato hodnota vyšší. Měření mikrofonu ELA M-251E uváděná v [13] však udávají i hodnotu 16 dB(A). Vyšší hodnota vlastního šumu vyrobeného mikrofonu může být zapříčiněna například větší vzdáleností mezi kapslemi a obvodem předzesilovače a též i zařazením relé přepínačů, či kvalitou užitých odporů produkujících tepelný šum. Dá se také očekávat, že u mikrofonu vysoké ceny budou užity selektované komponenty s lepšími vlastnostmi.

Kmitočtové charakteristiky

Změřeny byly kmitočtové závislosti pro všechny charakteristiky mikrofonu a to vždy jak při akustickém signálu dopadajícím na přední stranu mikrofonu, tak i na stranu zadní. Frekvenční pásmo pod 100 Hz vykazovalo vady při měření dané prostorem bezodrazové místnosti, z toho důvodu jsou grafy vyneseny pro pásmo 100 Hz - 20 kHz. Grafy kmitočtových závislostí originálního ELA M-251E jsou pro účely srovnání zařazeny do příloh této práce.

U kardioidní charakteristiky (obr. 5.7) je pásmo 100 Hz až 2 kHz rovné s maximální odchylkou ± 1 dB. V pásmu nad 2 kHz můžeme pozorovat nárůst s maximy okolo 4,5 dB. S ohledem na skutečnost, že vyrobený mikrofon nepoužívá totožnou kapsli jako originální, lze konstatovat, že frekvenční charakteristiky jsou si podobny.

V případě malé membrány (obr. 5.8) je patrné daleko menší zvlnění než u charakteristik velké membrány. V celém měřeném pásmu nevykazuje výchylku větší než ± 1 dB. Rovněžší kmitočtová charakteristika byla u malé membrány očekávána.

U osmičkové charakteristiky se křivky pohybují v rozmezí ± 1 dB. U kulové pak od -1 do 1,6 dB. Dobrým ukazatelem je i to, že křivky pro přední i zadní snímání jsou až na drobné odchylky totožné. U originálního mikrofonu je kmitočtová charakteristika osmičkové charakteristiky podstatně více zvlněná s výchylkami přes 7 dB (obr. A.2). U kulové charakteristiky originálního mikrofonu je zase patrný značný rozdíl mezi snímáním přední a zadní strany, což je u kulové charakteristiky nežádoucí (obrázky A.4 a A.5). V tomto ohledu lze říci, že bylo u vyrobeného mikrofonu docíleno lepších výsledků.

Směrové charakteristiky

Směrové charakteristiky byly měřeny na sedmi různých frekvencích od 250 Hz až po 16 kHz. Na základě vynesných polárních grafů lze říci, že tvarově všechny charakteristiky odpovídají standardu. S rostoucí frekvencí je pozorovatelná frekvenční

závislost směrovosti mikrofonu. K větším deformacím však dochází až u frekvencí 8 a 16 kHz a projevuje se rostoucí směrovostí mikrofonu. Mikrofon pak tedy snímá blíže v okolí akustických os přední a zadní membrány. Grafy směrových charakteristik bohužel výrobce originálu neposkytuje, chybí tedy možnost srovnání.

Závěr

V této práci byly nejdříve nastíněny obecné principy konstrukce a vlastnosti elektronických kondenzátorových mikrofonů. Dále byl blíže představen mikrofon Telefunken ELA M-251E. Poté byla v práci zhodnocena možnost úpravy mikrofonu Telefunken ELA M-251E jeho rozšířením o malomembránovou kapsli. Byl navržen způsob, jakým této úpravy docílit tak, aby výsledná citlivost obou kapslí byla co možná vyrovnána.

Funkčnost tohoto řešení se pokusily ověřit provedené simulace obvodu. Vzhledem k absenci dokumentace u mikrofonních kapslí, ze strany výrobce, nebylo možno na základě simulací s jistotou určit, zda je řešení dostačující. Simulace však potvrzovaly účinek ve smyslu trendů. Proto poté následovala samotná stavba mikrofonu, která kromě sestavení elektrického obvodu vyžadovala velké množství mechanických a konstrukčních řešení, které jsou nedílnou součástí mikrofonu a mají podstatný vliv jak na komfort jeho užívání, tak ale i na jeho zvukové vlastnosti.

Sestrojený mikrofon s příslušenstvím byl nakonec podroben měřením v bezodrazové komoře. Výsledky tohoto měření byly zhodnoceny, kde to bylo možné tak i srovnány s originálním mikrofonem. Též byly navrženy další způsoby, kterými by bylo možné docílit zlepšení některých vlastností výsledného výrobku.

Celkově je však výsledkem mikrofon, který si ze své předlohy bere mnohé dobré vlastnosti a ve velké míře odpovídá i jeho zvukový přednes. V případě kulové charakteristiky měření naznačují, že svou předlohu v určitých parametrech i předčil. Lze říct, že mikrofon dosahuje vlastností vyhovujících pro studiovou aplikaci. Využití nalezne zejména pro záznam vokálů. Díky malé kapsli však může být více užitečný i pro instrumentální zvuky. Spektrum jeho užití se tak rozšířilo.

Literatura

- [1] SOYUZ MICROPHONES, LLC. *The History of Condenser Microphones* [online]. c2018-2023 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <http://soyuzmicrophones.com/articles/history-condenser-microphones>
- [2] UNIVERSAL AUDIO. *Introducing UA Sphere* [online]. b. r. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://help.uaudio.com/hc/en-us/articles/12231791634836-Introducing-UA-Sphere#h_01GPC7F7CJG83ZGSAT5PGXVM1C
- [3] ANTELOPE AUDIO. *Modeling mics* [online]. c2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://en.antelopeaudio.com/modeling-mics/>
- [4] EARGLE, John. *The microphone book*. 2nd ed. Oxford: Focal Press, 2004. ISBN 02-405-1961-2.
- [5] FOX, Arthur. FOX MEDIA TECH INC. *What Is A Microphone Capsule? (Plus Top 3 Most Popular Capsules)* [online]. 2020, 2023 [cit. 2023-11-15]. Dostupné z: <https://mynewmicrophone.com/what-is-a-microphone-capsule-plus-top-3-most-popular-capsules/>
- [6] FOX, Arthur. FOX MEDIA TECH INC. *Microphone Impedance: What Is It And Why Is It Important?* [online]. 2018, 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://mynewmicrophone.com/microphone-impedance/>
- [7] FOX, Arthur. FOX MEDIA TECH INC. *The Complete Guide To Microphone Polar Patterns* [online]. 2019, 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://mynewmicrophone.com/the-complete-guide-to-microphone-polar-patterns/>
- [8] FOX, Arthur. FOX MEDIA TECH INC. *What Is A Good Signal-To-Noise Ratio For A Microphone?* [online]. 2019, 2023 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://mynewmicrophone.com/what-is-a-good-signal-to-noise-ratio-for-a-microphone/>
- [9] GEORG NEUMANN GMBH. *What is the difference between large and small diaphragm microphones?* [online]. c2018 - 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.neumann.com/fr-fr/difference-between-large-and-small-diaphragm-microphones/>
- [10] VLACH, Jaroslav. *Lampárna, aneb, Co to zkusit s elektronikami?* Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0091-1.

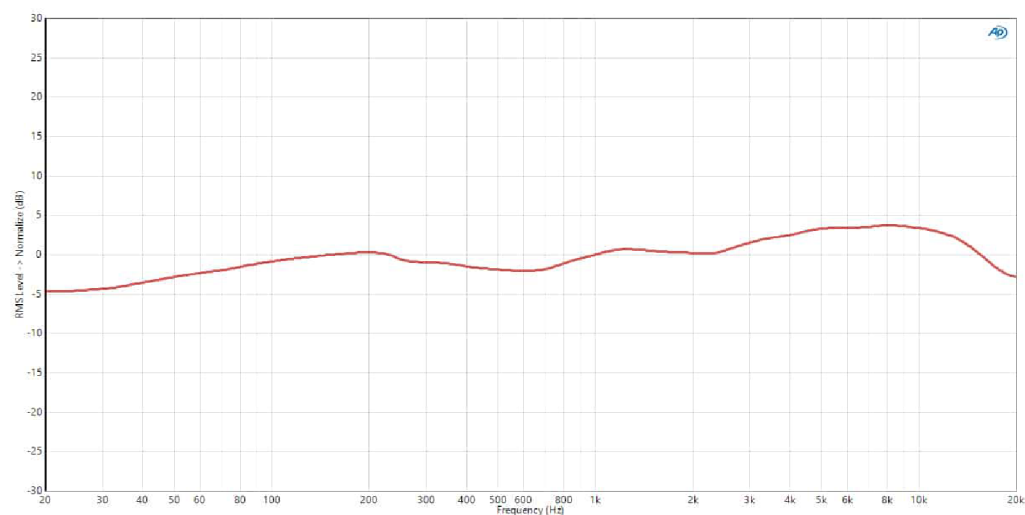
- [11] ROBINETTE, Rob. *Drawing Tube Load Lines and Using Them to Design Tube Circuits* [online]. b.r. [cit. 2023-11-24].
Dostupné z: http://rob robinette.com/Drawing_Tube_Load_Lines.htm
- [12] *Elliott Sound Products* [online]. 2009, aktualizováno 2020 [cit. 2023-11-22].
Dostupné z: <http://sound-au.com/valves/bias-gain.html>
- [13] RECORDINGHACKS.COM. *Telefunken Ela M 251* [online]. c2008-2022 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <http://recordinghacks.com/microphones/Telefunken/ElaM-251>
- [14] RECORDINGHACKS.COM. *Telefunken Elektroakustik Ela M 251E* [online]. c2008-2022 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <http://recordinghacks.com/microphones/Telefunken-USA/ElaM-251E>
- [15] TELEFUNKEN ELEKTROAKUSTIK. *ELA M 251E - Vacuum Tube Microphone* [online]. c2022 [cit. 2023-11-29]. Dostupné z: <http://www.telefunken-elektroakustik.com/product/ela-m-251e/>
- [16] JJ ELECTRONIC. *JJ Electronic* [online]. c2023 [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <http://www.jj-electronic.com/en/>
- [17] *Vacuum Tube SPICE Models*. In: DiyAudio [online]. b.r. [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <http://www.diyaudio.com/community/threads/vacuum-tube-spice-models.243950/>
- [18] *Telefunken ELA M 251 Clone Tube Microphone Build Thread (D-Ela M 251E)*. In: Groupdiy.com [online]. 2014, 2010 [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://groupdiy.com/threads/telefunken-ela-m-251-clone-tube-microphone-build-thread-d-ela-m-251e.55010/>

Seznam příloh

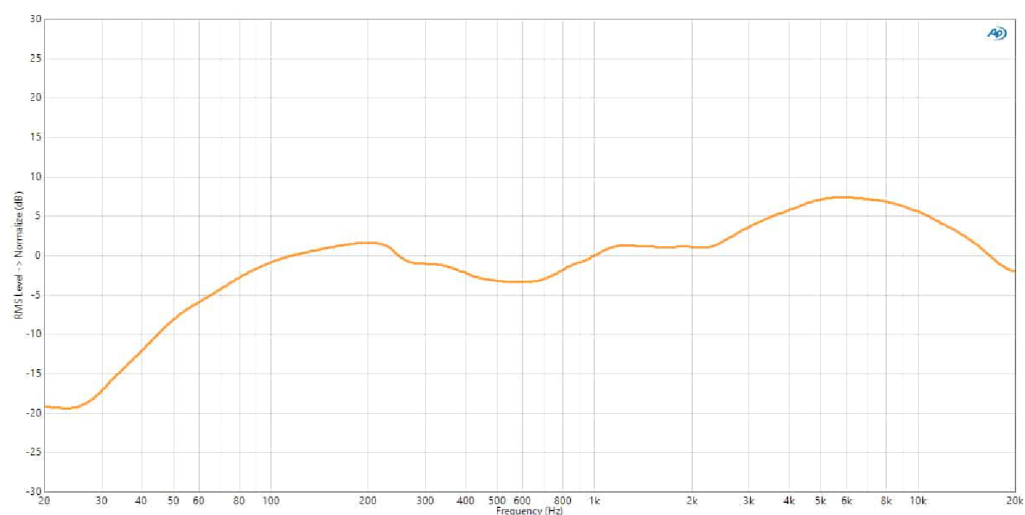
A Grafy kmitočtových charakteristik poskytované výrobcem	52
B Fotodokumentace	55
C Návrh plošného spoje	59
D Kompletní schéma mikrofonu	61
E Obsah elektronické přílohy	62

A Grafy kmitočtových charakteristik posky- tované výrobcem

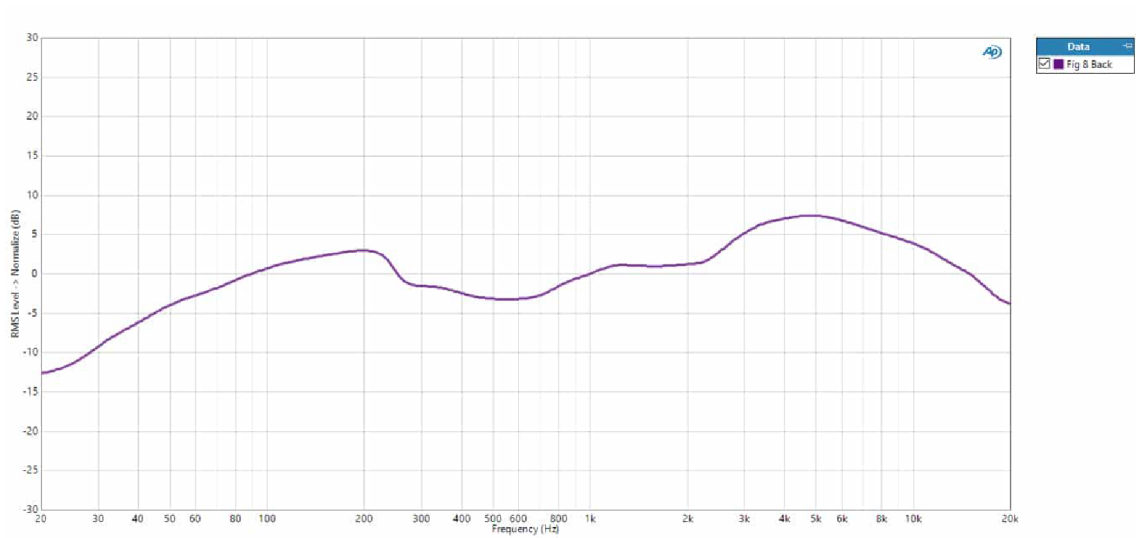
Nasledující grafy kmitočtových charakteristik mikrofonu ELA M-251E jsou převzaty od výrobce Telefunken [15]. Do příloh práce byly zařazeny pro možnost srovnání s dosaženými výsledky vyrobeného mikrofonu.



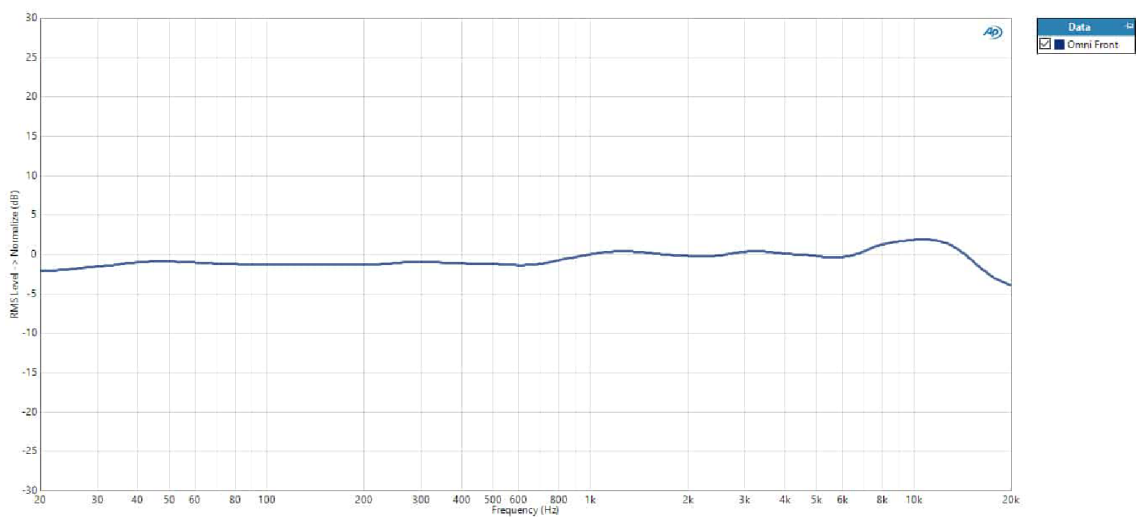
Obr. A.1: Kardiodní charakteristika - přední strana



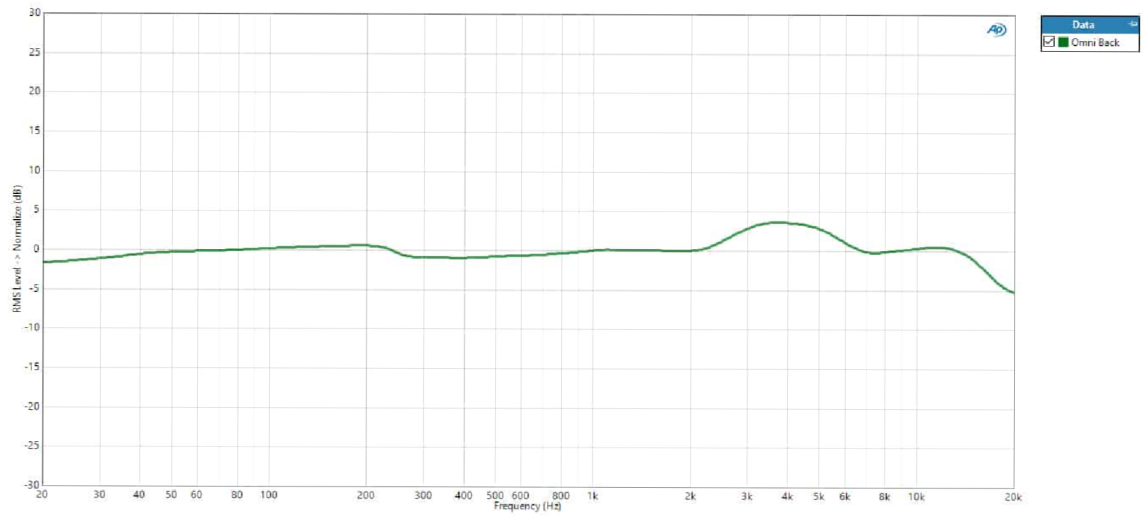
Obr. A.2: Osmičková charakteristika - přední strana



Obr. A.3: Osmičková charakteristika - zadní strana



Obr. A.4: Kulová charakteristika - přední strana



Obr. A.5: Kulová charakteristika - zadní strana

B Fotodokumentace



Obr. B.1: Mikrofon - vnější pohled



Obr. B.2: Mikrofon - pohled vnitřní



Obr. B.3: Napájecí zdroj - přední panel



Obr. B.4: Napájecí zdroj - zadní panel



Obr. B.5: Napájecí zdroj - pohled vnitřní

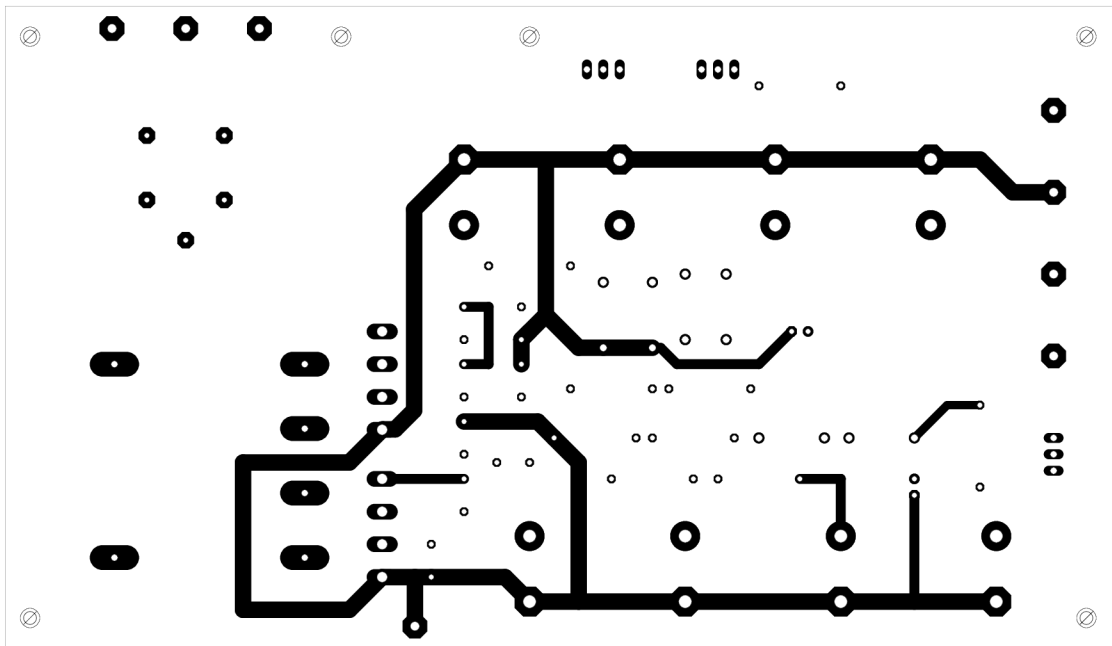


Obr. B.6: Mikrofon - komplet

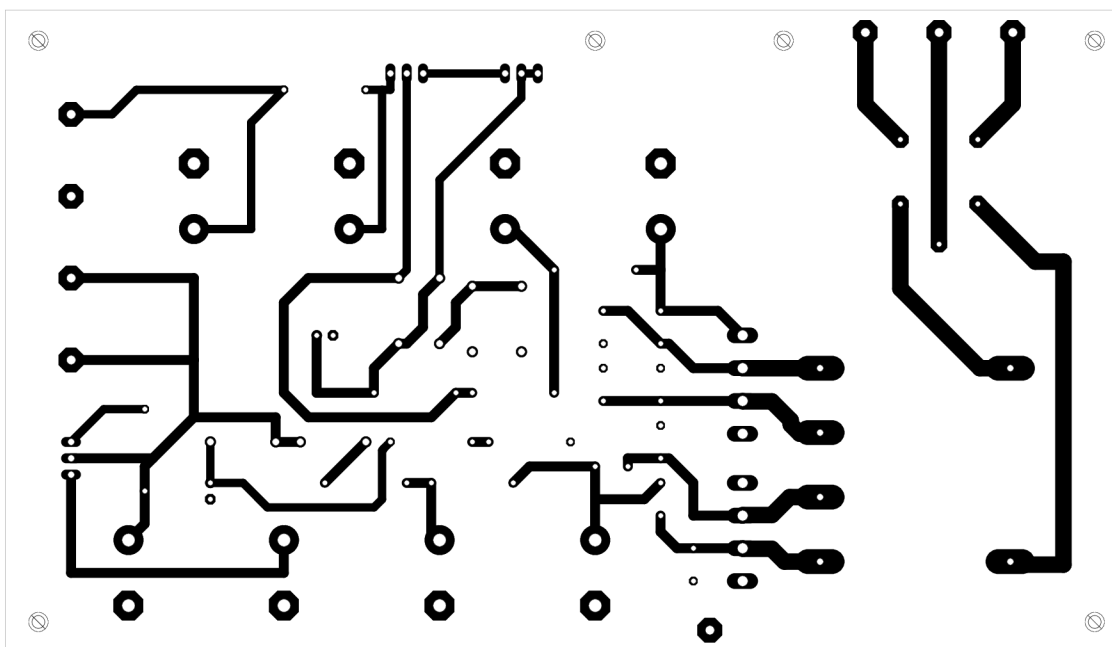


Obr. B.7: Propojovací kabel

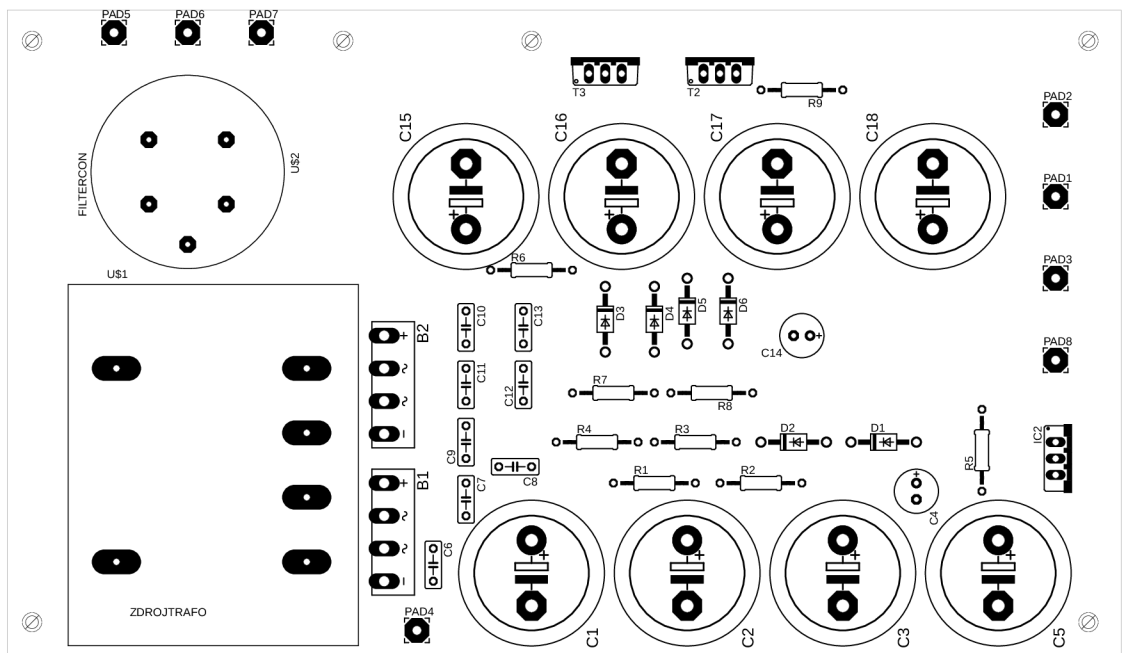
C Návrh plošného spoje



Obr. C.1: Návrh plošného spoje - horní pohled

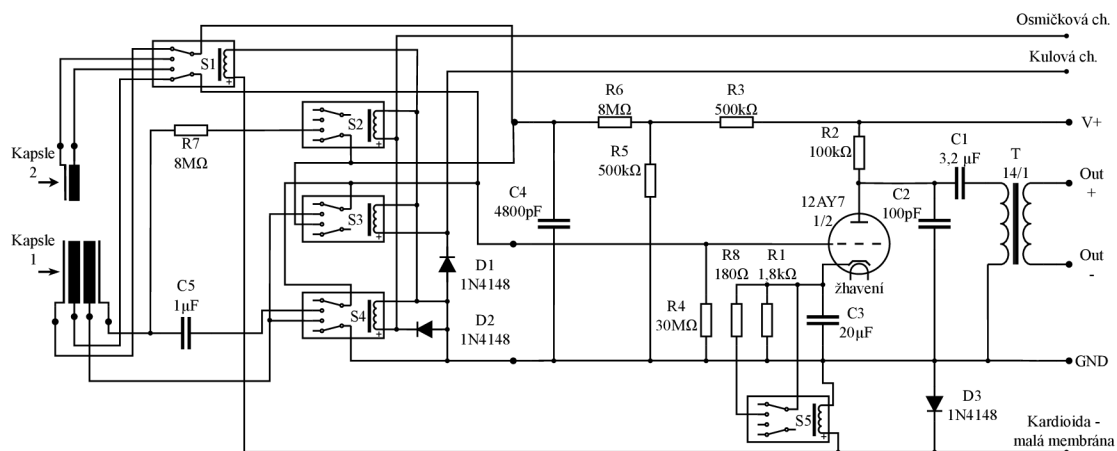


Obr. C.2: Návrh plošného spoje - spodní pohled



Obr. C.3: Návrh plošného spoje - spodní pohled, osazení

D Kompletní schéma mikrofonu



Obr. D.1: Kompletní schéma mikrofonu zahrnující přepínání charakteristik

E Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha obsahuje soubory jednotlivých simulací v LTspice, výstupy a zpracování naměřených dat hotového mikrofonu, návrh plošného spoje v Eagle. Užity byly verze: LTspice for MacOS Version 17.1.4, Microsoft Excel pro Mac Verze 16.85, AUTODESK EAGLE Version 9.6.2.

/.....	Elektronická příloha
├── mereni.....	data měření hotového mikrofonu
│ ├── mereni kmitoctovych ch.....	složka obsahující výstup a zpracování dat měření
│ └── mereni smerovych ch.....	složka obsahující výstup a zpracování dat měření
├── navrh plosneho spoje ...	složka obsahující soubory EAGLE včetně vytvořených knihoven
├── simulace	simulace
│ ├── Zdroj anodového napětí.asc.....	soubor LTspice
│ ├── Zdroj žhavicího napětí.asc.....	soubor LTspice
│ ├── Simulace mikrofonu.asc.....	soubor LTspice
│ ├── vysledky	složka s výsledky simulací
│ └── SPICE_zpracovani.xlsx.....	soubor Excel se zpracováním výsledků