

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti a parametry MEMS mikrofonů.

vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

autor: Jakub Jirovec

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub JIROVEC**
Osobní číslo: **E14N0140P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Možnosti a parametry MEMS mikrofonů**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

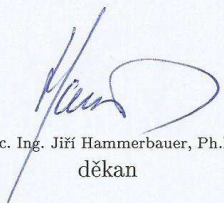
1. Prostudujte možnosti a řešení mikrofonů MEMS.
2. Pro vybraný MEMS mikrofon navrhnete a realizujete testovací přípravku.
3. Provedte měření parametrů mikrofonu v testovacím přípravku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2014

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na popis mikrofonů MEMS. Jsou zde rozebrány základní principy a funkce těchto mikrofonů. Poté jsou zde popsány základní vlastnosti a kalibrační metody mikrofonů. Následující část se zabývá výběrem mikrofonů a realizací testovacího přípravku. V závěrečné části je zhodnocení naměřených parametrů vybraných mikrofonů.

Klíčová slova

Mikroelektromechanické systémy, MEMS, mikrofon, akustika, kalibrační metody, pistonfon, parametry mikrofonů

Abstract

This dissertation is focused on description of MEMS microphones. At the beginning there are analysed basic principals and functions of these microphones. Next part of this paper researches fundamental features and calibration methods of mentioned microphones. In addition this thesis deals with choice of microphones and also with the realization of the tested preparation. At the end there is an evaluation of measured parameters of selected microphones.

Key words

Micro-electro-mechanical systems, MEMS, microphone, acoustics, calibration methods, pistonphone, microphone parameters

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 10.5.2015

Jméno příjmení

Jakub Jirovec

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
1 Úvod.....	10
2 Mikrofon	11
2.1 Uhlíkový mikrofon.....	11
2.2 Elektrodynamický mikrofon	11
2.3 Elektrostatický mikrofon.....	12
2.3.1 Elektretový mikrofon	13
3 MEMS Mikrofon	14
3.1 Kapacitní MEMS mikrofon.....	16
3.2 Piezoelektrický MEMS mikrofon	18
3.3 Optický MEMS mikrofon	19
4 Základní vlastnosti mikrofonů	20
4.1 Citlivost.....	20
4.2 Šum	20
4.3 Impedance	20
4.4 Frekvenční charakteristika	21
4.5 Směrová charakteristika	21
4.6 THD.....	22
5 Kalibrační metody.....	23
5.1 Metoda reciprocity	24
5.2 Metoda pistonfonu	24
5.3 Elektrostatická kalibrační metoda	25
5.4 Substituční metoda	25
5.5 Porovnávací metoda	26
6 Výběr mikrofonů.....	27

6.1	Analogové mikrofony	27
6.1.1	ADMP411	27
6.1.2	SPH0611LR5H-1	28
6.1.3	SPA2410LR5H-B	29
6.1.4	MP33AB01	30
6.1.5	ADMP510.....	31
6.2	Digitální mikrofony.....	32
6.2.1	MP45DT02	32
6.2.2	MP34DB01	33
6.2.3	SPK0415HM4H-B.....	34
6.2.4	ADMP522.....	35
6.2.5	ADMP621	36
6.3	Možnosti STM32F4	37
7	Závěr	38
8	Použitá literatura	39
9	Přílohy.....	41

Seznam symbolů a zkratk

MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems. Mikroelektromechanický systém.
A/D	Analog-to-digital converter. Analogově digitální převodník.
PDM	Pulse-density modulation. Pulsně hustotní modulace.
Σ - Δ	Sigma delta converter. Sigma delta převodník.
SNR	Signal-to-noise ratio. Odstup signál šum.
U_B	Vychylovací napětí [V].
ΔV_0	Výstupní napětí [V].
ΔC_M	Proměnná kapacita [C].
X_U, X_0	Vzdálenost elektrod [m].
C_0	Jmenovitá kapacita [C].
C_{P1}, C_{P2}	Parazitní kapacita elektrod [C].
$C_{P,IN}$	Celková parazitní kapacita [C].
R_B	Parazitní odpor elektrod [Ω].
PZT	Lead zirconium titanat
PVDF	Polyvinylidenfluorid
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Povrchově vyzařující laser.
LED	Light-Emitting Diode. Dioda emitující světlo.
DPS	Deska plošného spoje.
ASIC	Application specific integrated circuit. Specifický integrovaný obvod.
λ	Vlnová délka [m].
P	Tlak [Pa].
P_0	Referenční tlak [Pa].
SPL	Sound pressure level. Hladina akustického tlaku.
THD	Total harmonic distortion. Celkové harmonické zkreslení.

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je prostudování možností a realizace testovacího přípravku pro vybrané MEMS mikrofony. V práci je popsáno základní rozdělení a vlastnosti mikrofonů. Běžné druhy mikrofonů jsou zde zmíněny jen okrajově. Největší důraz je kladen na MEMS mikrofony. Dále je v práci popsán základní princip mikrofonů MEMS. Detailněji jsou zde popsány základní principy, na kterých fungují MEMS mikrofony. Nejčastěji používanými jsou mikrofony využívající principu změny kapacity, ty tvoří až 80% všech vyrobených MEMS mikrofonů. Dalšími principy jsou piezoelektrický princip a optický princip. Následuje představení důležitých parametrů mikrofonů, které jsou v závěrečné části měřeny. V práci jsou též rozebrány metody sloužící ke kalibraci mikrofonů. Představené metody jsou, metoda reciprocity, pistonfonu, elektrostatická metoda, substituční metoda a srovnávací metoda.

Dalším cílem diplomové práce je výběr vhodných MEMS mikrofonů a následná realizace testovacího přípravku pro vybrané mikrofony. Diplomové práce obsahuje návrh postupu měření, pomocí kterého jsou poté měřeny parametry vybraných MEMS mikrofonů. Závěr práce obsahuje vyhodnocení změřených parametrů.

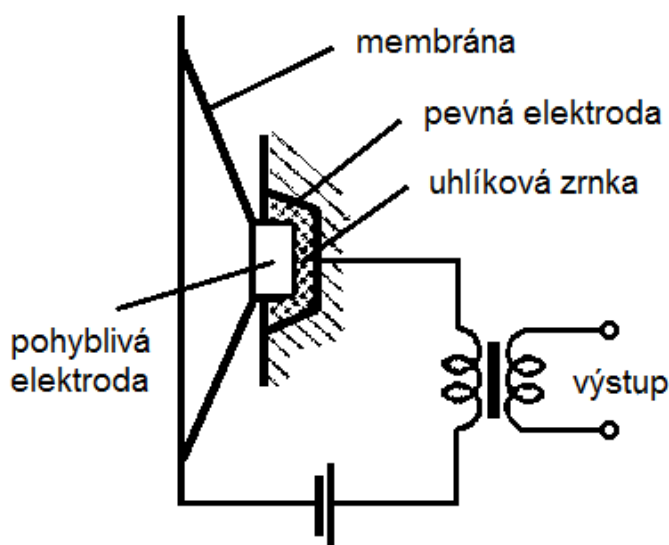
2 Mikrofon

Mikrofon je elektroakustické zařízení, které přeměňuje akustický signál na signál elektrický. Vlastnosti a zvolená konstrukce mikrofonu ovlivňuje kvalitu přeměny akustického signálu.

2.1 Uhlíkový mikrofon

Uhlíkový mikrofon se skládá z dvojice elektrod mezi nimiž jsou umístěna uhlíková zrnka. Jedna elektroda je pevná a druhá je pohyblivá spojená s membránou. Při dopadu zvukových vln dochází k pohybu elektrody a tím ke změně tlaku působícího na uhlíková zrnka. To má za následek změnu odporu uhlíkové vrstvy. Mikrofon je vyráběn v podobě mikrofonních vložek pro telefonní přístroje.

Nevýhodou tohoto mikrofonu je omezený frekvenční rozsah (200 - 3400 Hz) a náchylnost na otřesy způsobující pohyb uhlíkových zrněk. Jeho výroba je však jednoduchá a levná. [1,2,3]

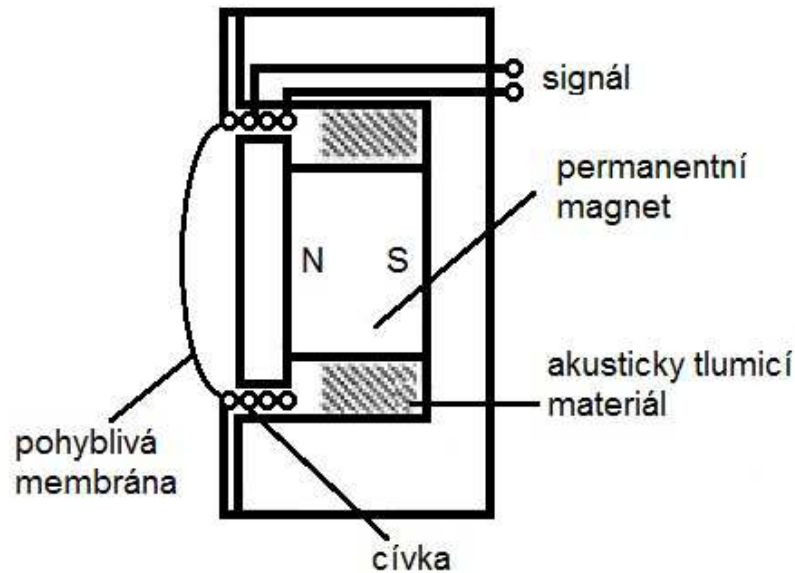


Obr. 1: Konstrukce uhlíkového mikrofonu: Zapojení používané v telefonii [1]

2.2 Elektrodynamický mikrofon

Elektrodynamický mikrofon pracuje na principu elektromagnetické indukce. Využívá se pohybu cívky spojené s membránou, pohybující se v magnetickém poli permanentního magnetu. Tím se na ní indukuje proud. U levných mikrofonů je cívka navinuta na papírovou kostru, u dražších bývá cívka samonosná. Používaný materiál je hliníkový nebo měděný drát.

Elektrodynamický mikrofon je odolný vůči nepříznivým vlivům, snáší i vysoké hladiny akustického tlaku. Nevyžaduje žádné napájení, ale vstupní předzesilovač musí mít větší zesílení. [1,2,3]

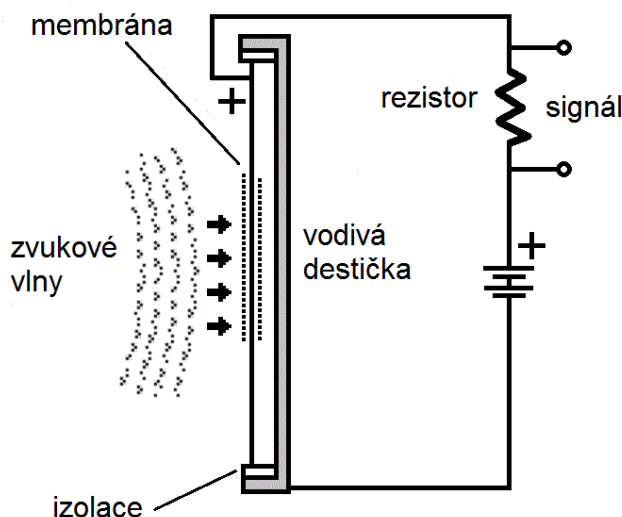


Obr. 2: Konstrukce elektrodynamického mikrofonu [2]

2.3 Elektrostatický mikrofon

Elektrostatický mikrofon pracuje na principu kondenzátoru. Skládá se z dvojice elektrod. Jednu elektrodu tvoří membrána, na které je nanesena tenká kovová vrstva. Druhá elektroda je pevná a perforovaná. Mezi elektrodami je stejnosměrné polarizované napětí 30-200V. Při dopadu akustických vln na membránu dochází ke změně kapacity mezi elektrodami. Mezi elektrodami a napájecím napětím je připojen rezistor. Změna hodnoty kapacity vyvolá změnu proudu v obvodu. Tato změna je snímána na rezistoru jako změna napětí. Elektrostatický mikrofon vyžaduje předzesilovač s vysokou vstupní impedancí.

Tyto mikrofony se vyznačují velkou výstupní impedancí, vysokou citlivostí, malým zkreslením, vyrovnanou frekvenční charakteristikou, vyšší cenou a náchylností na vlhkost. Proto jsou používány především pro měřicí účely a jako studiová technika. [1,2,3]

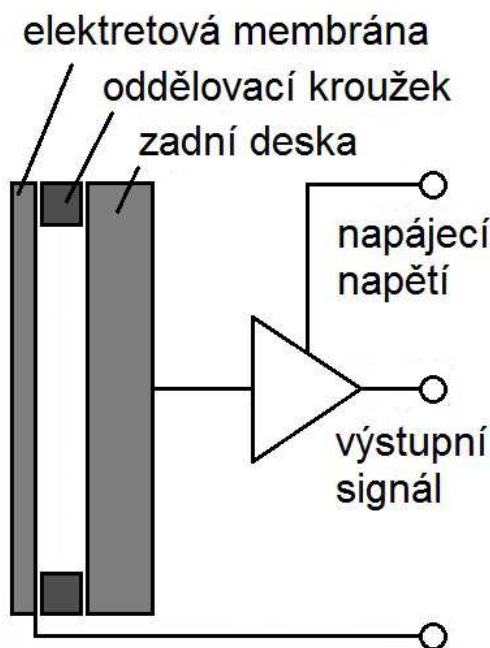


Obr. 3: Konstrukce elektrostatického mikrofonu [2]

2.3.1 Elektretový mikrofon

Elektretový mikrofon je zvláštním typem elektrostatického. Rozdíl od elektrostatického mikrofonu je, že nevyužívá externího polarizačního napětí, ale membrána je tvořena elektretem. Elektret je časově stálá hmota, která je permanentně nabitá. Vlivem akustických vln dochází k pohybu elektretové membrány. To se projeví změnou kapacity a tím i napětí. Napětí je dále zpracováváno předzesilovačem s vysokou vstupní impedancí. Předzesilovač vyžadující připojené napětí je umístěn v mikrofonní kapsli.

Výhodou elektretového mikrofonu je nízká cena s kvalitou elektrostatických mikrofonů. [1,2,3]

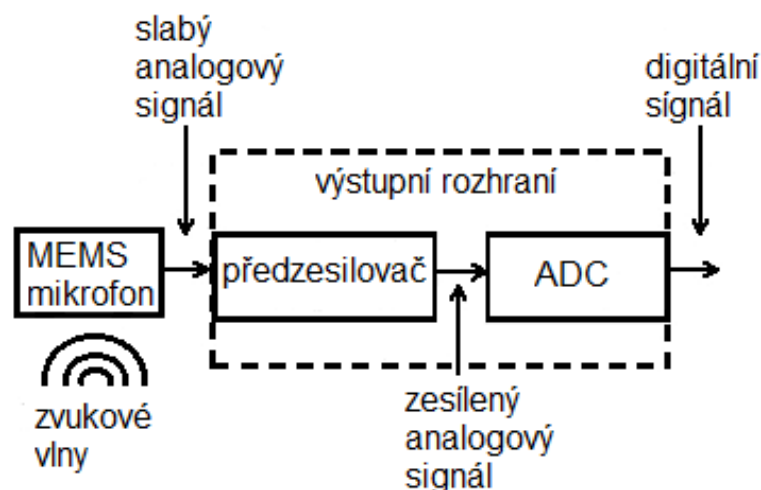


Obr. 3: Konstrukce elektretového mikrofonu [1]

3 MEMS Mikrofon

V roce 1983 byl vyroben první kapacitní mikrofon technologií MEMS. Zkratka MEMS nebo-li Mikroelektromechanický systém pochází z USA. MEMS je výrobní technologie pomocí níž jsou realizována integrovaná zařízení a systémy kombinující elektrické a mechanické součásti. Tyto systémy nabývají velikosti od jednotek mikrometrů po několik milimetrů. Pro jejich výrobu se využívá stejných materiálů používaných pro výrobu integrovaných obvodů. Nejčastější technologie pro vytvoření MEMS systémů jsou povrchové a objemové mikrobrábění. Mikrofony MEMS využívají principu změny kapacity, piezoelektrického principu nebo optické detekce. Až 80% dnes vyráběných MEMS mikrofonů využívá principu změny kapacity, ten zajišťuje vysokou citlivost a nízké výrobní náklady.

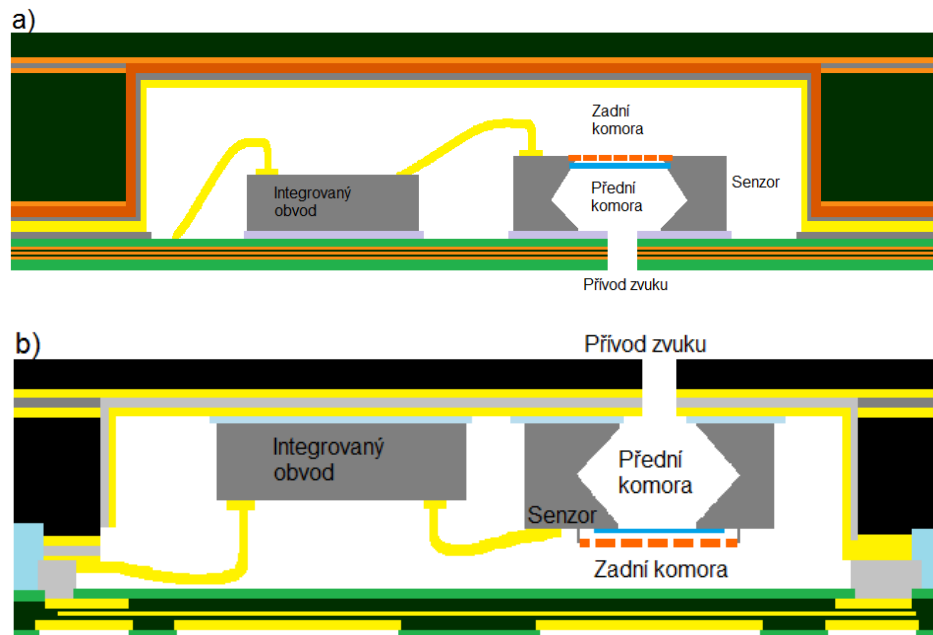
Technologie MEMS umožňuje umístit na jeden čip další pomocné obvody, jako jsou předzesilovač, různé aktivní filtry a A/D převodníky. To umožnilo vytvoření mikrofonů s digitálním výstupem. Digitální mikrofony využívají A/D převodník s modulátorem využívajícím pulsně hustotní modulaci PDM. K tomu se využívá Sigma-Delta převodník (Σ - Δ). Na výstupu potom dostáváme digitální jednobitový signál se zvolenou vzorkovací frekvencí.



Obr. 4: Bloková struktura MEMS mikrofonu [6]

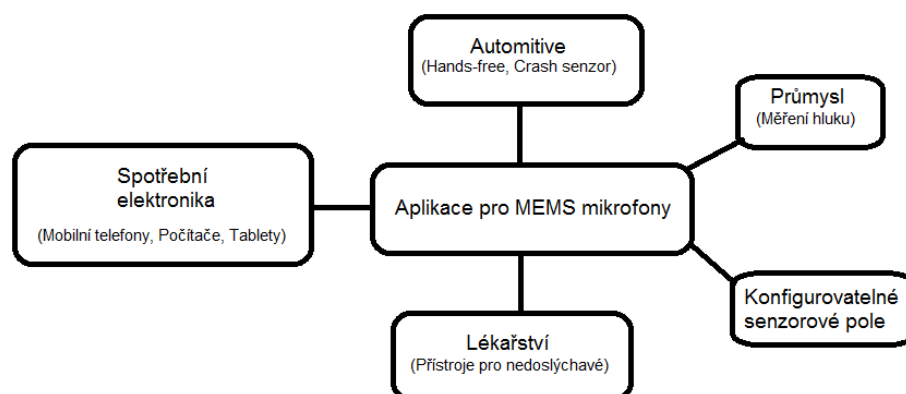
Existují dva typy MEMS mikrofonů lišících se v umístění vstupního portu mikrofonu. Vstupní port lze umístit na horní (top-port) nebo spodní (bottom-port) stranu mikrofonu. Tyto struktury jsou zobrazeny na Obr. 5. Je zde zobrazeno umístění senzoru a příslušných pomocných obvodů. Toto rozložení optimalizuje akustické vlastnosti mikrofonu z hlediska

SNR. Umožňuje také získat plochou odezvu v celém zvukovém pásmu. Vstupní port na spodní straně mikrofonu vyžaduje vyvrtaný otvor v desce plošného spoje, tloušťka desky ovlivňuje objem přední komory. To má za následek degradaci odezvy tohoto mikrofonu.



Obr. 5: Struktura MEMS mikrofonu a) vstupní port na horní straně, b) vstupní port na spodní straně [5]

Předností mikrosystémů je možnost miniaturizace, využití materiálů používaných při výrobě integrovaných obvodů. Vlivem snadné a rychlé výroby při zachování či zlepšení makroskopických systémů dochází k stále rozšířenějšímu využívání mikroskopických systémů. Velké rozšíření MEMS mikrofonů je v aplikacích pro spotřební elektroniku, automobil, lékařství a průmyslu. Společnosti vyrábějící MEMS mikrofony jsou například STMicroelectronics, Analog Device, InvenSense a Knowles Electronics. [4,5,6]



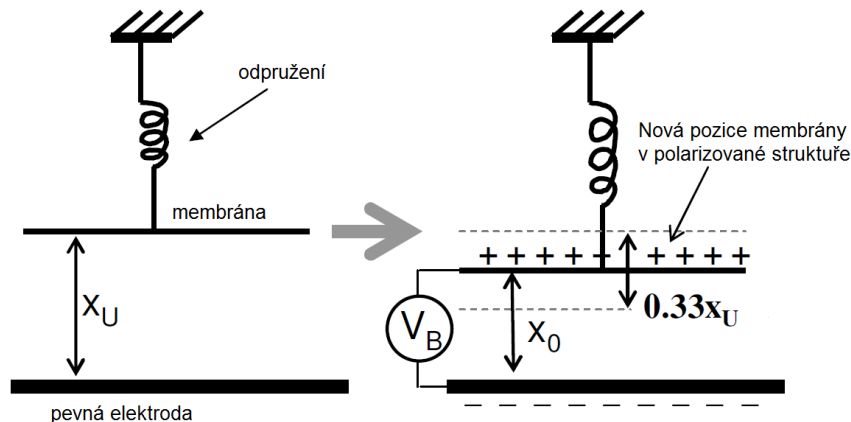
Obr. 6: Aplikace pro MEMS mikrofony [6]

3.1 Kapacitní MEMS mikrofon

Principem tohoto mikrofonu je změna kapacity. Ta je poté převáděna na elektrický signál. Čidlo je složeno z dvojice elektrod. Jedna z elektrod je pevná a perforovaná. Díky vytvořeným otvorům je tedy necitlivá na změny akustického tlaku. Druhá elektroda je tvořena membránou, která je připevněna ke křemíkovému substrátu pomocí pružin. To umožňuje reakci membrány na změny akustického tlaku. K zlepšení vlastností jsou k membráně z jedné strany přidány svislá žebra. Celá konstrukce je uzavřena v pouzdře. K takto vytvořené struktuře je připojeno vychylovací napětí U_B . Toto připojené napětí zanechává ve struktuře určité množství vychylovacího náboje, ten slouží k nastavení citlivosti. Citlivost lze definovat jako poměr mezi hodnotou výstupního napětí (nebo proudu) a změny kapacity.

Vztah pro odečet citlivosti:
$$\text{Citlivost} = \frac{\Delta V_0}{\Delta C_M} \quad (1)$$

V důsledku polarizace vzniká elektrostatická síla vychylující membránu z rovnovážné polohy X_u do nové polohy X_0 , proti působící silou je tuhost membrány. V důsledku pohybu membrány v takto polarizované struktuře, dochází ke změně kapacity, která je následně zpracovávána.



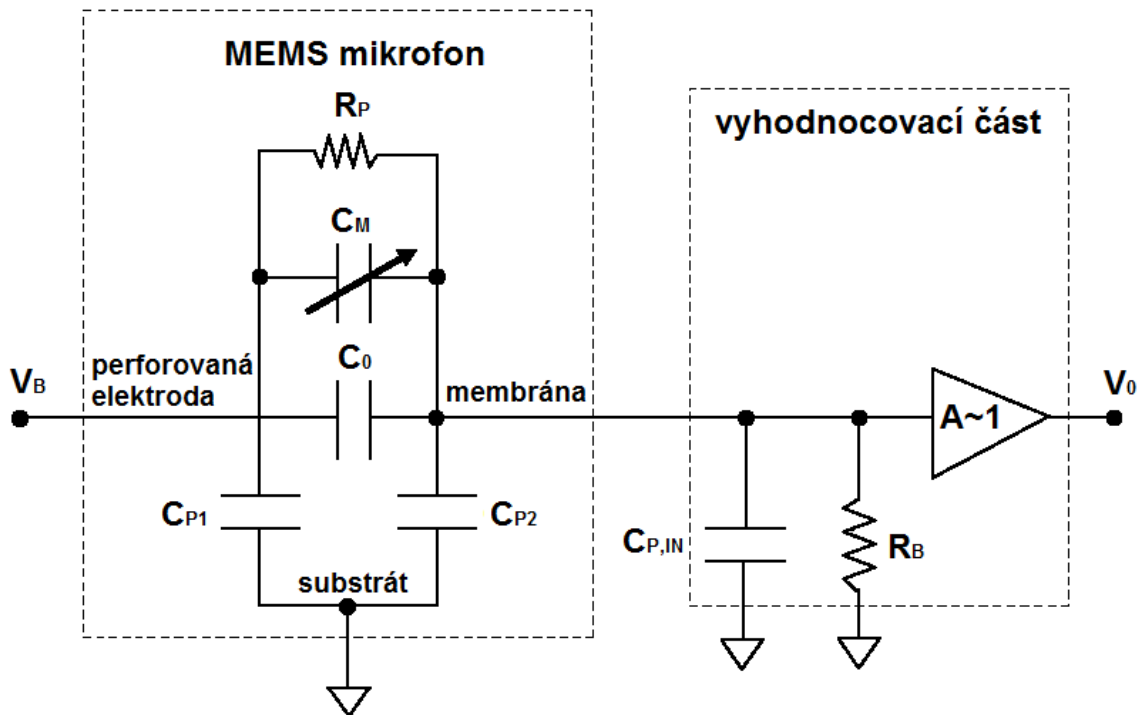
Obr. 8: Mechanická konstrukce kapacitního MEMS mikrofonu [6]

V následující části je popsáno elektrické propojení MEMS mikrofonu. Kapacita mezi perforovanou elektrodou a membránou v polarizované struktuře je označována jako nominální kapacita C_0 . Proměnná kapacita prezentována pohybem membrány je označována jako C_M . C_{P1} a C_{P2} jsou parazitní kapacity, které vznikají mezi elektrodami a substrátem. Tyto parazitní kapacity jsou dány strukturou mikrofonu a z tohoto důvodu jsou nevyhnutelné. $C_{P,IN}$ je označení celkové parazitní kapacity. Parazitní kapacity značně

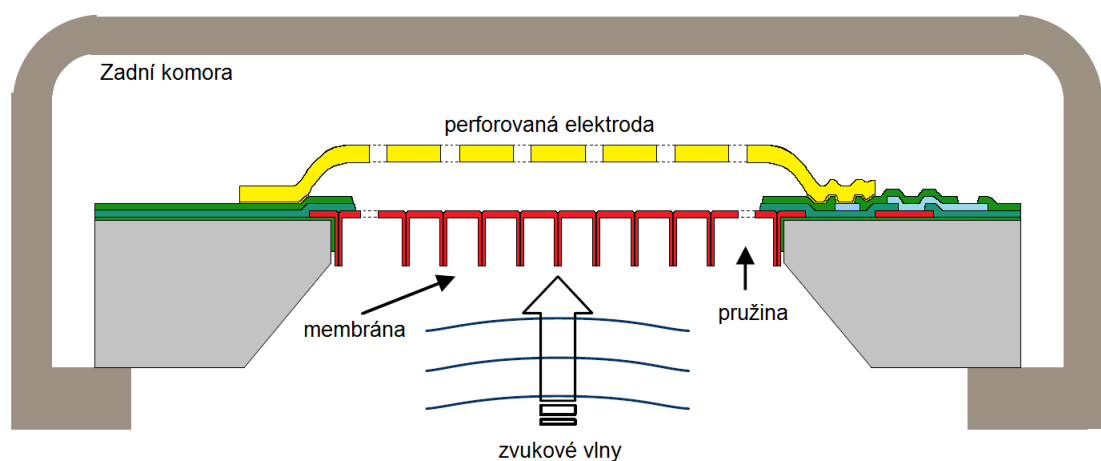
zhoršují citlivost mikrofonu. R_B je označení parazitního odporu vznikajícího mezi perforovanou elektrodou a membránou.

Vztah pro výpočet výstupního napětí mikrofonu:
$$V_0 = \frac{C_M \cdot V_B}{C_0 \cdot C_{P2} \cdot C_M \cdot C_{P,IN}}, R_B \gg 1 \quad (2)$$

[6.7]



Obr.9: Náhradní schéma zapojení MEMS mikrofonu [6]

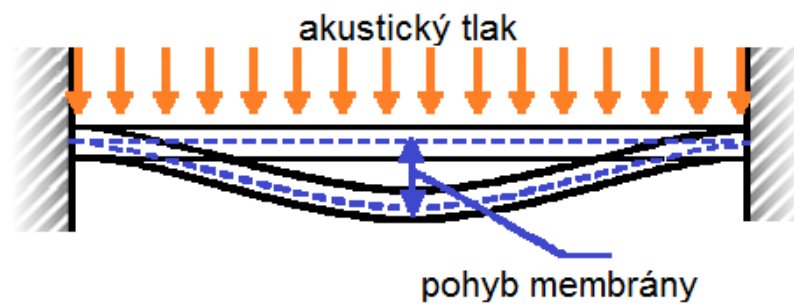


Obr. 7: Kapacitní MEMS mikrofon [6]

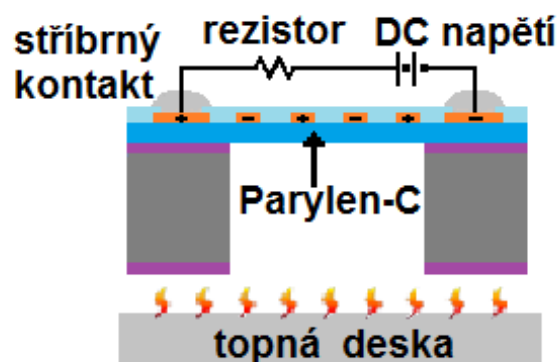
3.2 Piezoelektrický MEMS mikrofon

Tento mikrofon využívá vlastností piezoelektrických materiálů. Základním prvkem piezoelektrického MEMS mikrofonu je membrána. Při změně tlaku vyvolané zvukovými vlnami dochází k vibracím. Pnutí v membráně, která je mechanicky spojena s piezoelektrickým materiálem vyvolá změnu napětí (či proudu), který je následně snímán a vyhodnocován.

Používanými piezoelektrickými materiály jsou např. PZT (Zirkoničitan-titaničitanu olova), PVDF (polyvinylidenfluorid) nebo Parylen-C. Nevýhodou těchto mikrofonů technologické potíže při integraci piezoelektrických materiálů. Například materiál PZT vyžaduje relativně vysokou teplotu (500-700°C) po celou dobu vytvrzování. [8.9]



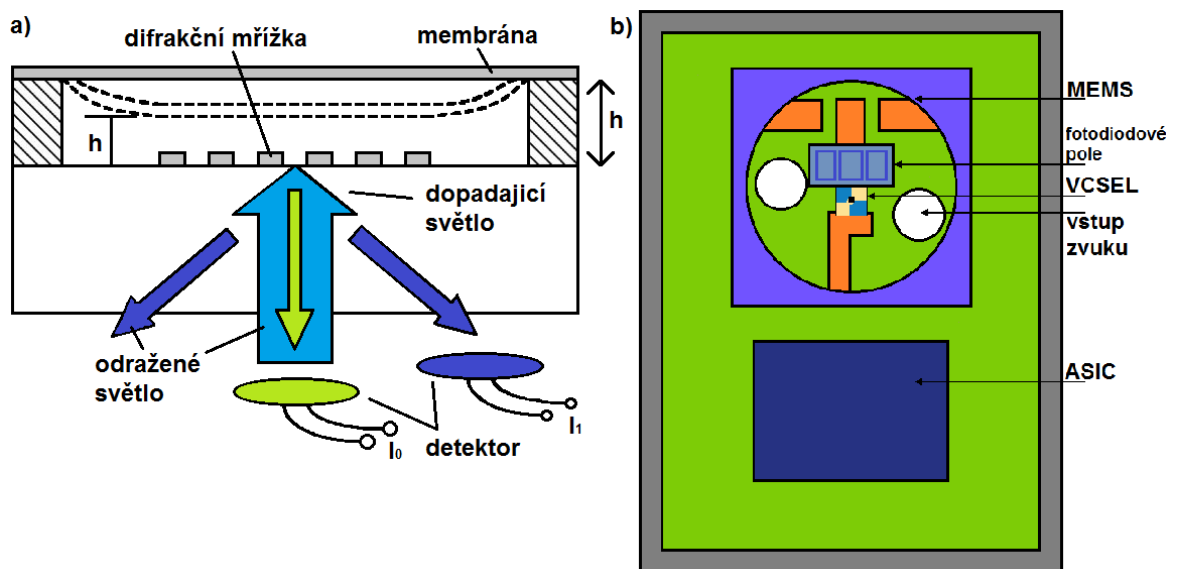
Obr. 10: Ilustrace pohybu membrány piezoelektrického MEMS mikrofonu [8]



Obr. 11: Piezoelektrický MEMS mikrofon využívající parylen-C [8]

3.3 Optický MEMS mikrofon

Měřenou hodnotou MEMS mikrofonů využívajících optické detekce je interference světla vyplývající z jeho průchodu difrakční mřížkou a odrazu od membrány. Když dopadající světlo osvětluje strukturu mikrofonu. Je odražené pole superpozicí světla, které se odráží mimo difrakční mřížku a světlo, které jí prochází. Tyto dvě pole vytvoří difrakční pole skládající se z nultého a vyšších řádů, jejichž úhly zůstávají neměnné, ale jejichž intenzita je modulována polohou membrány. Difrakční mřížka a membrána jsou vytvořeny z křemíku. Jako zdroj záření se používají LED diody nebo laserové diody. Nejpoužívanější laserovou diodou je VCSEL (povrchově vyzařující laser). K detekci se pak využívá fotodiodové pole. Laserová dioda VCSEL je nakloněna v úhlu 10° , to umožňuje úplný dopad světla na fotodiodové pole. Mikrofon je určen pro provoz v rámci $\lambda/4$ cyklu, kde λ je vlnová délka optického zdroje. Optický zdroj a detektor fungují na vlnové délce 850 nm. Dále mikrofon obsahuje dva otvory v DPS sloužící jako zvukové vstupy a specifický integrovaný obvod (ASIC) obsahující požadovanou elektroniku. [10]



Obr. 12: a) Optický MEMS mikrofon, b) Pohled shora (víko a membrána byly odstraněny) odhalující rozvržení optoelektroniky a otvorů, které slouží jako zvukové vstupy [10]

4 Základní parametry mikrofonů

4.1 Citlivost

Citlivost je vyjádřena poměrem výstupního napětí a hodnotou akustického tlaku, který napětí vybudil. Jednotkou citlivosti je V/Pa. Referenční hodnota akustického tlaku je 1Pa nebo SPL=94dB při frekvenci 1kHz. Lze ji také vyjádřit jako relativní hodnotu vyjádřenou v dB vztaženou k referenční úrovni.

Vztah pro relativní hodnotu citlivosti:
$$\text{Citlivost} = 20 \cdot \log \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

Kde P je hodnota akustického tlaku a $P_0=20\mu\text{Pa}$ je práh slyšení. Citlivost je frekvenčně závislá a odvíjí se od ní další charakteristiky. Čím lepší citlivost, tím větší je odstup užitečného signálu od šumu. [3.5]

4.2 Šum

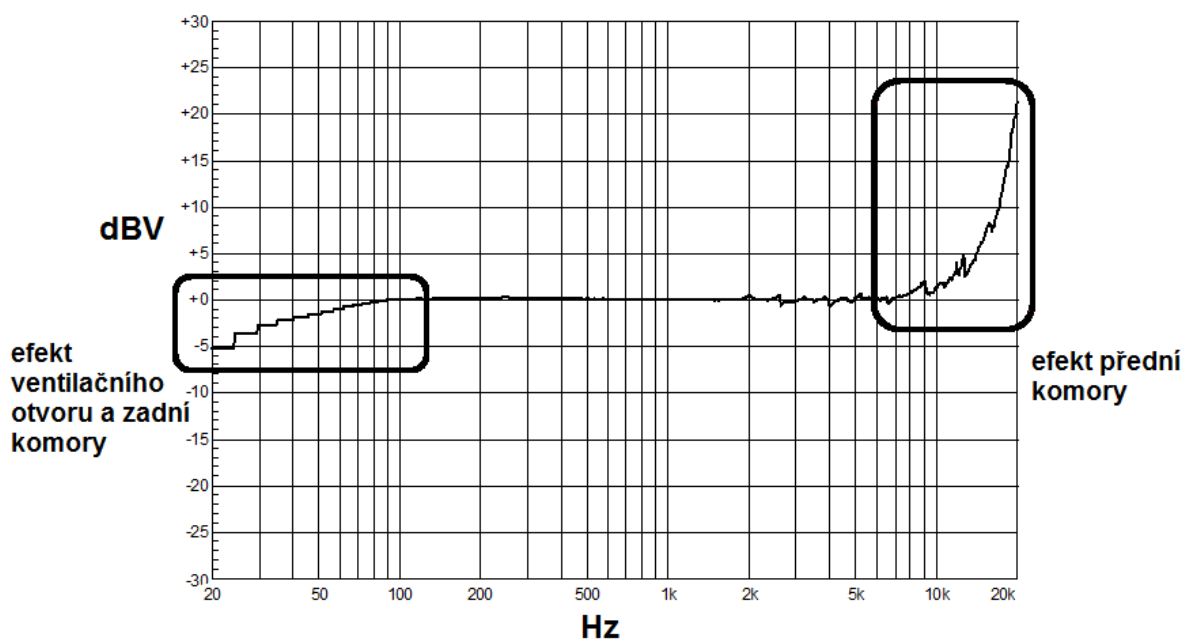
Šumové vlastnosti se vyjadřují jako odstup šumového napětí. Je to poměr mezi výstupním napětím vyvolaným referenční hodnotou akustického tlaku 1Pa a šumového napětí při umístění mikrofonu v dokonale tichém prostředí. Tento parametr zahrnuje hluk MEMS prvku a specifického integrovaného obvodu. Hlavní část hluku způsobena snímacím prvkem struktury MEMS. Specifický integrovaný obvod způsobuje zanedbatelný hluk. [3.5]

4.3 Impedance

Impedance je měřena na výstupních svorkách mikrofonu. Je to poměr výstupního napětí naprázdno a výstupního proudu nakrátko. Impedance je důležitá z hlediska impedančního přizpůsobení. Je vhodné, aby vstupní impedance předzesilovače byla 10x větší než výstupní impedance mikrofonu. Při použití zesilovače s nízkou vstupní impedancí dochází ke zkreslení frekvenční charakteristiky, zvýšení zkreslení a snížení poměru signálu k šumu. Impedance je frekvenčně závislá. [3.5]

4.4 Frekvenční charakteristika

Jedná se o závislost výstupního napětí mikrofonu na frekvenci (při konstantním akustickém tlaku). Frekvenční charakteristika prezentuje rozsah přenášeného pásma. Většinou je znázorněna v rozsahu od 20Hz do 20kHz. Každý mikrofon může mít jinou frekvenční charakteristiku. Frekvenční charakteristika MEMS mikrofonu může být ovlivněna třemi parametry (ventilační otvor, geometrie přední nebo zadní komory). Nízké frekvence jsou ovlivněny ventilačním otvorem a zadní komorou. Vysoké frekvence ovlivňuje přední komora. [3.5]



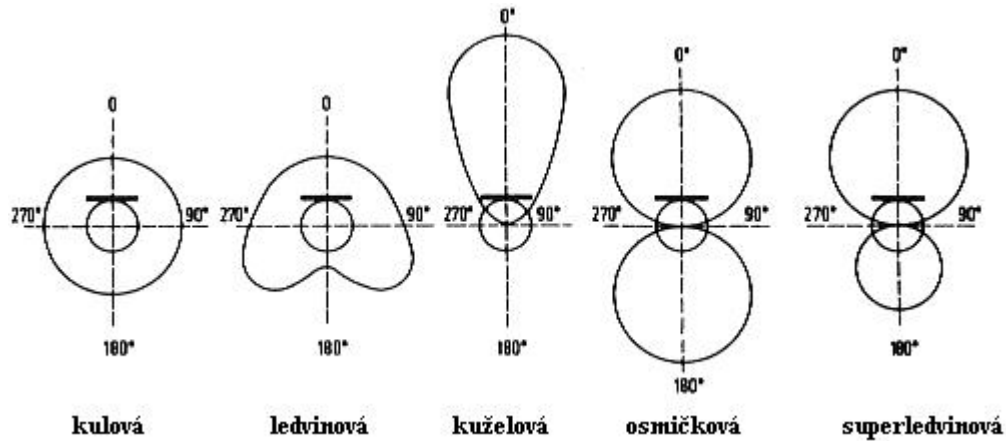
Obr. 13: Frekvenční charakteristika MEMS mikrofonu MP45DT02 [5]

4.5 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika uvádí závislost citlivosti mikrofonu na úhlu, který svírá akustická osa mikrofonu s osou akustického zdroje. U rotačně symetrických mikrofonů bývá akustická osa totožná s geometrickou osou u ostatních je určena výrobcem. Pro tlakové mikrofony je typická kulová charakteristika. Tlakový mikrofon má při nízkých a středních frekvencích citlivost stejnou ve všech směrech. S rostoucí frekvencí se mikrofon stává jednostranně směrový. [3.5]

Typy směrových charakteristik:

- Všesměrová neboli kulová charakteristika (omni-directional)
- Osmičková charakteristika (bi-directional)
- Kardioidní neboli ledvinová charakteristika (cardioid)
- Superkardioidní charakteristika (super-cardioid)



Obr. 14: Tvary směrových charakteristik mikrofonů [3]

4.6 THD

THD (celkové harmonické zkreslení) je jedním ze způsobů, jak vyjádřit kvalitu mikrofonu. Pokud přivedeme na vstup mikrofonu čistý sinusový signál, nikdy nebudeme mít na výstupu jeho přesnou kopii. Vždy tam bude nějaká odchylka křivky, která je vyjádřena sérií harmonických složek základního signálu. Jsou to celočíselné násobky základní frekvence. THD lze definovat jako poměr součtu výkonů všech harmonických složek k výkonu základní harmonické.

Vztah pro výpočet THD:

$$THD \frac{\sum \text{Výkon vyšších harmonických}}{\text{Výkon základní harmonické}} = \frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

5 Kalibrační metody

Cílem kalibrace je stanovení citlivosti měřícího zařízení. Citlivost je vyjádřena absolutní hodnotou poměru výstupního napětí mikrofonu a akustického tlaku působícího na membránu. Základní metoda kalibrace se provádí v uzavřené cejchovací dutině. Kalibraci lze také provádět ve volném poli (poli postupné vlny), poli stojaté vlny (rovinné) nebo v difuzním poli. Při stanovování citlivosti v difuzním nebo volném poli je třeba provést korekci respektující ohyb vlny na tělese mikrofonu, které vznikají při frekvencích, pro které je délka vlny srovnatelná s průměrem tělesa mikrofonu. [11.12]

Tab. 1. Běžné metody kalibrace mikrofonu [13]

Metoda	Typ citlivosti	Frekvence	Omezení
Vazební člen	tlaková	nízkofrekvenční	Stabilita dutiny
reciprocity (primární metoda)			
substituční			
srovnávací			
pistonfonu	tlaková	nízkofrekvenční	Omezený Počet frekvencí
elektrostatická	tlaková	širokopásmová	Přístupná, vodivá membrána
Volné pole	Volné pole	širokopásmová	Difrakce / odrazy
reciprocity			Vysokofrekvenční reciproký převodník
substituční			Stabilita zdroje
srovnávací			Jednotnost tlakového pole

5.1 Metoda reciprocity

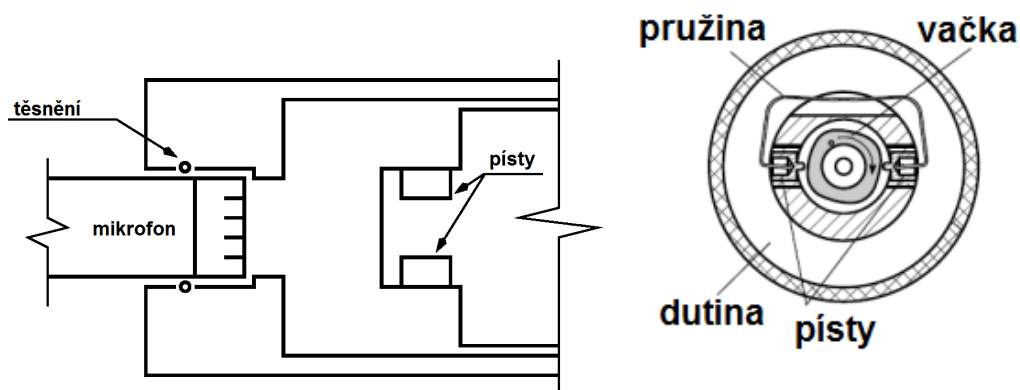
Jedná se o primární metodu stanovení citlivosti. Je to nejpřesnější metoda pro stanovení citlivosti mikrofonu. Metodu reciprocity lze použít jak pro měření citlivosti ve volném poli tak pro tlakovou citlivost. Měření tlakové citlivosti se provádí pomocí spojky (válec) nebo zvukotěsné komory. Vlastnosti spojky musí být známi s vysokou přesností.

Metoda reciprocity je absolutní metoda měření citlivosti. To znamená, že vyžaduje měření několika základních fyzikálních jednotek, jako je elektrické napětí, impedance, teplota, vlhkost a také okolní tlak. Ale není potřeba referenční akustický tlak.

Tato metoda je realizována pomocí tří mikrofonů, z nichž dva musí být reciproké (možnost využití mikrofonu jako přijímače i jako vysílače). Všechny tři mikrofony se postupně propojují s vazební dutinou. Měří se poměr výstupních napětí přijímače naprázdno a vstupního proudu vysílače. Tyto poměry jsou pak použity k řešení tří rovnic se třemi neznámými, z kterých jsou poté odvozeny citlivosti všech tří mikrofonů. [12]

5.2 Metoda pistonfonu

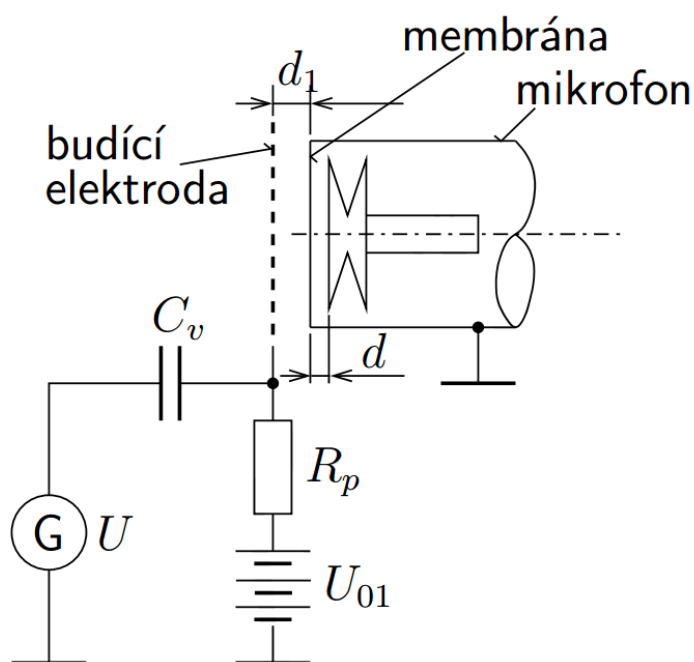
Metoda pistonfonu je založena na jednoduchém vztahu mezi výchylkou pístu a akustickým tlakem v uzavřené komůrce. Výhodou metody pistonfonu je možnost dobré a přesné měření výchylky pístu. Nevýhodou je velká hmotnost pístu, která omezuje rozsah měření pouze na nízké frekvence. Pistonfonem lze snadno měřit citlivost v okolí frekvence 200 Hz. Tato metoda je metodou absolutní, protože akustický tlak odvozujeme z měření základních fyzikálních veličin (rozměrů, výchylky a barometrického tlaku). Pro kontrolní měření se často používá pistonfon od firmy Brüel & Kjær, který využívá pohybu pístů přidržovaných pružinami a uváděnými do pohybu vačkou poháněnou bateriovým motorkem. Přesnost výchylky pístu závisí na konstrukčním provedení zařízení. Základní kalibrační frekvence je 250 Hz, hladina akustického tlaku v dutině je $124 \pm 0,2$ dB. [11]



Obr. 16: Průřezy pistonfonem od firmy Brüel & Kjær [11]

5.3 Elektrostatická kalibrační metoda

Elektrostatická kalibrační metoda umožňuje ověřovat tlakovou citlivost kondenzátorových mikrofonů v širokém frekvenčním rozsahu. Elektrostatická metoda vhodně doplňuje kalibrační metodu pistonfonu. Používá se jako druhotná metoda kalibrace. Metoda je založena na vybuzení membrány elektrostatickou silou vyvolanou elektrickým polem mezi membránou a perforovanou elektrodou. Vzdálenost mezi pomocnou elektrodou a membránou musí být pětkrát až desetkrát větší než vzdálenost mezi membránou a perforovanou elektrodou, aby se vyloučil akustický vliv vnější vzduchové mezery a vliv vnějšího polarizačního napětí. [11]



Obr. 17: Princip elektrostatické kalibrační metody [11]

5.4 Substituční metoda

Principem této metody je srovnání něčeho známého s něčím neznámým. Kalibrace se provádí ve zvukové komoře, v níž je umístěn zdroj zvuku. K měření se využívá referenční mikrofon, který je již kalibrován. Při této metodě se nejdříve měří referenční mikrofon, poté se na stejnou pozici (akustické středy těchto mikrofonů na stejný bod) vloží mikrofon s neznámou citlivostí. Důležité je, aby měření na referenčním a testovacím mikrofonu proběhlo s minimálním zpožděním po výměně mikrofonů. Dále je zapotřebí, aby zdroj

zvuku vytvářející postupnou vlnu, byl během celého měření velmi stabilní. Měřenou veličinou je výstupní napětí mikrofonu.

Signály používané jako zdroj zvuku mohou být: sinusový signál, různé druhy šumu (bílý šum, růžový šum atd.) i přechodné signály. Napětí lze měřit analogovými filtry a rms voltmetry, real-time digitálními filtry, dynamickými analyzátory signálů obsahující rychlou Fourierovu transformaci, nebo jiným zpracováním signálu. [12,13]

5.5 Porovnávací metoda

Tato metoda je často zaměňována s dříve popsanou substituční metodou. Rozdíl mezi metodami je, že u porovnávací metody nedochází k výměně mikrofonů, ale jsou měřeny současně. To omezuje zdroje chyb vyplívající z okolního hluku a také snižuje požadavky na stabilitu zdroje zvuku. [12]

6 Výběr mikrofonů

Jedním z úkolů této diplomové práce bylo vybrat některé MEMS mikrofony. Pro výběr mikrofonů byl zvolen internetový obchod www.Digikey.cz, který nabízí velké množství MEMS mikrofonů. Jsou zde nabízeny mikrofony jak analogové tak digitální od výrobců STMicroelectronics, Analog Device, InvenSense a Knowles Electronics. Z nabízených byly vybrány následující mikrofony.

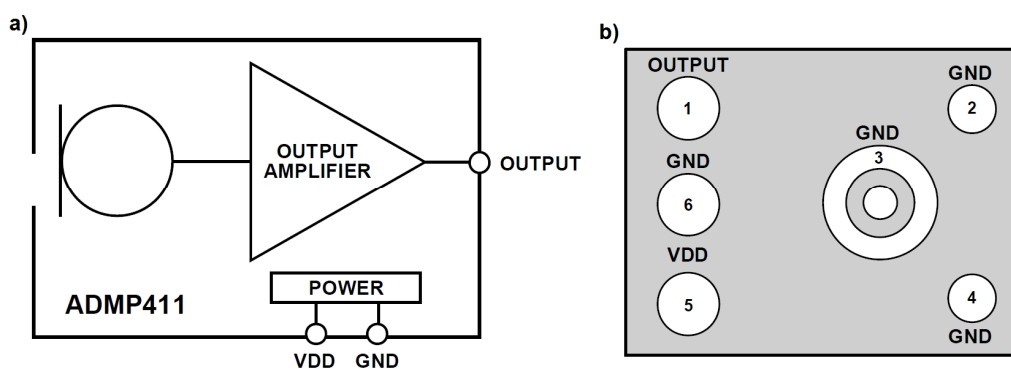
6.1 Analogové mikrofony

6.1.1 ADMP411

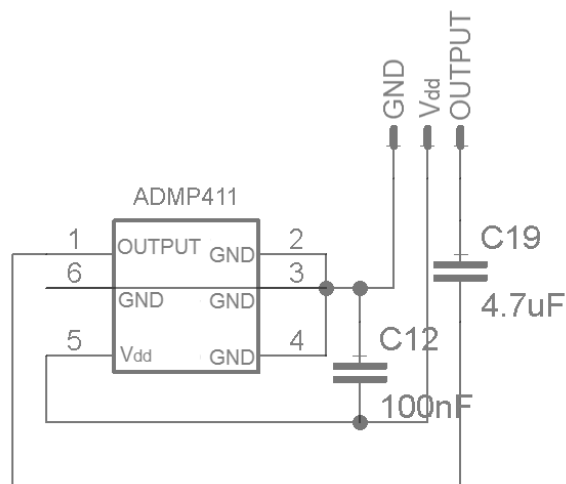
Je to mikrofon od společnosti Analog Device, který má vstupní port na spodní straně mikrofonu. Vyznačuje se nízkou spotřebou, širokopásmovou frekvenční odezvou. To má za následek přirozený zvuk s vysokou srozumitelností. [14]

Tab. 2. Parametry mikrofonu ADMP411 [14]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,5-3,6 [V]
Výstupní impedance	200 [Ω]
Citlivost	-46 [dBV]
Frekvenční rozsah	28-20000 [Hz]
SPL max	131 [dB]
SNR	62 [dB]
THD	0.2 [%]



Obr. 18: a) Blokové schéma ADMP411, b) Konfigurace vývodů ADMP411 [14]



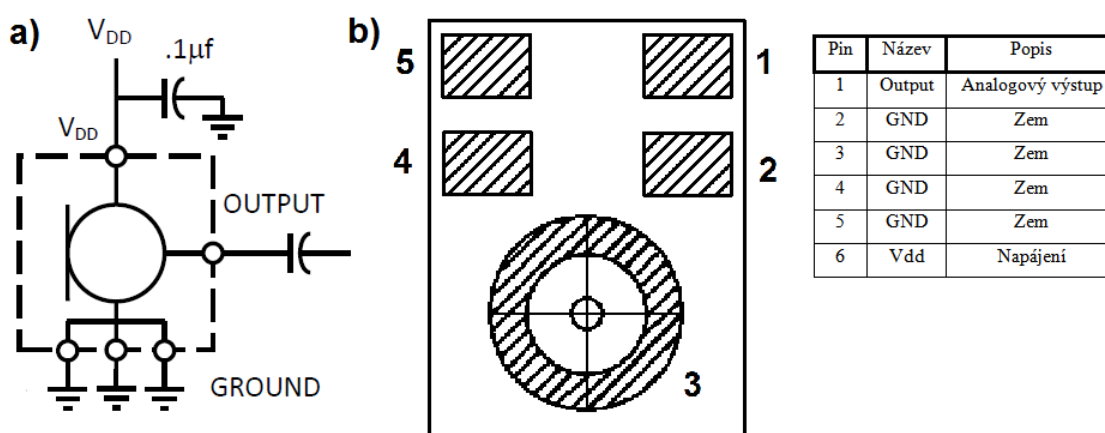
Obr. 19: Zapojení obvodu ADMP411

6.1.2 SPH0611LR5H-1

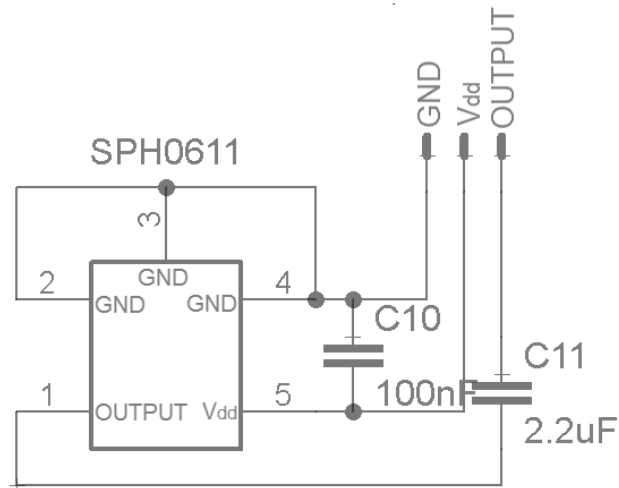
Mikrofon SPH0611LR5H-1 od společnosti Knowles Electronics je vysoce výkonný s nízkou spotřebou. Vstupní port je umístěn na spodní straně mikrofonu. Je vhodný pro chytré telefony, přenosné počítače, digitální telefony atd.. [15]

Tab. 3. Parametry mikrofonu SPH0611LR5H-1 [15]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,5-3,6 [V]
Výstupní impedance	400 [Ω]
Citlivost	-38 [dBV]
Frekvenční rozsah	100-10000 [Hz]
SPL max	124 [dB]
SNR	65 [dB]
THD	0.2 [%]



Obr.20: a) Blokové schéma SPH0611LR5H-1, b) Konfigurace vývodů SPH0611LR5H-1 [15]



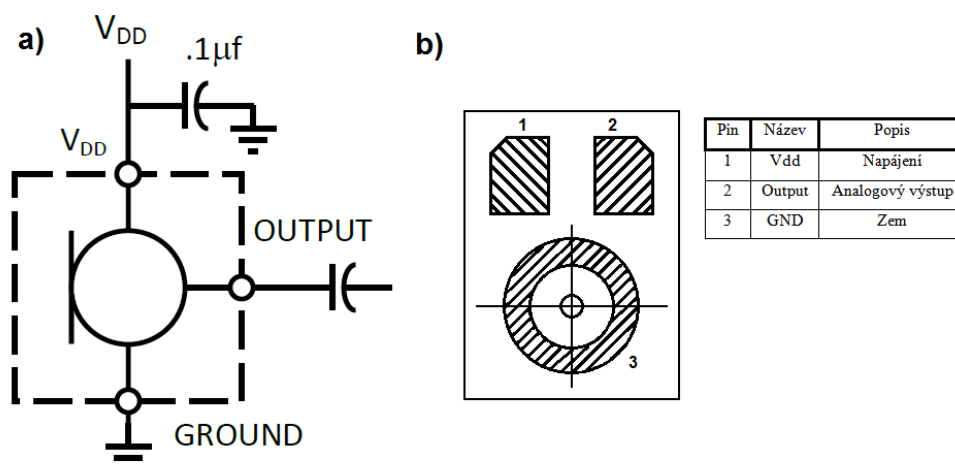
Obr. 21: Zapojení obvodu SPH0611LR5H-1

6.1.3 SPA2410LR5H-B

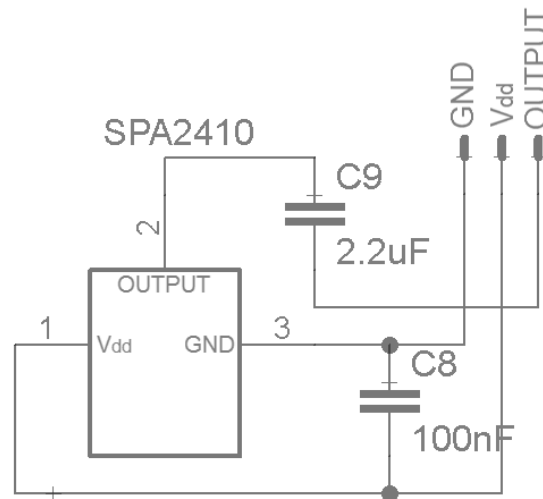
Mikrofon SPA2410LR5H-B od společnosti Knowles Electronics je vysoce výkonný s nízkou spotřebou. Vstupní port je umístěn na spodní straně mikrofonu. Je vhodný pro chytré telefony, přenosné počítače, digitální telefony atd.. [16]

Tab. 4. Parametry mikrofonu SPA2410LR5H-B [16]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,5-3,6 [V]
Výstupní impedance	400 [Ω]
Citlivost	-38 [dBV]
Frekvenční rozsah	100-15000 [Hz]
SPL max	115 [dB]
SNR	63 [dB]
THD	0.5 [%]



Obr. 22: a) Blokové schéma SPA2410LR5H-B, b) Konfigurace vývodů SPA2410LR5H-B [16]



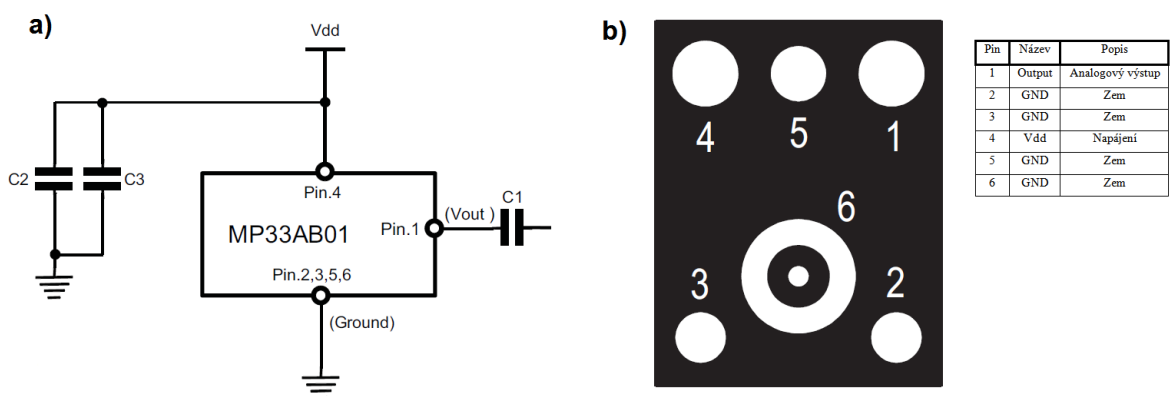
Obr. 23: Zapojení obvodu SPA2410LR5H-B

6.1.4 MP33AB01

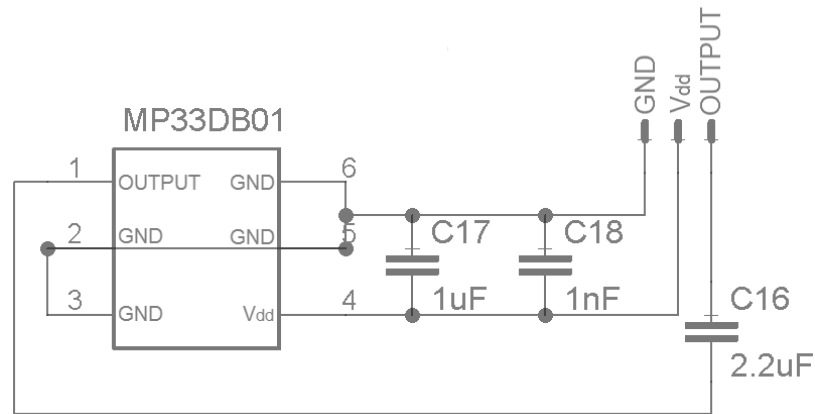
MP33AB01 je kompaktní mikrofon od společnosti STMicroelectronics. Je to mikrofon s nízkou spotřebou, velkou šířkou pásma a vysokou citlivostí. Vstupní port je umístěn na spodní straně mikrofonu. [17]

Tab. 5. Parametry mikrofonu MP33AB01 [17]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,5-3,6 [V]
Výstupní impedance	-
Citlivost	-38 [dBV]
Frekvenční rozsah	100-10000 [Hz]
SPL max	125 [dB]
SNR	63 [dB]
THD	<1 [%]



Obr. 24: a) Blokové schéma MP33AB01, b) Konfigurace vývodů MP33AB01 [17]



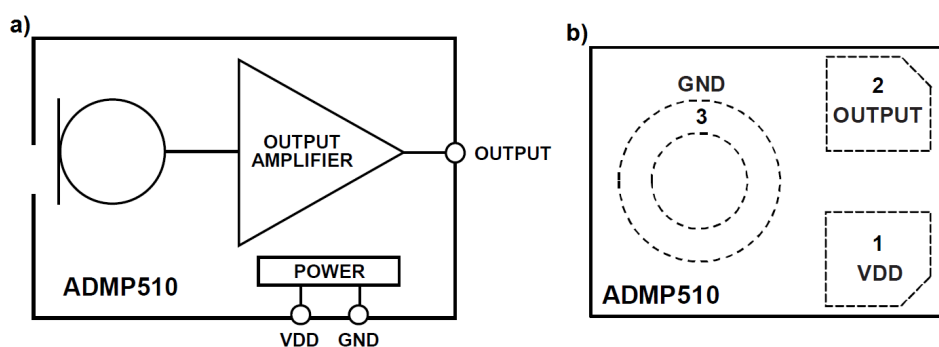
Obr. 25: Zapojení obvodu MP33AB01

6.1.5 ADMP510

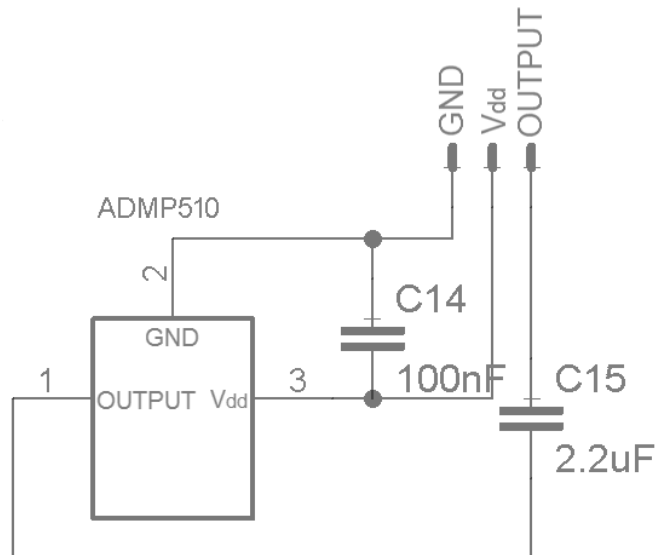
Mikrofon ADMP510 od společnosti InvenSense je všesměrový mikrofon s velkou šířkou pásma. Vstupní port je umístěn na spodní straně mikrofonu. Specifikace citlivosti dělá z tohoto mikrofonu vynikající volbu pro aplikace blízkého a vzdáleného pole. [18]

Tab. 6. Parametry mikrofonu ADMP510 [18]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,5-3,6 [V]
Výstupní impedance	350 [Ω]
Citlivost	-38 [dBV]
Frekvenční rozsah	60-20000 [Hz]
SPL max	124 [dB]
SNR	65 [dB]
THD	0,2 [%]



Obr. 26: a) Blokové schéma ADMP510, b) Konfigurace vývodů ADMP510 [18]



Obr. 27: Zapojení obvodu ADMP510

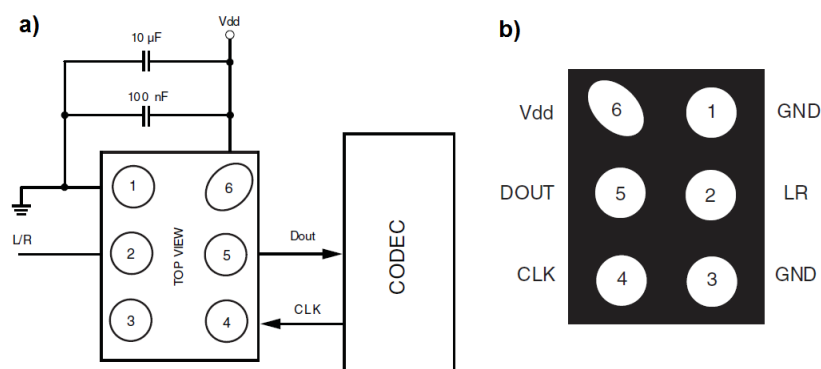
6.2 Digitální mikrofony

6.2.1 MP45DT02

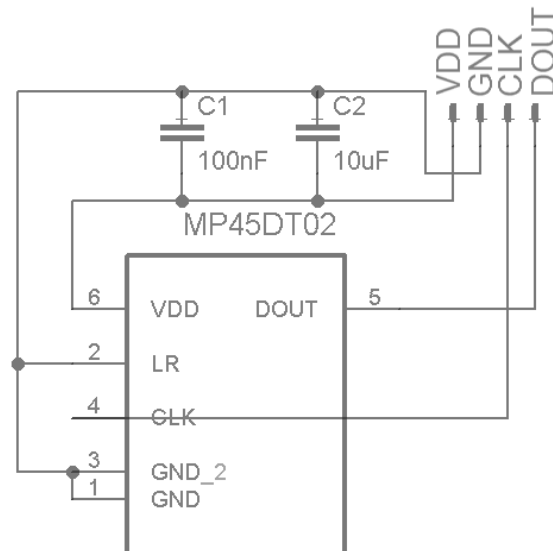
MP45DT02 je kompaktní všesměrový digitální mikrofon s vysokou citlivostí od společnosti STMicroelectronics. Vstupní port je umístěn na horní straně mikrofonu. Výstupní signál je ve formátu PDM. [19]

Tab. 7. Parametry mikrofonu MP45DT02 [19]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,6-3,6 [V]
CLK max	3,25 [MHz]
Citlivost	-26[dBV]
Frekvenční rozsah	100-10000 [Hz]
SPL max	120 [dB]
SNR	61 [dB]
THD	<1 [%]



Obr. 28: a) Blokové schéma MP45DT02, b) Konfigurace vývodů MP45DT02 [19]



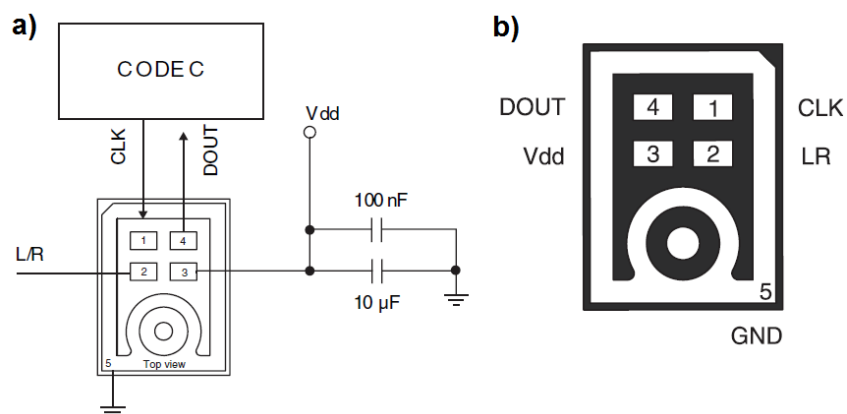
Obr. 29: Zapojení obvodu MP45DT02

6.2.2 MP34DB01

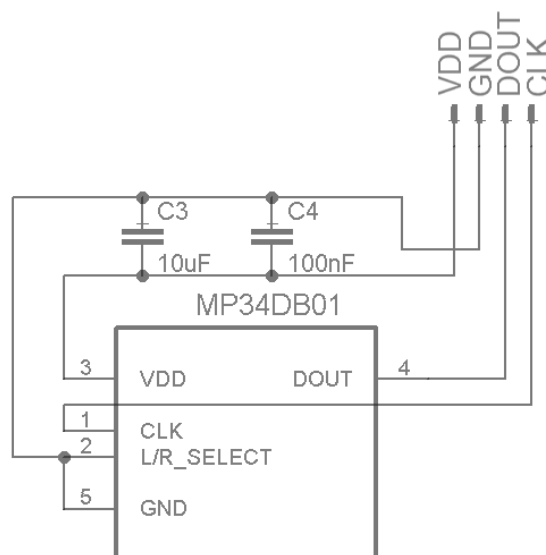
MP34DB01 je ultra kompaktní digitální mikrofon od společnosti STMicroelectronics. Jedná se o kapacitní všesměrový mikrofon s nízkou spotřebou. Výstupní signál je ve formátu PDM. Vstupní port je umístěn na spodní straně mikrofonu. [20]

Tab. 8. Parametry mikrofonu MP34DB01 [20]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,6-3,6 [V]
CLK max	3,25 [MHz]
Citlivost	-26[dBV]
Frekvenční rozsah	20-20000 [Hz]
SPL max	120 [dB]
SNR	62,6 [dB]
THD	<1 [%]



Obr. 30: a) Blokové schéma MP34DB01, b) Konfigurace vývodů MP34DB01 [20]



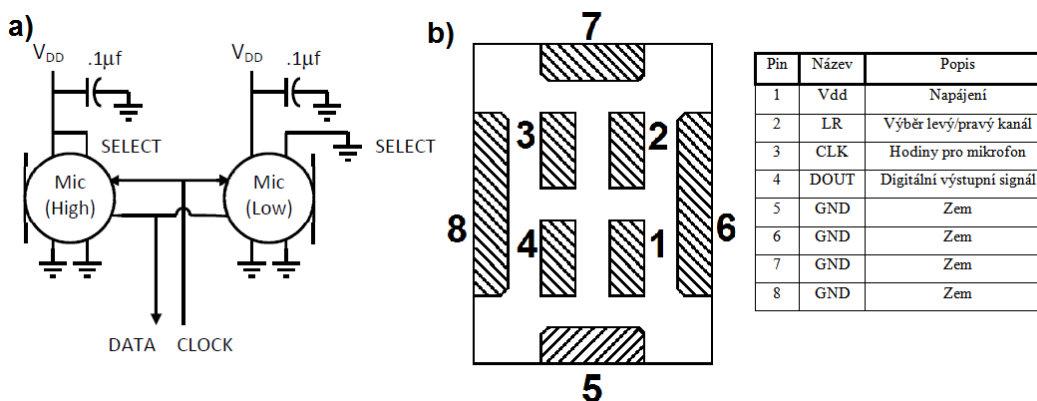
Obr. 31: Zapojení obvodu MP34DB01

6.2.3 SPK0415HM4H-B

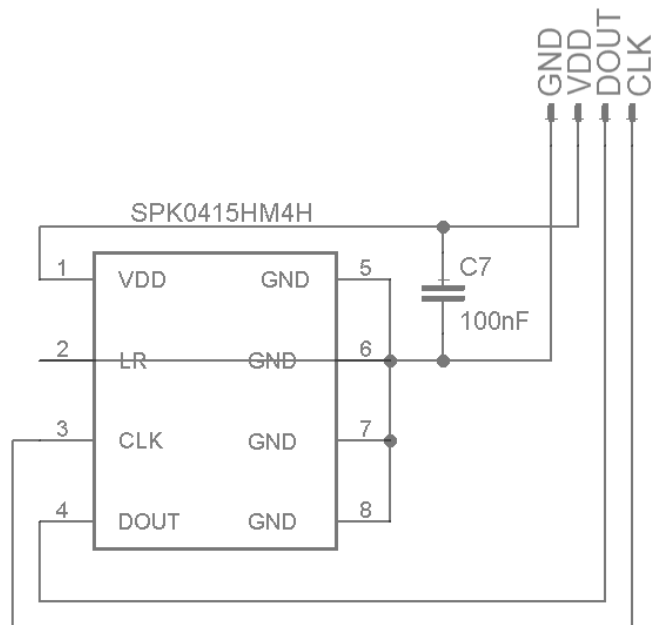
Mikrofon SPK0415HM4H-B je miniaturní vysoce výkonný digitální mikrofon od společnosti Knowles Electronics. Je vhodný pro chytré telefony, přenosné počítače, digitální telefony atd.. Výstupní signál je ve formátu PDM. Vstupní port je umístěn na horní straně mikrofonu. [21]

Tab. 9. Parametry mikrofonu SPK0415HM4H-B [21]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,6-3,6 [V]
CLK max	3,25 [MHz]
Citlivost	-26[dBV]
Frekvenční rozsah	100-10000 [Hz]
SPL max	122 [dB]
SNR	61 [dB]
THD	0,1 [%]



Obr. 32: a) Blokové schéma SPK0415HM4H-B b) Konfigurace vývodů SPK0415HM4H-B [21]



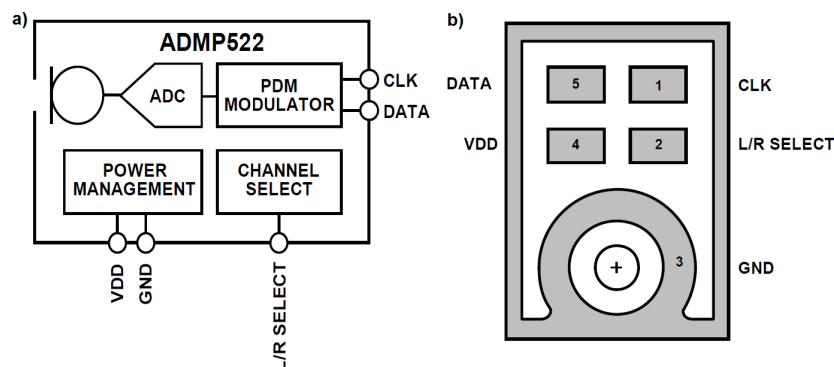
Obr. 33: Zapojení obvodu SPK0415HM4H-B

6.2.4 ADMP522

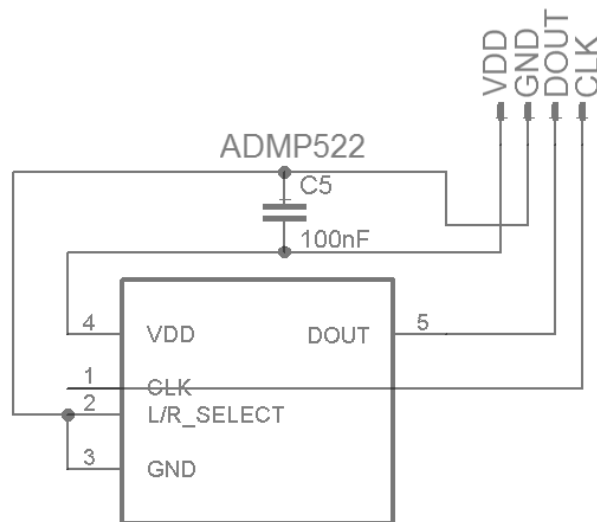
ADMP522 je všesměrový digitální mikrofon od společnosti InvenSense. Tento mikrofon má velký odstup signál šum (SNR) a dobrou citlivost. Z tohoto důvodu je vhodnou volbou pro mnoho aplikací. Výstupní signál je ve formátu PDM. Vstupní port je umístěn na spodní straně mikrofonu. [22]

Tab. 10. Parametry mikrofonu ADMP522 [22]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,6-3,6 [V]
CLK max	3,6 [MHz]
Citlivost	-26[dBV]
Frekvenční rozsah	75-20000 [Hz]
SPL max	116 [dB]
SNR	65 [dB]
THD	0,5 [%]



Obr. 34: a) Blokové schéma ADMP522, b) Konfigurace vývodů ADMP522 [22]



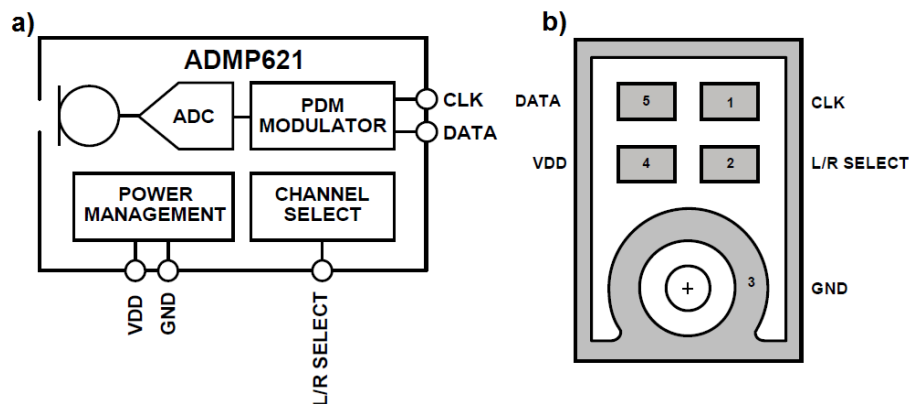
Obr. 35: Zapojení obvodu ADMP522

6.2.5 ADMP621

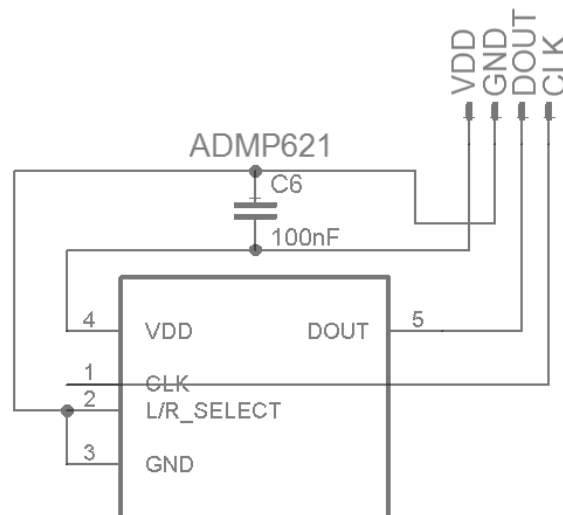
ADMP621 je digitální mikrofon od společnosti Analog Device. Výstupní signál je ve formátu PDM. Výstupní port je umístěn na spodní straně mikrofonu. Mikrofon má vysokou úroveň akustického tlaku (SPL), malou spotřebu a širokopásmovou odezvu. Tento mikrofon je schopný jasně zachytit zvuk v hlučném prostředí. [23]

Tab. 11. Parametry mikrofonu ADMP621 [23]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,6-3,6 [V]
CLK max	3,6 [MHz]
Citlivost	-46[dBV]
Frekvenční rozsah	45-20000 [Hz]
SPL max	133 [dB]
SNR	65 [dB]
THD	0,35 [%]



Obr. 36: a) Blokové schéma ADMP621, b) Konfigurace vývodů ADMP621 [23]



Obr. 37: Zapojení obvodu ADMP621

6.3 Možnosti STM32F4

Pro práci s digitálními mikrofony jsem se rozhodl použít kit STM32F4DISCOVERY od společnosti STMicroelectronics obsahující velmi výkonný procesor STM32F407VGT6. Důležitými vlastnostmi použitého kitu jsou. [24]

- ST-LINK/V2 rozhraní pro programování a debugging (připojitelné k PC přes USB),
- externí napájení aplikací: 3V a 5V
- 1MB Flash paměť, 192kbit RAM
- maximální frekvence hodinového signálu 168 MHz (hlavní sběrnice AHB2), 84 MHz (periferní sběrnice APB2), 36 MHz (A/D převodník), 100 MHz (GPIO piny)
- CS43L22 audio DAC
- rozhraní USB-OTG, I2C, I2S, SPI, U(S)ART, SDIO (pro SD/MMC karty)

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prostudování možností a řešení MEMS mikrofonů. Na začátku práce jsem okrajově přiblížil běžné typy používaných mikrofonů.

Práce dále popisuje samotné MEMS mikrofony. Nejdříve je zde přiblíženo základní rozdělení MEMS mikrofonů a jejich konstrukční provedení. V této části jsou také zmíněny aplikace, ve kterých jsou MEMS mikrofony používány. Hlavním bodem této části je popis principů, na kterých je založena funkce těchto mikrofonů. Nejvyužívanější je princip založený na změně kapacity, který je využívá 80 % všech MEMS mikrofonů. Dalšími principy jsou piezoelektrický princip a optický princip.

V následujících kapitolách jsou přiblíženy parametry mikrofonů. Tyto parametry jsou v závěrečné části práce měřeny a vyhodnocovány. Jsou zde také rozebrány metody sloužící ke kalibraci mikrofonů. Z výčtu těchto metod byla následně vybrána metoda použitá při měření vybraných parametrů.

Dalším hlavním bodem bylo vybrání MEMS mikrofonů, pro které byly zhotoveny testovací přípravky. Bylo vybráno deset mikrofonů od výrobců STMicroelectronics, Analog Device, InvenSense a Knowles Electronics. Z toho byl pět analogových a pět digitálních. Výstupem digitálních mikrofonů je signál modulovaný pulsně hustotní modulací (PDM). Z toho důvodu je na výstupu jednobitový digitální signál. Pro další zpracování digitálních mikrofonů byl zvolen kit STM32F4DISCOVERY of společnosti STMicroelectronics, který obsahuje 24-bit audio DAC. Sloužící k vytvoření signálu modulovaného pomocí PCM.

V době odevzdání diplomové práce nebyly mikrofony změřeny. Z toho důvodu práce neobsahuje naměřené hodnoty.

8 Použitá literatura

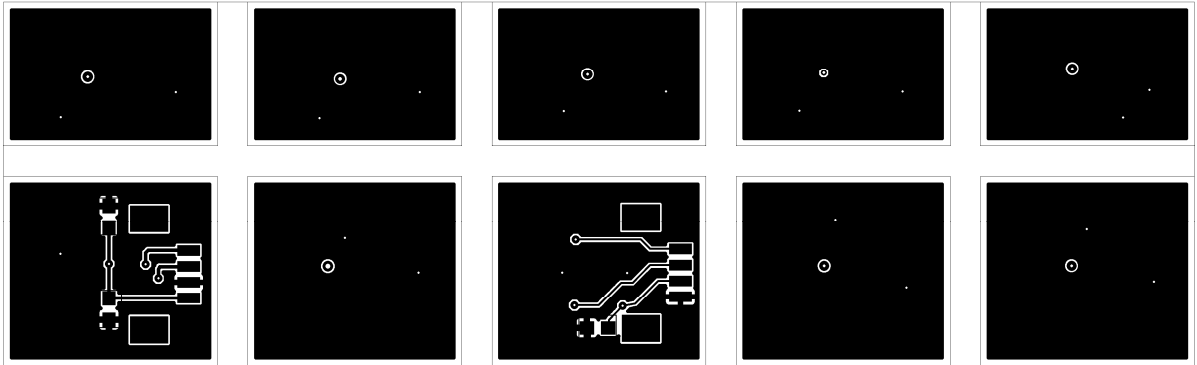
- [1] Konstrukce mikrofonů. [online]. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: http://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html
- [2] Principy a typy mikrofonních systémů. [online]. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.janzaudio.com/clanky/principy-a-typy-mikrofonnich-systemu.html>
- [3] Elektroakustika. [online]. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/375-elektroakustika>
- [4] HUSÁK, M.: *MEMS a mikrosystémové technologie. Automa* [online]. 2008, č. 11 s. 7-11. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38122.pdf>
- [5] Tutorial for MEMS microphones. [online]. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/application_note/DM00103199.pdf
- [6] SYED ARSALAN JAWED: *CMOS READOUT INTERFACES FOR MEMS CAPACITIVE MICROPHONES*, [online]. DIT-University of Trento, 2009. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: http://eprints-phd.biblio.unitn.it/82/1/thesis_mems_microphone_readout.pdf
- [7] JAEWOO, LEE, C.H., JE, W.S., YANG, JONGDAE, KIM.: *Structure-Based Equivalent Circuit Modeling of a Capacitive-Type MEMS Microphone*, [online]. Daejeon, Republic of Korea, 2012. [cit.2015-04-25]. ISBN: 978-1-4673-1156-4. Dostupné z doi: 10.1109/ISCIT.2012.6380896
- [8] KIM, J.Y.-H., LIU, Y., SCIANMARELLO, N., TAI, Y.C.: *PIEZOELECTRIC PARYLENE-C MEMS MICROPHONE*, [online]. Barcelona, 2013. [cit.2015-04-25]. Dostupné z doi: 10.1109/Transducers.2013.6626695
- [9] MURALIDHAR, Y.C., NEETHU, K.N., NAGARAJA, V.S., PINJARE, S.L.: *Design and simulation of polymer piezo-electric MEMS microphone*, [online]. Bengaluru, 2013. [cit.2015-04-25]. ISBN: 978-1-4799-1599-6. Dostupné z doi: 10.1109/CCUBE.2013.6718562
- [10] KUNTZMAN, M.L., GARCIA, C.T., ONARAN, A.G., AVENSON, B., KIRK, K.D., HALL, N.A.: *Performance and Modeling of a Fully Packaged Micromachined Optical Microphone*, [online]. 2011. [cit.2015-04-25]. ISSN: 1057-7157. Dostupné z doi: 10.1109/JMEMS.2011.2148164
- [11] Škvor, Z. *Elektroakustika - měření*. 3. vyd. ČVUT, 1995. 214 s. ISBN: 80-01-01258-1
- [12] Brüel & Kjør. *Microphone Handbook vol.1*. [online]. 1996, [cit. 2015-04-25]. Dostupný z: <http://www.bksv.com/doc/be1447.pdf>

- [13] ZUCKERWAR, A., HERRING, G., ELBING, B.: *Calibration of the pressure sensitivity of microphones by a free-field method at frequencies up to 80 khz*, [online]. 2006. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: http://www.researchgate.net/profile/Brian_Elbing/publication/7320533_Calibration_of_the_pressure_sensitivity_of_microphones_by_a_free-field_method_at_frequencies_up_to_80_khz/links/013323b877ab697710c7ef6a.pdf
- [14] ANALOG DEVICE, ADMP411 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/ADMP411.pdf>
- [15] KNOWLES ELECTRONICS, SPH0611LR5H-1 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.knowles.com/jpn/content/download/5639/89344/version/4/file/SPH0611LR5H-1.pdf>
- [16] KNOWLES ELECTRONICS, SPA2410LR5H-B [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.mouser.com/ds/2/218/SPA2410LR5H-B-276175.pdf>
- [17] STMICROELECTRONICS, MP33AB01 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00074869.pdf>
- [18] INVENSENSE, ADMP510 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.farnell.com/datasheets/1794374.pdf>
- [19] STMICROELECTRONICS, MP45DT02 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00025467.pdf>
- [20] STMICROELECTRONICS, MP34DB01 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00284650.pdf>
- [21] KNOWLES ELECTRONICS, SPK0415HM4H-B [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.knowles.com/eng/content/download/3897/49396/version/6/file/SPK0415HM4H-B.pdf>
- [22] INVENSENSE, ADMP522 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.invensense.com/mems/microphone/documents/ADMP522.pdf>
- [23] ANALOG DEVICE, ADMP621 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/ADMP621.pdf>
- [24] STMICROELECTRONICS, STM32F4 [online]. 2013, [cit. 2015-05-01]. Dostupný z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00037955.pdf

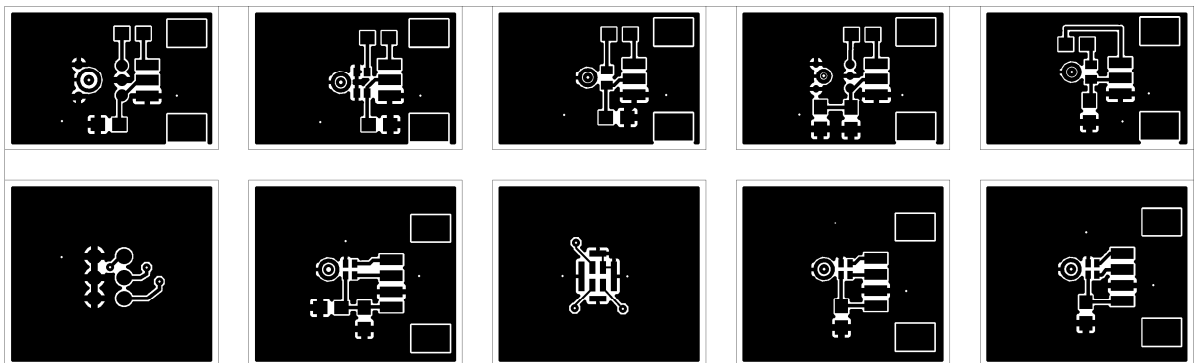
9 Přílohy

Příloha A – Motiv DPS

Rozměry desky jsou 94,1 x 28,7. BOTTOM vrstva.



Rozměry desky jsou 94,1 x 28,7. TOP vrstva.



Příloha B – Osazovací plán DPS

Osazovací plán BOTTOM vrstvy:



Osazovací plán TOP vrstvy:

