

**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 mikrofونů**
Zadávatel 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 mikrofونů MEMS.
2. Pro vybraný MEMS mikrofون navrhňte a realizujte testovací přípravku.
3. Proveďte měření parametrů mikrofону 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.

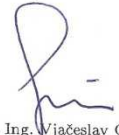
Vedoucí diplomové práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 29. června 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 20. srpna 2015


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 29. června 2015

Anotace

Práce se soustředí na prozkoumání parametrů a různých principů měření MEMS mikrofonů. V práci jsou analyzovány základní principy a funkce těchto mikrofonů. Další část práce zkoumá základní rysy a kalibrační metody zmíněných mikrofonů. V rámci práce bylo vybráno několik zajímavých mikrofonů, pro které byly navrženy DPS. Snímače byly realizovány. Následně byla zvolena vhodná měřicí metoda pro ověření parametrů jednotlivých senzorů.

Klíčová slova

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

Abstract

This thesis focuses on exploring the parameters and different measuring principles MEMS microphones. In the thesis are analysed basic principles and functions of these microphones. Next part of this thesis researches fundamental features and calibration methods of mentioned microphones. As part of thesis was chosen several interesting microphones, for which were designed DPS. Sensors were implemented. Subsequently, it was selected a suitable measuring method for verifying the parameters of each sensors.

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 20.8.2015

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 parametry mikrofonů	20
4.1 Citlivost	20
4.2 Odstup signál šum (SNR).....	20
4.3 Impedance	20
4.4 Frekvenční charakteristika	21
4.5 Směrová charakteristika	21
4.6 THD.....	22
4.7 Maximální hodnota akustického tlaku (AOP).....	23
4.8 EIN	23
4.9 Dynamický rozsah.....	23
5 Kalibrační metody.....	24
5.1 Metoda reciprocity	25
5.2 Metoda pistonfonu.....	25
5.3 Elektrostatická kalibrační metoda	26

5.4	Substituční metoda	26
5.5	Porovnávací metoda	27
6	Výběr mikrofonů.....	27
6.1	Analogové mikrofony	28
6.1.1	ADMP411	28
6.1.2	SPH0611LR5H-1	29
6.1.3	SPA2410LR5H-B	30
6.1.4	MP33AB01	31
6.1.5	ADMP510	32
6.2	Digitální mikrofony	34
6.2.1	MP45DT02	34
6.2.2	MP34DB01	35
6.2.3	SPK0415HM4H-B	36
6.2.4	ADMP522	37
6.2.5	ADMP621	38
6.3	Možnosti STM32F4	40
6.4	Návrh a realizace DPS.....	40
7	Měření.....	41
7.1	Způsob měření.....	41
7.2	Měření analogových mikrofonů	42
7.3	Měření digitálních mikrofonů	42
8	Závěr	44
9	Použitá literatura	45
10	Přílohy.....	47

Seznam symbolů a zkratek

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 [F].
X_U, X_0	Vzdálenost elektrod [m].
C_0	Jmenovitá kapacita [F].
C_{P1}, C_{P2}	Parazitní kapacita elektrod [F].
$C_{P,IN}$	Celková parazitní kapacita [F].
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. 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 parametrů vybraných MEMS mikrofonů.

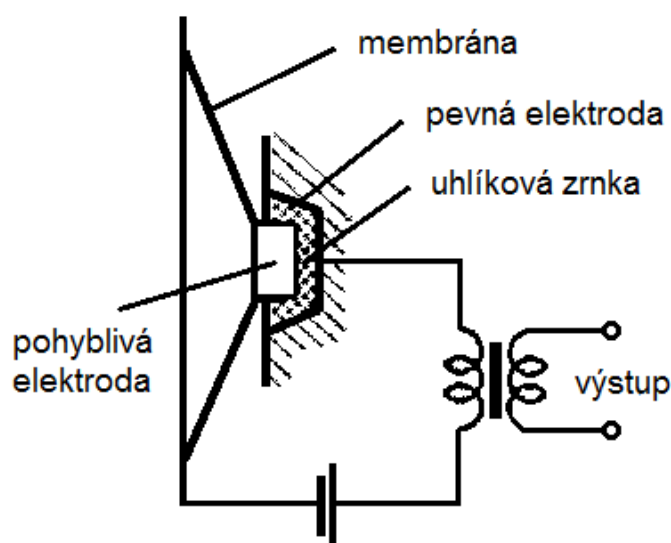
2 Mikrofon

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 byl zřejmě první použitelný mikrofon. Uhlíkový mikrofon se skládá z dvojice elektrod mezi nimiž jsou umístěna uhlíková zrnka. Jedna elektroda je pevná a druhá pohyblivá spojená s membránou. Při dopadu zvukových vln na membránu dochází k pohybu elektrody, to vyvolá změnu tlaku působícího na uhlíková zrnka. To má za následek změnu odporu uhlíkové vrstvy. Tento mikrofon funguje jako elektromechanický zesilovač, energie proudových změn může být větší než energie zvukových vln. Mikrofon je vyráběn v podobě mikrofonních vložek pro telefonní přístroje.

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



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

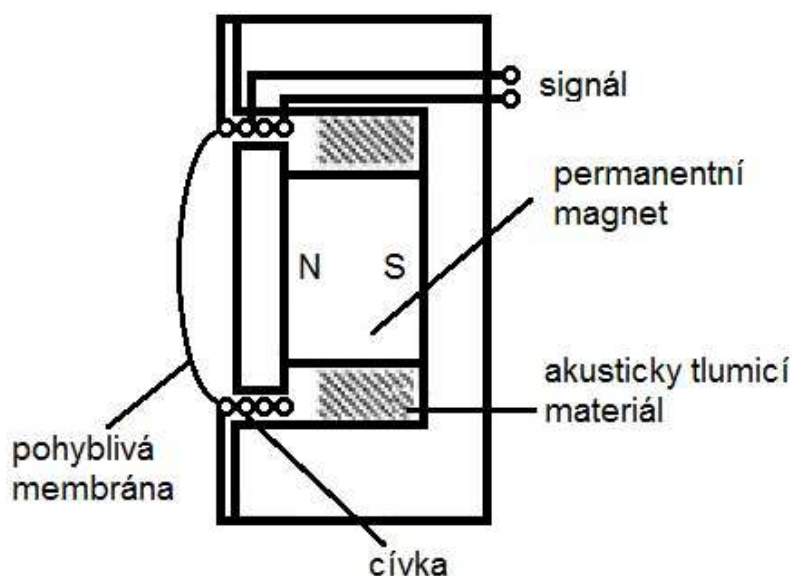
2.2 Elektrodynamický mikrofon

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. Používaným materiálem je hliníkový

nebo měděný drát. Dynamické mikrofony jsou méně citlivé než kondenzátorové mikrofony. Kvalitní výrobky přenášejí signály v rozsahu 30 Hz - 15 kHz.

Jedním z dynamických mikrofonů je páskový mikrofon, membránou je zvlněný vodivý pásek z tenké hliníkové fólie. Mohou dosahovat větších frekvenčních rozsahů než mikrofony elektrodynamické a elektrostatické, až 20 kHz.

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]

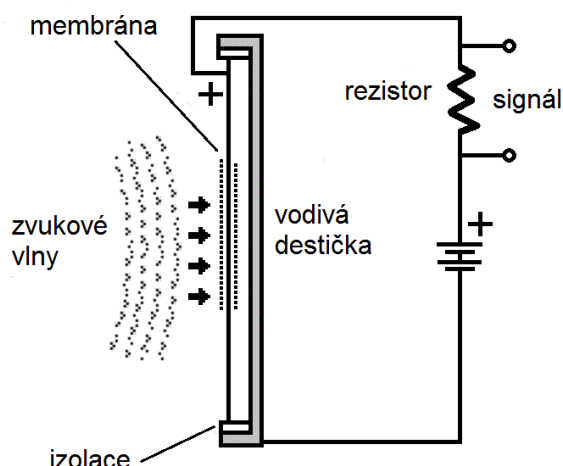


Obr. 2: Konstrukce elektrodynamického mikrofonu [2]

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 - 200 V. 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]

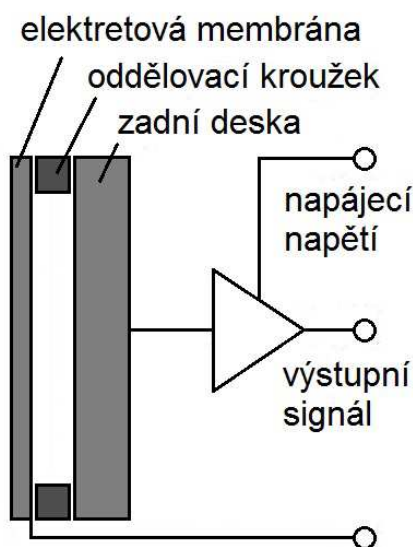


Obr. 3: Konstrukce elektrostatického mikrofonu [2]

2.3.1 Elektretový mikrofon

Elektretový mikrofon je zvláštním typem elektrostatického mikrofonu. Rozdíl od elektrostatického mikrofonu je, že nevyužívá externího polarizačního napětí, ale membrána je tvořena elektretem. Elektret je časově stálá hmota nesoucí permanentní elektrický náboj. 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, který je napájen baterií. Předzesilovač vyžadující připojené napětí je umístěn v mikrofonní kapsli.

Výhodou elektretového mikrofonu je nízká cena s kvalitou elektrostatických mikrofonů. Nevýhodou tohoto mikrofonu je, že membrána nesoucí elektrický náboj, má vyšší hmotnost. To má za následek špatnou účinnost systému při vyšších frekvencích vlivem setrvačnosti membrány. [1,2,3]

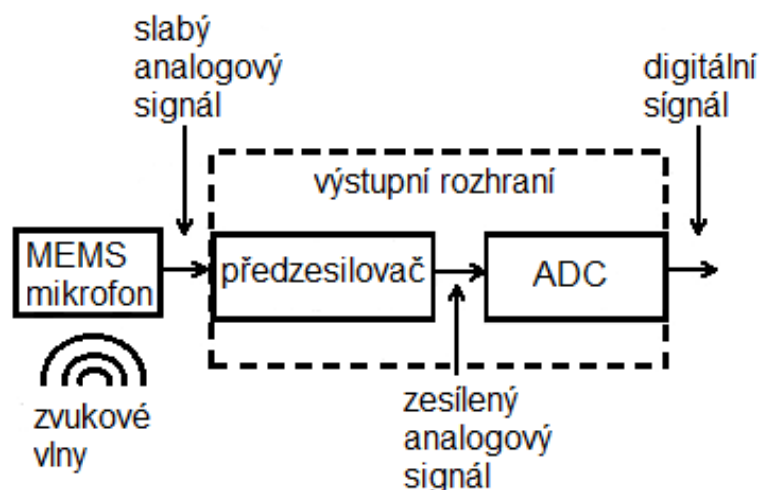


Obr. 3: Konstrukce elektretového mikrofonu [1]

3 MEMS Mikrofon

V roce 1983 byl vyroben první kapacitní mikrofon technologií MEMS. Zkratka MEMS neboli 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.

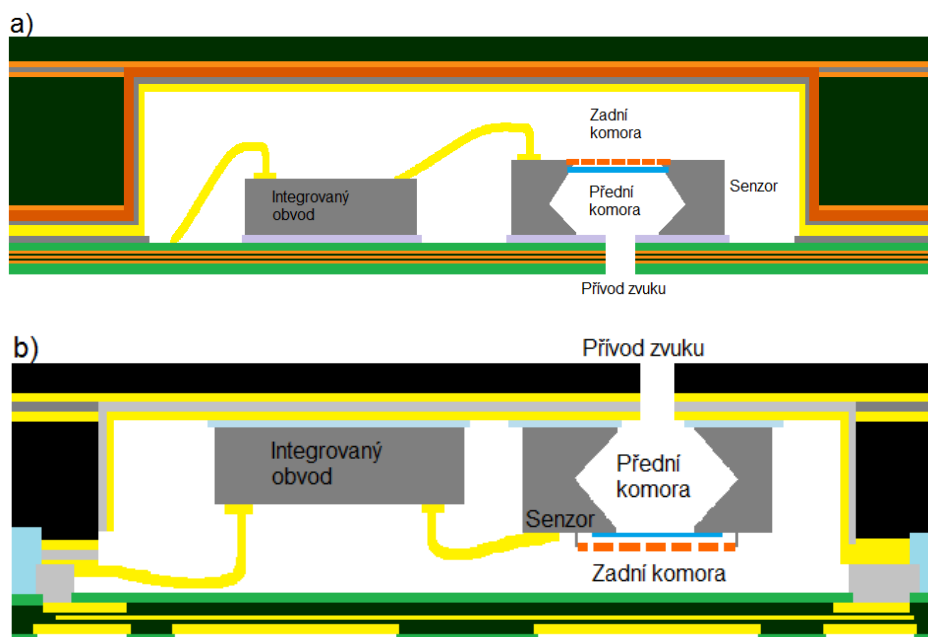
Technologie MEMS umožňuje umístit na jeden čip další pomocné obvody, jako jsou předzesilovač, různé aktivní filtry a A/D převodníky. To umožnilo vytvoření mikrofonů s digitálním výstupem. Digitální mikrofony využívají A/D převodník s modulátorem využívajícím pulsně hustotní modulaci PDM. K tomu se využívá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



Obr. 4: Bloková struktura MEMS mikrofonu [6]

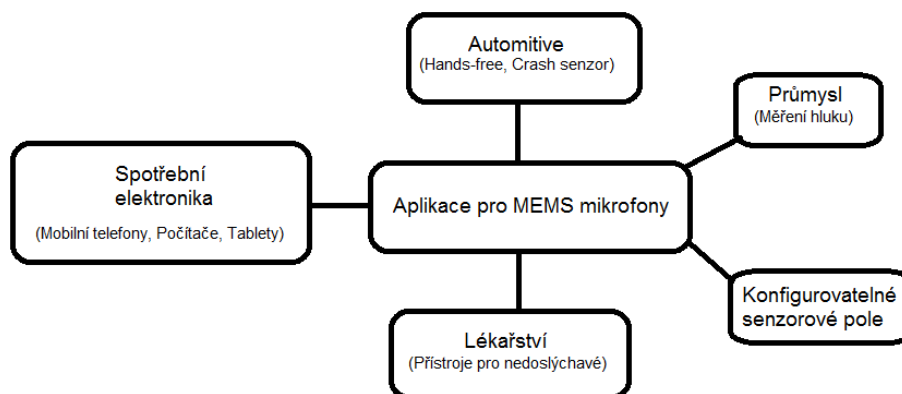
Existují dva typy MEMS mikrofonů lišících se v umístění vstupního portu mikrofonu. Vstupní port je umístěn na horní (top-port) nebo spodní (bottom-port) straně mikrofonu. Tyto struktury jsou zobrazeny na Obr. 5. Je zde zobrazeno umístění senzoru a příslušných pomocných obvodů. Toto rozložení optimalizuje 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]



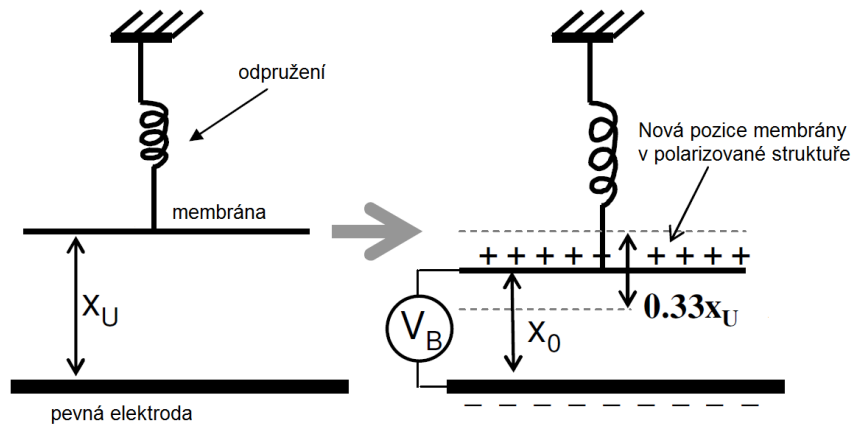
Obr. 6: Aplikace pro MEMS mikrofony [6]

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.



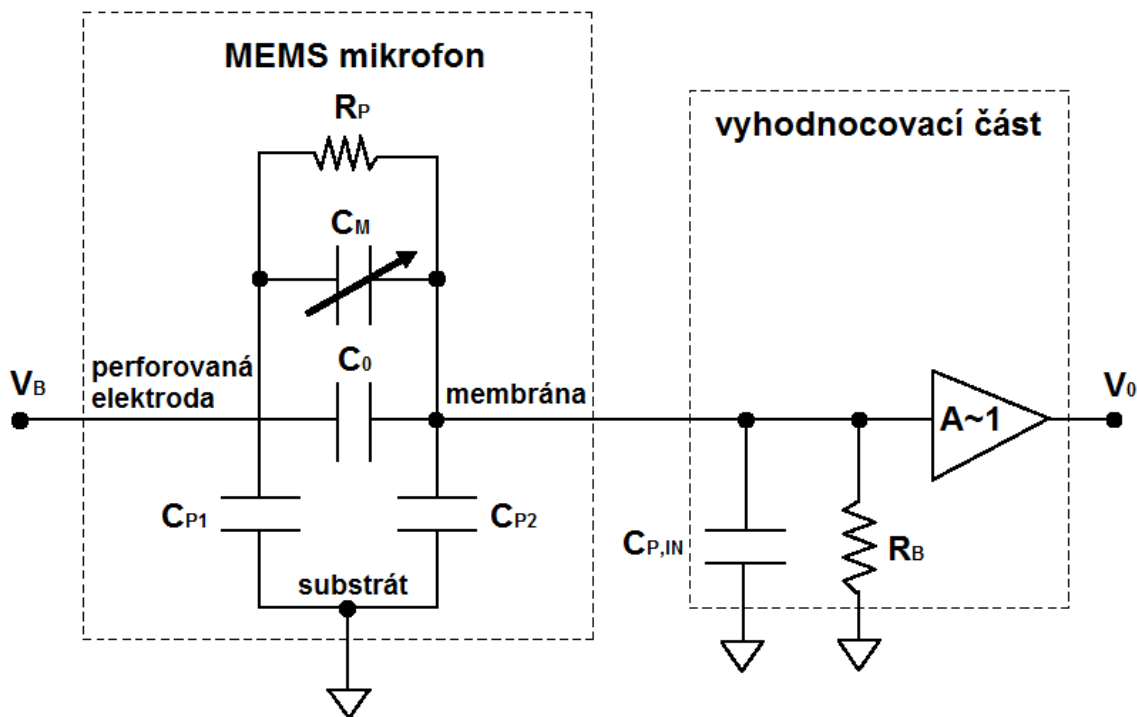
Obr. 8: Mechanická konstrukce kapacitního MEMS mikrofonu [6]

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 prezentovaná 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

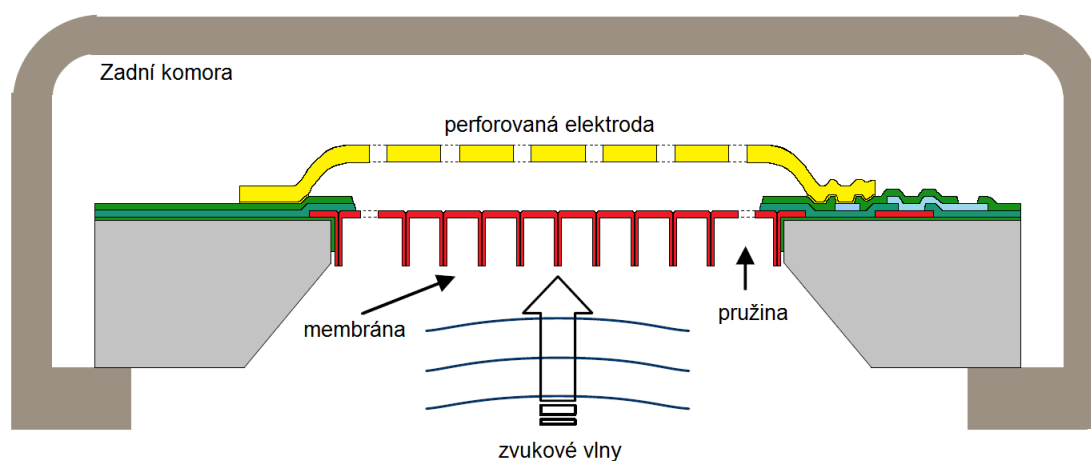
zhoršují citlivost mikrofonu. R_B je označení parazitního odporu vznikajícího mezi perforovanou elektrodou a membránou.

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]

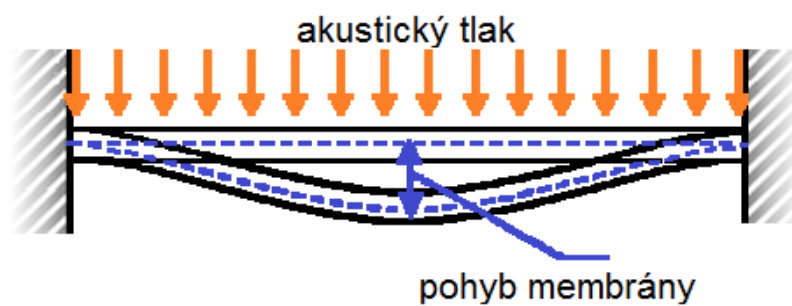


Obr. 7: Kapacitní MEMS mikrofon [6]

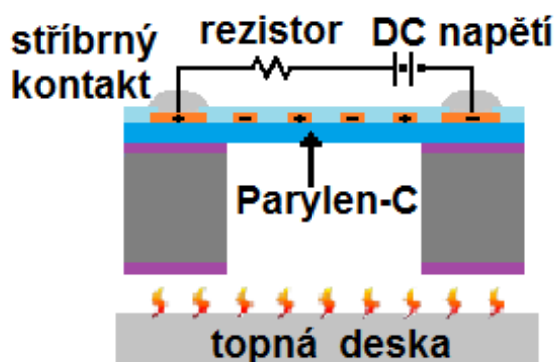
3.2 Piezoelektrický MEMS mikrofon

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), která je následně snímána a vyhodnocována.

Používanými piezoelektrickými materiály jsou např. PZT (Zirkoničitan-titaničitanu olova), PVDF (polyvinylidenfluorid) nebo Parylen-C. Nevýhodou těchto mikrofonů jsou technologické potíže při integraci piezoelektrických materiálů. Například materiál PZT vyžaduje relativně vysokou teplotu (500 - 700 °C) po celou dobu vytvrzování. [8,9]



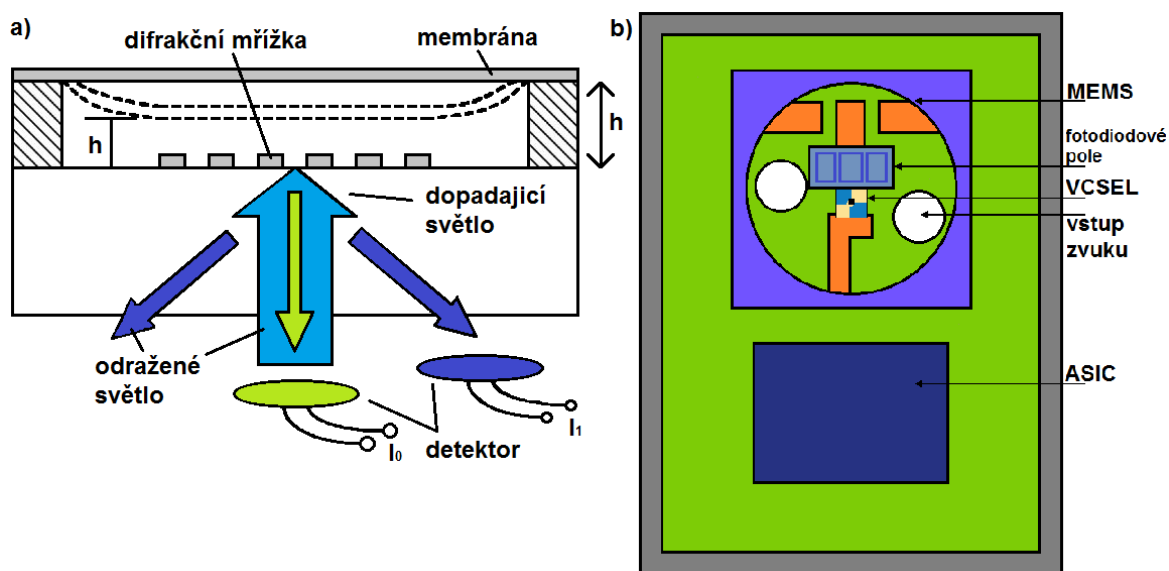
Obr. 10: Ilustrace pohybu membrány piezoelektrického MEMS mikrofonu [8]



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 mikrofonu je elektrická odezva na výstupu, vyvolaná akustickým tlakem na jeho vstupu. To je vyjádřeno poměrem výstupního napětí a hodnotou akustického tlaku, který napětí vyvolal. Standardní hodnota referenčního vstupního signálu pro měření citlivosti je 1 Pa, 94 dB hladiny akustického tlaku (SPL) pro sinusový signál o frekvenci 1 kHz. Citlivost je frekvenčně závislá hodnota a odvíjí se od ní další charakteristiky.

Jednotkou citlivosti analogových mikrofonů je mV/Pa. Hodnota v decibelech je vyjádřena pomocí následující rovnice:

$$L_m = 20 \cdot \log \frac{M \text{ [mV/Pa]}}{M_r} \text{ [dBV]} \quad (3)$$

Kde je referenční hodnota M_r 1 V/Pa.

U digitálních mikrofonů je citlivost vyjádřena jako procento z nejvyšší úrovně přijímaného signálu, který je generován sinusovým signálem při frekvenci 1 kHz a 94 dB SPL. Hodnota v decibelech je vyjádřena pomocí následující rovnice:

$$L_m = 20 \cdot \log \frac{M \text{ [%FS]}}{M_r} \text{ [dBFS]} \quad (4)$$

Kde hodnota M_r je nejvyšší hodnota přijímaného signálu. [3,5]

4.2 Odstup signál šum (SNR)

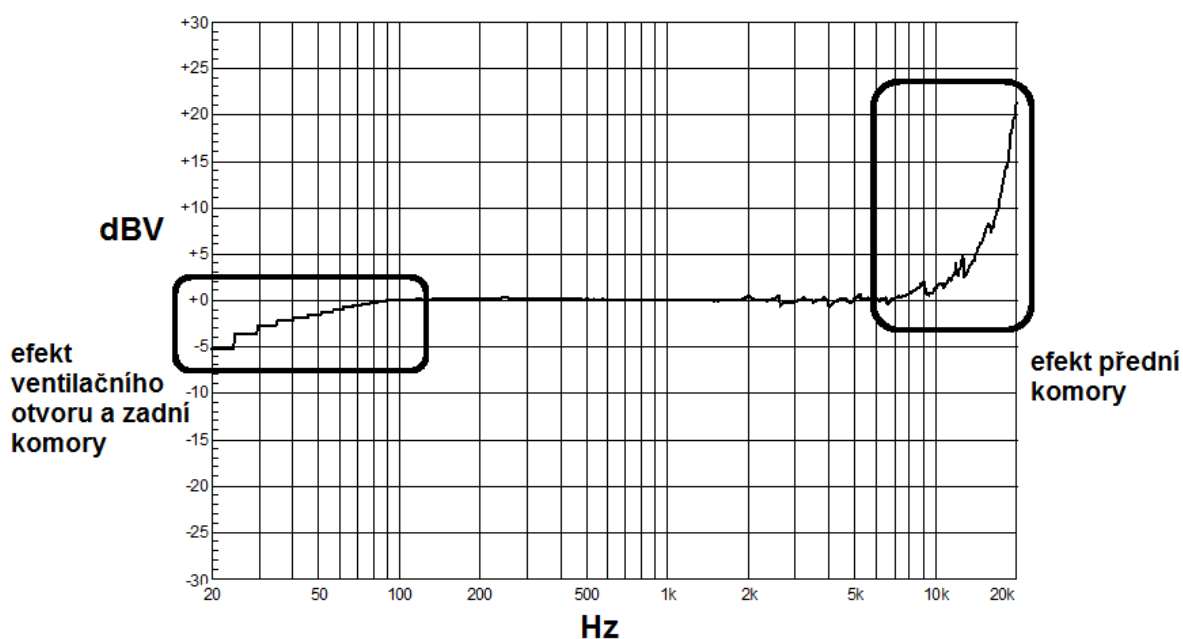
Odstup signál šum (SNR), určuje poměr mezi výstupním napětím vyvolaným referenční hodnotou akustického tlaku 1 Pa a šumového napětí při umístění mikrofonu v dokonale tichém prostředí. SNR je vyjádřen v dBA. Tento parametr zahrnuje šum MEMS prvku a specifického integrovaného obvodu. Hlavní část šumu je způsobena snímacím prvkem struktury MEMS. Specifický integrovaný obvod způsobuje zanedbatelný šum. [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. 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. Limity frekvenční charakteristiky jsou popsány jako body, ve kterých je odezva mikrofonu 3 dB pod referenční úrovní. Referenční úroveň je stanovena pro sinusový signál o frekvenci 1 kHz, 94 dB SPL a je normalizována na hodnotu 0 dBV. 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]



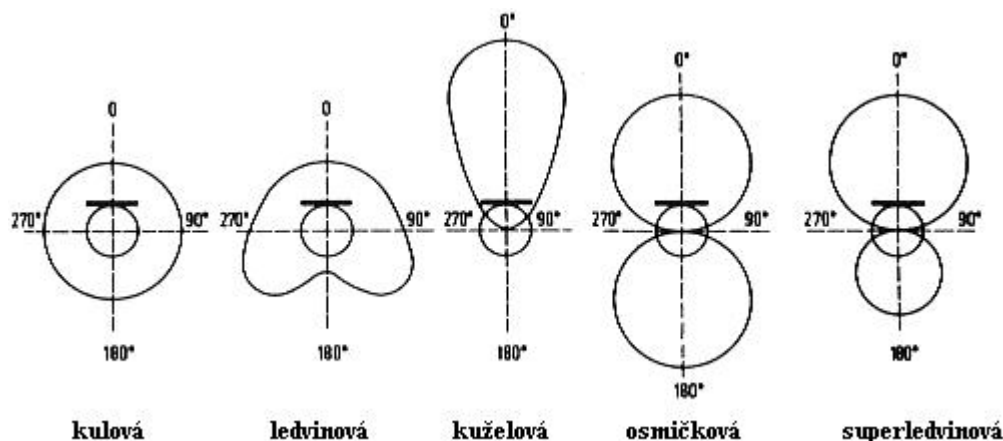
Obr. 13: Frekvenční charakteristika MEMS mikrofonu MP45DT02 [5]

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. THD je zkreslení ovlivňující výstupní elektrický signál. Zkreslení má za následek vznik vyšších harmonických frekvencí, ty jsou celočíselným násobkem základní frekvence. Zkreslení je vyjádřeno v procentech.

THD v závislosti na frekvenci

Pro měření celkového harmonického zkreslení se využívá frekvencí v rozsahu 40 Hz až 5 kHz. Frekvence lze měnit skokově nebo kontinuálně. Pro srovnání, je potřeba určit kolik harmonických složek se má uvažovat.

THD v závislosti na úrovni

Je měřeno pro sinusový signál o frekvenci 1 kHz s postupnou změnou SPL.

Vztah pro výpočet THD:

$$THD = \frac{\Sigma \text{Výkon vyšších harmonických}}{\text{Výkon základní harmonické}} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

$$THD + N = \frac{\Sigma \text{Výkon vyšších harmonických} + \text{Šum}}{\text{Výkon základní harmonické}} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

Zde je k vyšším harmonickým frekvencím přičten šum. [3,5]

4.7 Maximální hodnota akustického tlaku (AOP)

Je to hladina akustického tlaku (SPL), při které se zkreslení výstupního signálu mikrofonu THD rovná 10 %. Běžně se tento bod označuje jako ořezový bod mikrofonu. Při vyšších hodnotách SPL dochází k velkému nelineárnímu zkreslení výstupního signálu. Pro měření AOP se používá sinusový signál o frekvenci 1 kHz při různých hodnotách SPL. [3,5]

4.8 EIN

Ekvivalentní vstupní šum, je výstupní úroveň šumu mikrofonu vyjádřena v dBSPL. Jedná se o teoretický externí zdroj šumu umístěný na vstupu mikrofonu. EIN lze odvodit z dynamického rozsahu nebo specifikace SNR. [3,5]

4.9 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah mikrofonu je vyjádřen jako rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou SPL. Mikrofon má v tomto rozsahu lineární odezvu. Dynamický rozsah zjistíme jako rozdíl AOP a EIN. [3,5]

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

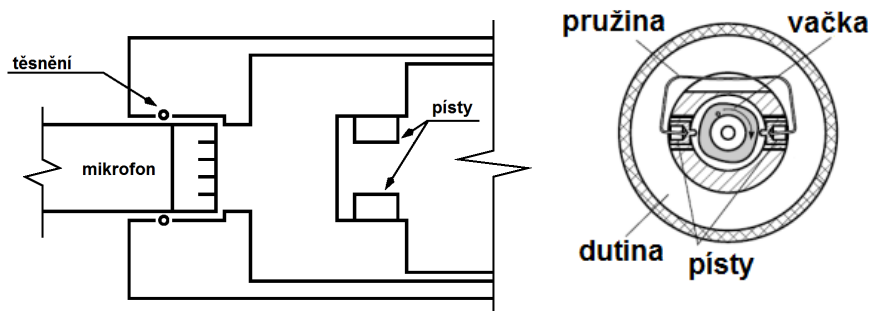
Jedná se o primární metodu stanovení citlivosti. Je to nejpřesnější metoda pro stanovení citlivosti mikrofonu. Metodu reciprocity lze použít jak pro měření citlivosti ve volném poli tak pro tlakovou kalibraci. Metoda reciprocity pro měření citlivosti ve volném poli je popsána normou ČSN EN 61094-3 a tlaková kalibrace normou ČSN EN 61094-2. 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

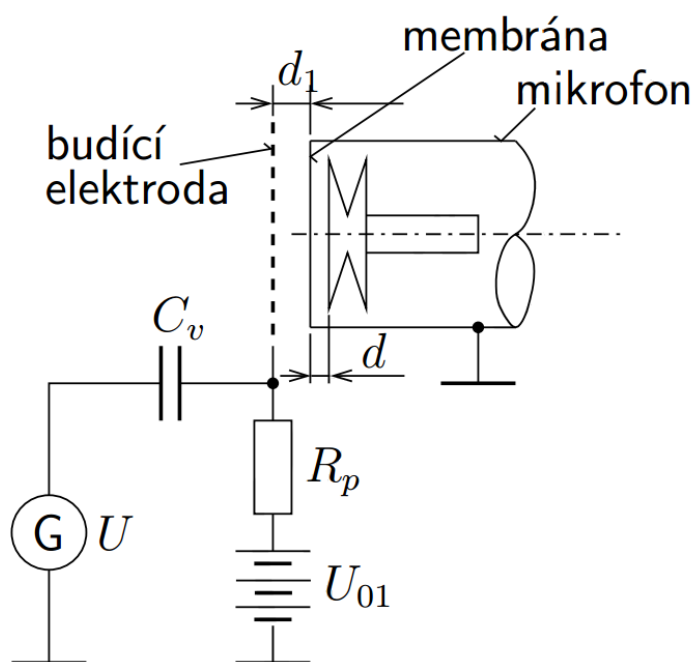
Metoda pistonfonu je založena na jednoduchém vztahu mezi výchylkou pístu a akustickým tlakem v uzavřené komůrce. Výhodou metody pistonfonu je možnost dobré a přesné měření výchylky pístu. Nevýhodou je velká hmotnost pístu, která omezuje rozsah měření pouze na nízké frekvence. Pistonfonem lze snadno měřit 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. Substituční metodu lze použít jak pro měření citlivosti ve volném poli tak pro tlakovou kalibraci. Substituční metoda pro měření citlivosti ve volném poli je popsána normou ČSN EN 61094-8 a tlaková kalibrace normou ČSN EN 61094-5. Měření citlivosti ve volném poli 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. Měření tlakové citlivosti se provádí pomocí spojky nebo zvukotěsné komory. Vlastnosti spojky musí být známi s vysokou přesností.

Signály používané jako zdroj zvuku mohou být: sinusový signál, různé druhy šumu (bílý šum, růžový šum atd.) i přechodné signály. Pro zpracování výstupního signálu mikrofonu jsou použity analogové filtry, RMS voltmetry, digitálními filtry a 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 vyplývající z okolního hluku a také snižuje požadavky na stabilitu zdroje zvuku. [12]

6 Výběr mikrofonů

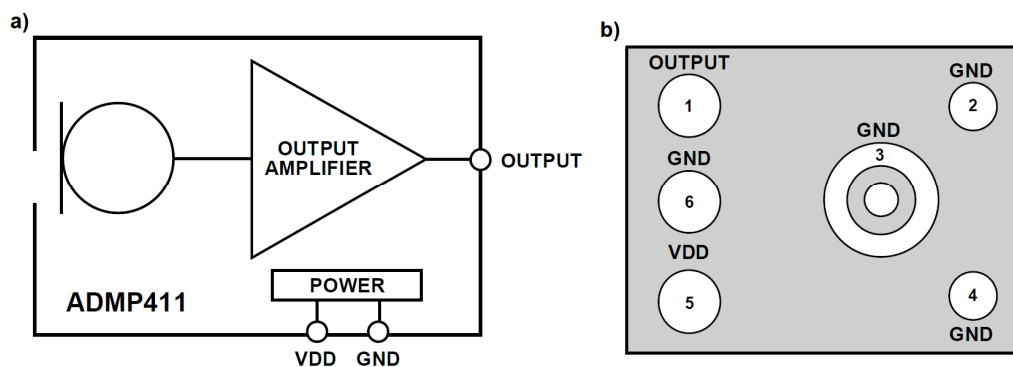
Jedním z úkolů této diplomové práce bylo vybrat některé MEMS mikrofony. Pro výběr mikrofonů byl zvolen internetový obchod www.Digikey.cz, který nabízí velké množství MEMS mikrofonů. Jsou zde nabízeny mikrofony jak analogové tak digitální od výrobců STMicroelectronics, Analog Device, InvenSense a Knowles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

Z nabízených mikrofonů byla vytvořena tabulka sloužící k porovnání parametrů udávaných výrobcem. Výsledná tabulka obsahující 64 mikrofonů, která je přiložena v elektronické příloze. Pomocí vytvořené srovnávací tabulky bylo vybráno 10 mikrofonů dostupných na trhu.

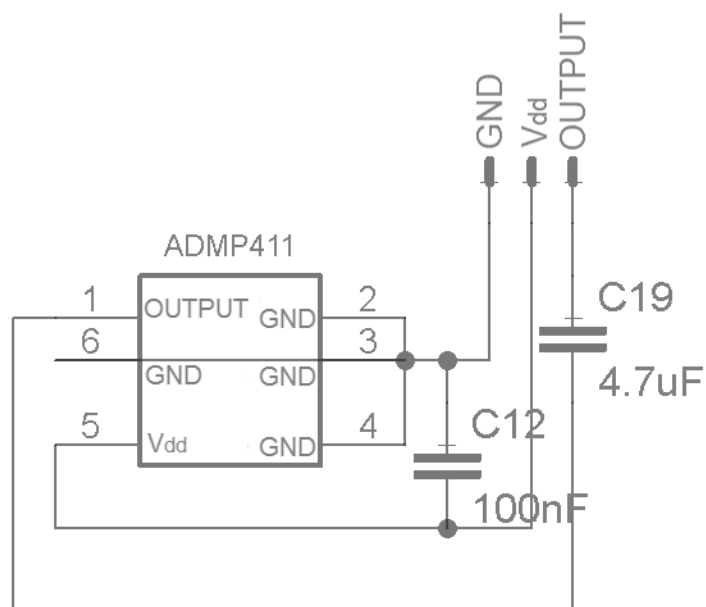
6.1 Analogové mikrofony

6.1.1 ADMP411

Mikrofon od společnosti Analog Device, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s lineární odezvou do 131 dB SPL, frekvenčním rozsahem 28 Hz - 20 kHz, citlivostí -46 dBV a SNR 62 dBA.



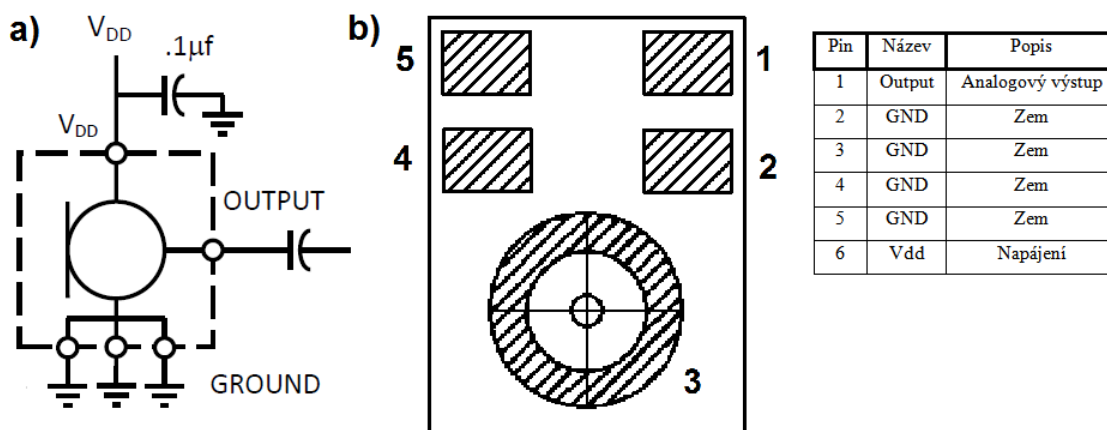
Obr. 18: a) Blokové schéma ADMP411, b) Konfigurace vývodů ADMP411 [14]



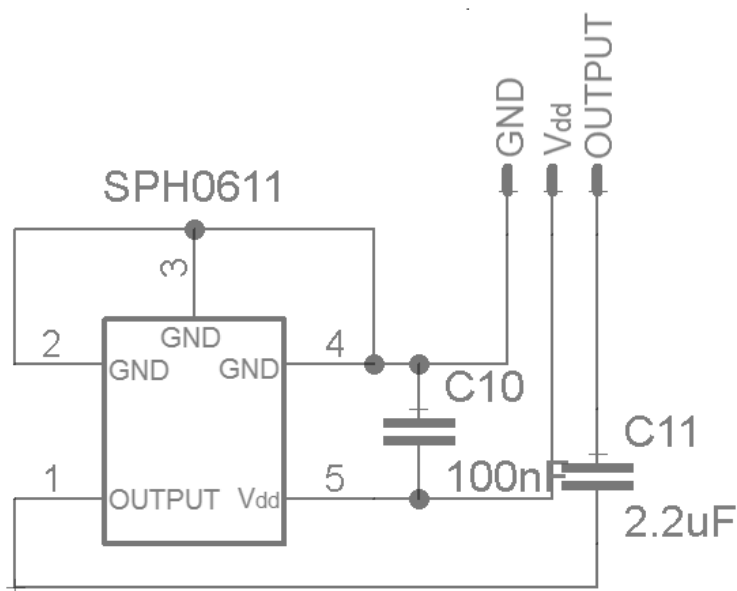
Obr. 19: Zapojení obvodu ADMP411

6.1.2 SPH0611LR5H-1

Mikrofon od společnosti Knowles Electronics, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální odezvou 124 dB SPL, frekvenčním rozsahem 100 Hz - 15 kHz, citlivostí -38 dBV a SNR 65 dBA.



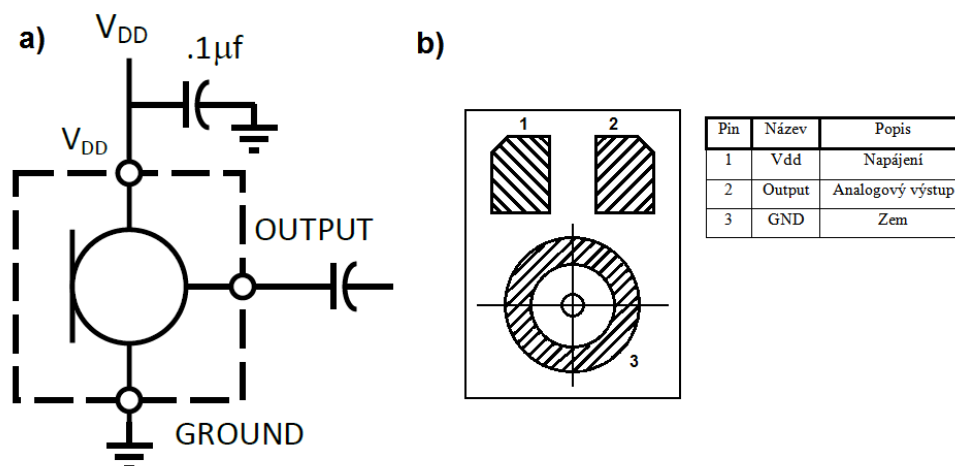
Obr.20: a) Blokové schéma SPH0611LR5H-1, b) Konfigurace vývodů SPH0611LR5H-1 [15]



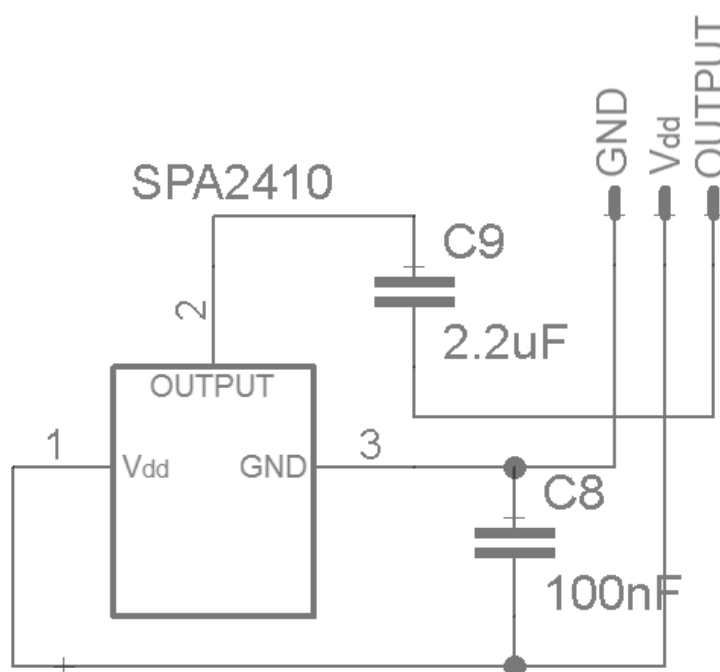
Obr. 21: Zapojení obvodu SPH0611LR5H-1

6.1.3 SPA2410LR5H-B

Mikrofon od společnosti Knowles Electronics, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální odezvou 125 dB SPL, frekvenčním rozsahem 100 Hz - 10 kHz, citlivostí -38 dBV a SNR 63 dBA.



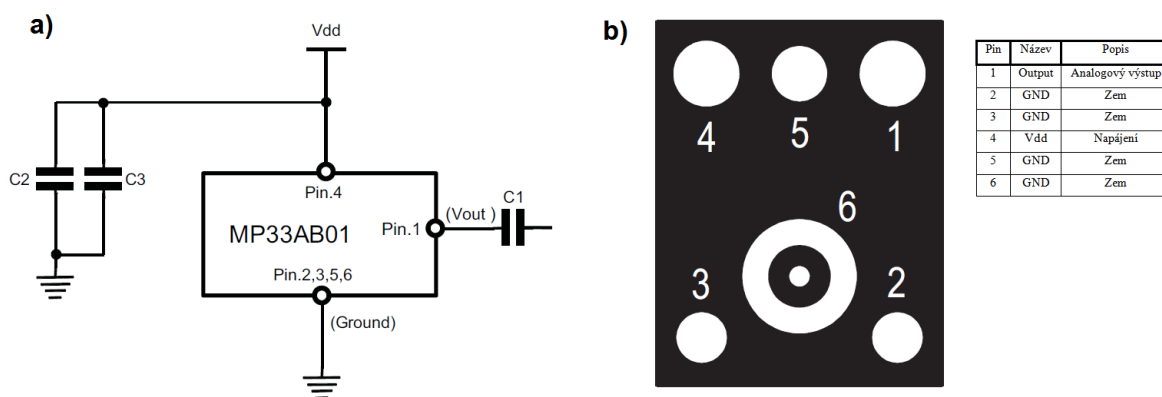
Obr. 22: a) Blokové schéma SPA2410LR5H-B, b) Konfigurace vývodů SPA2410LR5H-B [16]



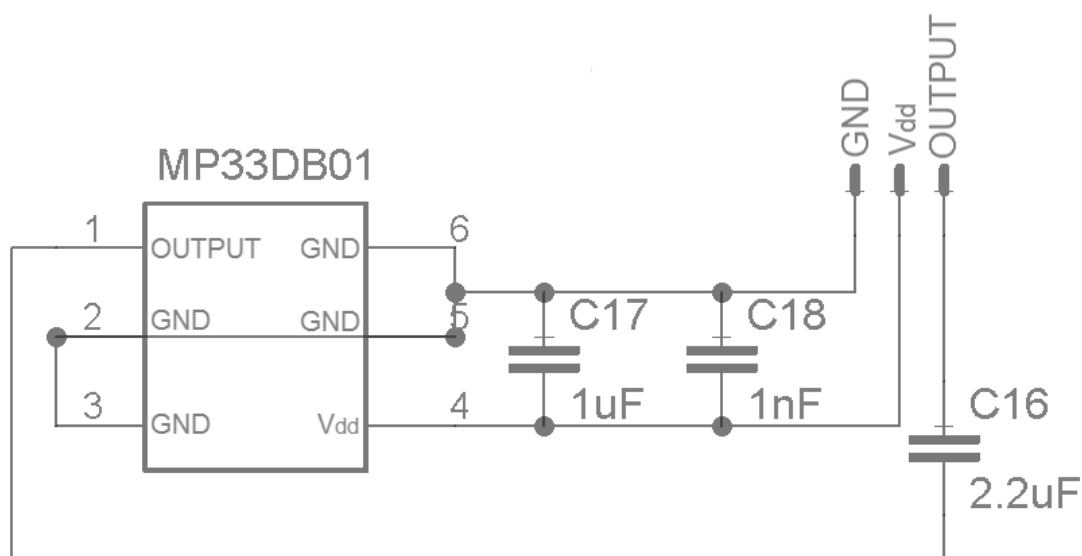
Obr. 23: Zapojení obvodu SPA2410LR5H-B

6.1.4 MP33AB01

Je kompaktní mikrofon od společnosti STMicroelectronics, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální odezvou 125 dB SPL, frekvenčním rozsahem 100 Hz - 10 kHz, citlivostí -38 dBV a SNR 63 dBA.



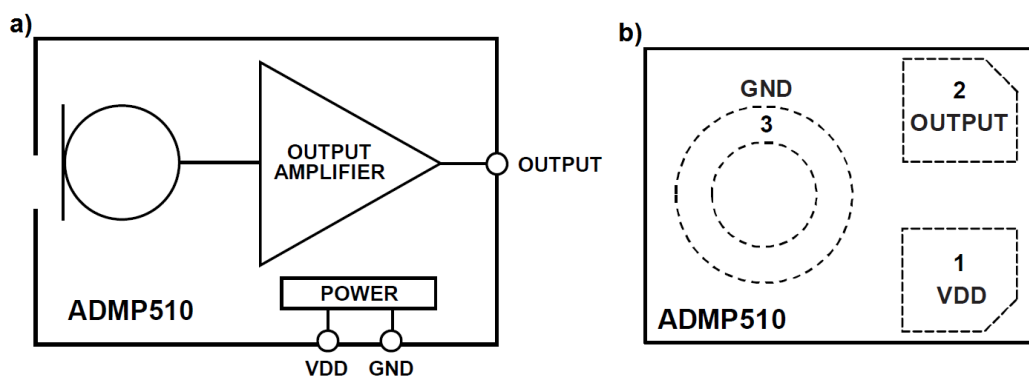
Obr. 24: a) Blokové schéma MP33AB01, b) Konfigurace vývodů MP33AB01 [17]



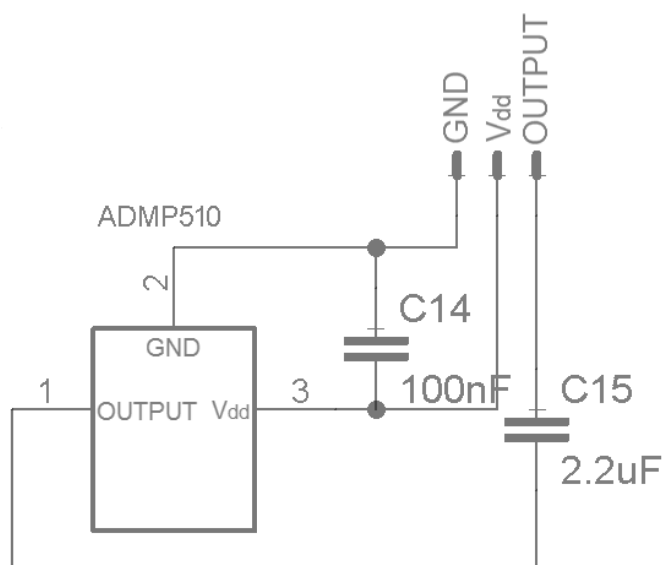
Obr. 25: Zapojení obvodu MP33AB01

6.1.5 ADMP510

Mikrofon od společnosti InvenSense, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální odezvou 124 dB SPL, frekvenčním rozsahem 60 Hz - 20 kHz, citlivostí -38 dBV a SNR 65 dBA.



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



Obr. 27: Zapojení obvodu ADMP510

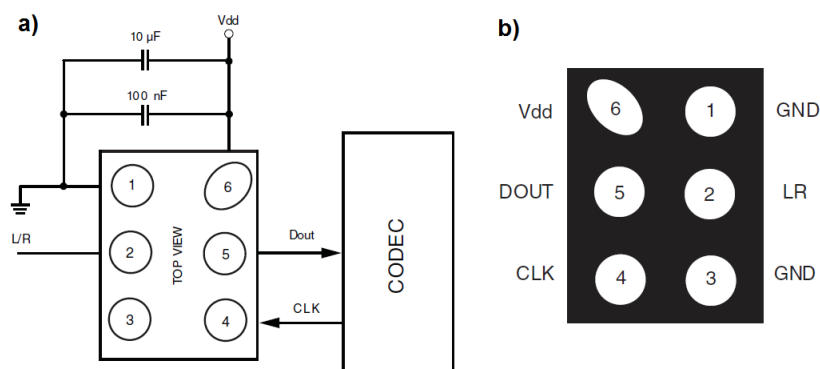
Tab. 2. Parametry testovaných analogových mikrofonů

Název	ADMP411	SPH0611LR5H	SPA2410LR5H	MP33AB01	ADMP510
Výrobce	Analog Device	Knowles	Knowles	STMicroelectronics	InvenSense
Vstupní port	Dolní	Dolní	Dolní	Dolní	Dolní
Frekvenční rozsah [Hz] ±3 dB	28 - 20000	100 - 10000	100 - 15000	100 - 10000	60 - 20000
Citlivost [dBV] 1 kHz, 94 dB SPL	-46	-38	-38	-38	-38
SPL max. [dB]	131	124	125	125	124
SNR [dBA]	62	65	63	63	65
THD [%]	0,2	0,2	0,5	<1	0,2
Směrnost	Všesměrový	Všesměrový	Všesměrový	Všesměrový	Všesměrový
Výstupní impedance [Ω]	200	400	400	-	350
Napájecí napětí [V]	1,5 - 3,6	1,5 - 3,6	1,5 - 3,6	1,5 - 3,6	1,5 - 3,63
Max. napájecí proud [μA]	250	185	160	250	250
Provozní teplota [°C]	od -40 do +85	od -40 do +100	od -40 do +100	od -30 do +100	od -40 do +85
Rozměry [mm]	4,75 x 2,95 x 1,1	3,5 x 2,65 x 1,08	3,35 x 2,5 x 1,08	3,76 x 2,95 x 1,1	3,35 x 2,5 x 0,98

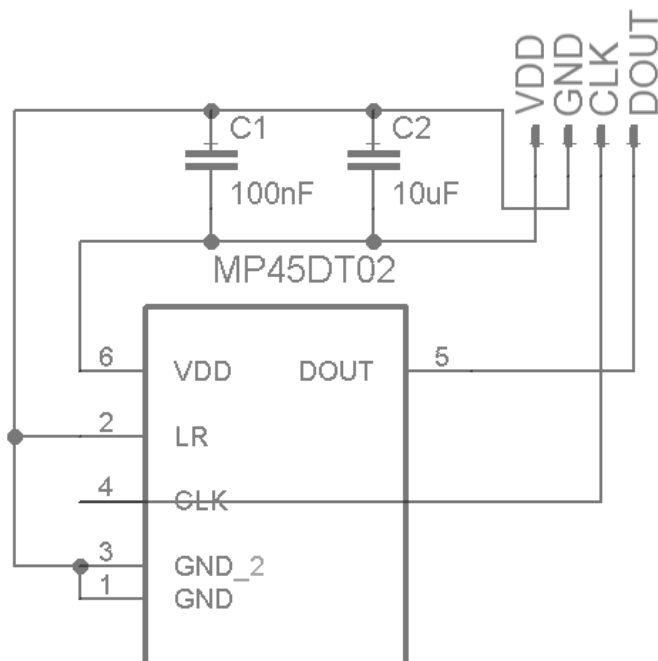
6.2 Digitální mikrofony

6.2.1 MP45DT02

MP45DT02 je digitální mikrofon od společnosti STMicroelectronics, obsahující vstupní port na horní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální hodnotou akustického rozsahu 120 dB SPL, frekvenčním rozsahem 100 Hz - 10 kHz, citlivostí -26 dBFS a SNR 61 dBA. Výstupní data jsou ve formátu PDM. Umožňuje komunikaci po I2S sběrnici.



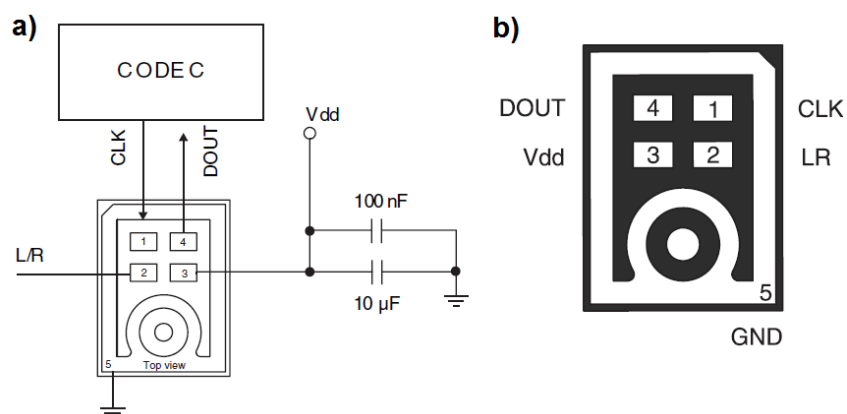
Obr. 28: a) Blokové schéma MP45DT02, b) Konfigurace vývodů MP45DT02 [19]



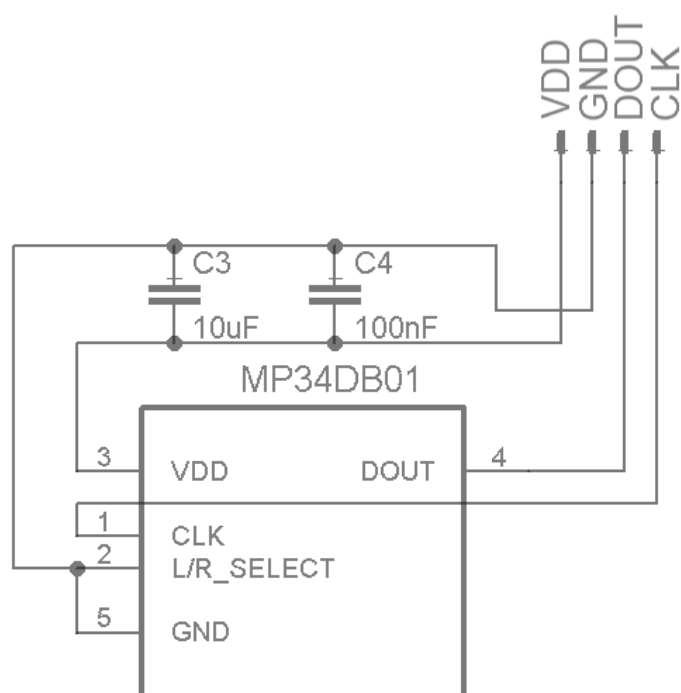
Obr. 29: Zapojení obvodu MP45DT02

6.2.2 MP34DB01

MP34DB01 je digitální mikrofon od společnosti STMicroelectronics, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální hodnotou akustického rozsahu 120 dB SPL, frekvenčním rozsahem 20 Hz - 20 kHz, citlivostí -26 dBFS a SNR 62,6 dBA. Výstupní data jsou ve formátu PDM. Umožňuje komunikaci po I2S sběrnici.



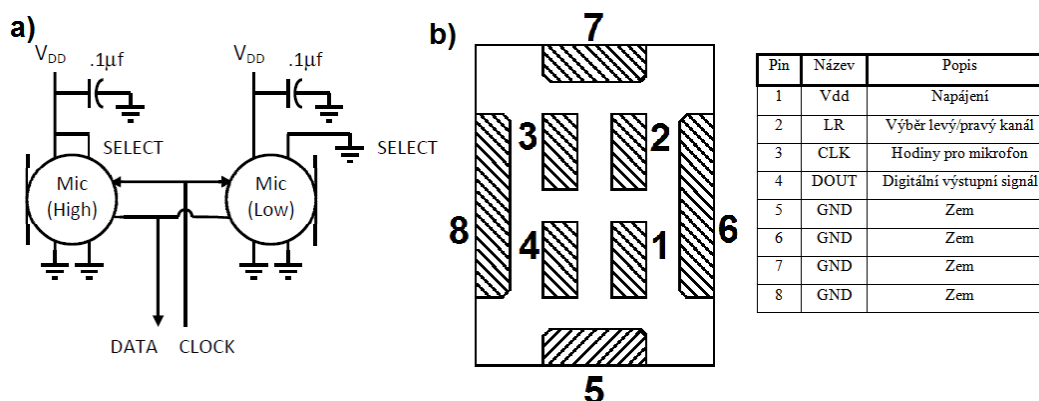
Obr. 30: a) Blokové schéma MP34DB01, b) Konfigurace vývodů MP34DB01 [20]



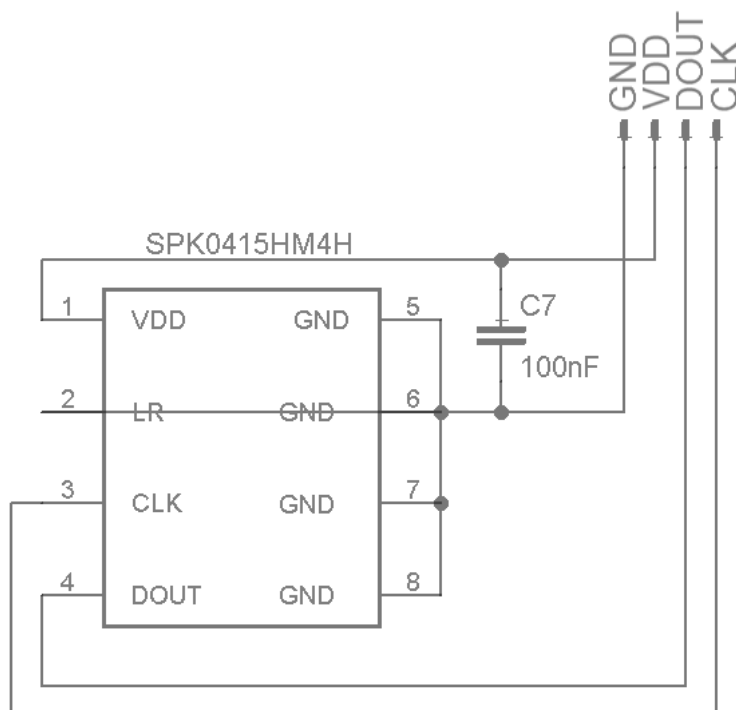
Obr. 31: Zapojení obvodu MP34DB01

6.2.3 SPK0415HM4H-B

SPK0415HM4H je digitální mikrofon od společnosti Knowles Electronics, obsahující vstupní port na horní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální hodnotou akustického rozsahu 122 dB SPL, frekvenčním rozsahem 100 Hz - 10 kHz, citlivostí -26 dBFS a SNR 61 dBA. Výstupní data jsou ve formátu PDM. Umožňuje komunikaci po I2S sběrnici.



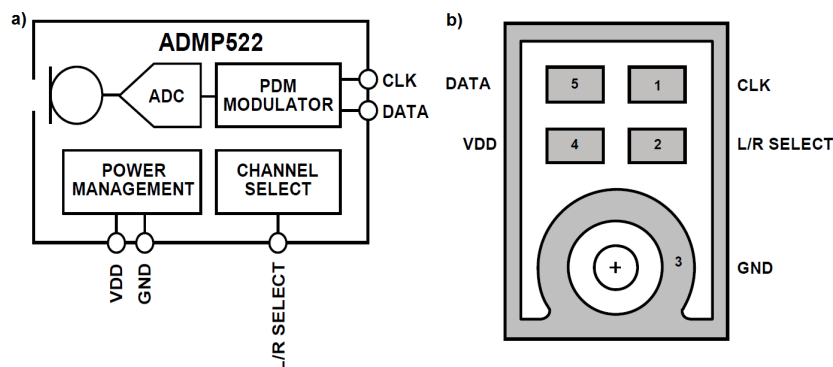
Obr. 32: a) Blokové schéma SPK0415HM4H-B b) Konfigurace vývodů SPK0415HM4H-B [21]



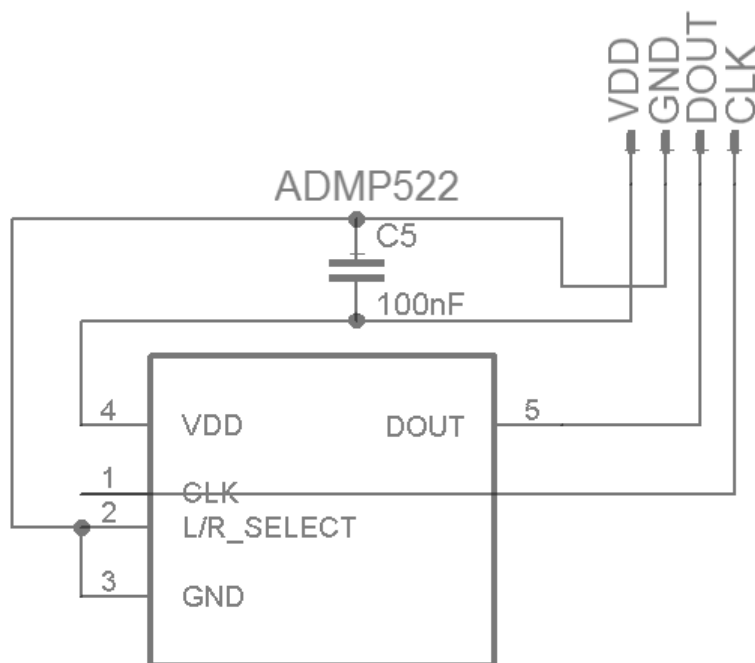
Obr. 33: Zapojení obvodu SPK0415HM4H-B

6.2.4 ADMP522

ADMP522 je digitální mikrofon od společnosti InvenSense, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální hodnotou akustického rozsahu 120 dB SPL, frekvenčním rozsahem 75 Hz - 20 kHz, citlivostí -26 dBFS a SNR 65 dBA. Výstupní data jsou ve formátu PDM. Umožňuje komunikaci po I2S sběrnici.



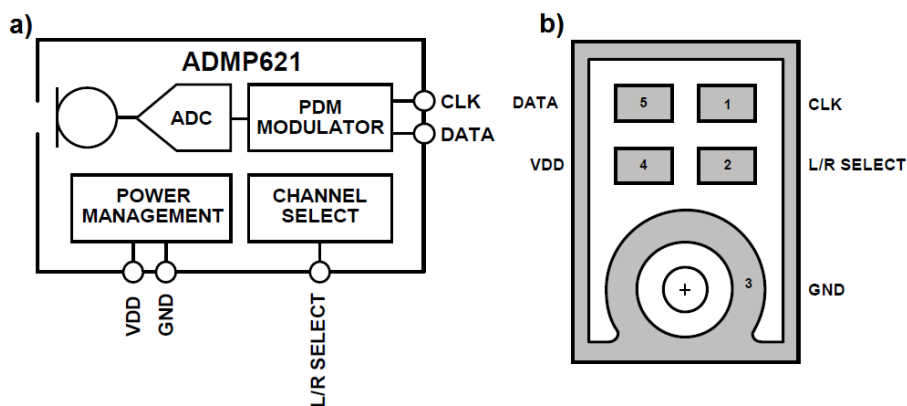
Obr. 34: a) Blokové schéma ADMP522, b) Konfigurace vývodů ADMP522 [22]



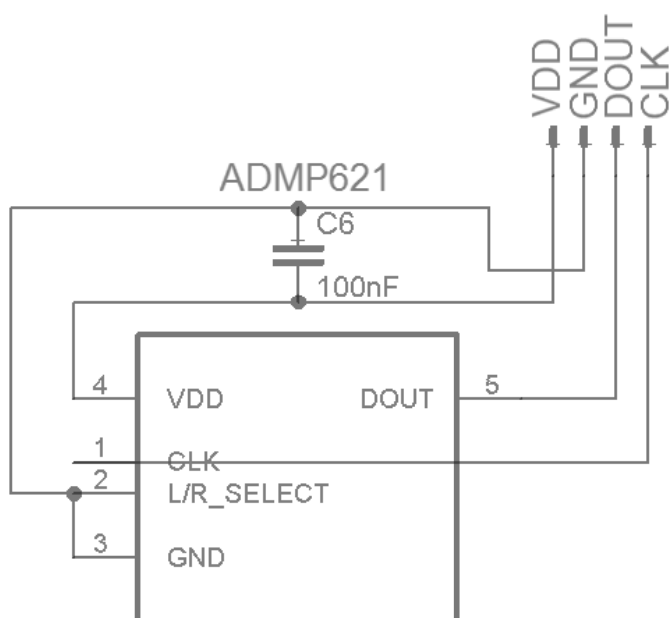
Obr. 35: Zapojení obvodu ADMP522

6.2.5 ADMP621

ADMP621 je digitální mikrofon od společnosti Analog Device, obsahující vstupní port na spodní straně mikrofonu. Jedná se o všesměrový mikrofon s maximální hodnotou akustického rozsahu 140 dB SPL, frekvenčním rozsahem 45 Hz - 20 kHz, citlivostí -46 dBFS a SNR 65 dBA. Výstupní data jsou ve formátu PDM. Umožňuje komunikaci po I2S sběrnici.



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



Obr. 37: Zapojení obvodu ADMP621

Tab. 3. Parametry testovaných digitálních mikrofonů

Název	MP45DT02	MP34DB01	SPK0415HM4H	ADMP522	ADMP621
Výrobce	STMicroelectronics	STMicroelectronics	Knowles	InvenSense	Analog Device
Vstupní port	Horní	Dolní	Horní	Dolní	Dolní
Frekvenční rozsah [Hz] ±3 dB	100 - 10000	20 - 20000	100 - 10000	75 - 20000	45 - 20000
Citlivost [dBFS] 1 kHz, 94 dB SPL	-26	-26	-26	-26	-46
SPL max. [dB]	120	120	122	120	140
SNR [dBA]	61	62,6	61	65	65
THD [%]	<1	<1	0,1	0,5	0,35
Směrnost	Všesměrový	Všesměrový	Všesměrový	Všesměrový	Všesměrový
CLK [MHz]	1 - 3,25	1 - 3,25	1 - 3,25	0,9 - 3,6	1 - 3,6
Napájecí napětí [V]	1,64 - 3,6	1,64 - 3,6	1,6 - 3,6	1,62 - 3,63	1,62 - 3,63
Max. napájecí proud [μA]	650	650	650	1400	1600
Provozní teplota [°C]	od -30 do +85	od -40 do +85	od -40 do +100	od -40 do +85	od -40 do +85
Rozměry [mm]	4,72 x 3,76 x 1,38	4 x 3 x 1,1	4 x 3 x 1,08	4 x 3 x 1,1	4 x 3 x 1,1

6.3 Možnosti STM32F4

Pro realizaci komunikace s digitálními mikrofony byl zvolen STM32F4 Discovery kit od společnosti STMicroelectronics, obsahující velmi výkonný 32-bitový jednočipový mikroprocesor STM32F407VGT6 s jádrem ARM Cortex-M4. MCU je možné taktovat frekvencí až 168 MHz. To umožňuje použití MCU pro aplikace, které vyžadují vysoký výkon.

Velkou výhodou je dostupnost vývojových desek STM32F4 Discovery kit, které lze použít k vývoji, ale i jako programátor a debugger. [24]

Parametry:

- 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)

6.4 Návrh a realizace DPS

Pro návrh DPS byl zvolen editor plošných spojů Eagle. Při návrhu DPS byl kladen důraz na rozměry desky pro jednotlivé mikrofony. Bylo zapotřebí vytvořit desky s co nejmenšími rozměry, s ohledem na výhody MEMS technologie vytvořit miniaturní senzory se srovnatelnými nebo lepšími parametry než mají senzory běžných rozměrů. Testované mikrofony mají minimum součástek. Všechny součástky jsou umístěny společně na opačné straně DPS, než je umístěn vstupní port mikrofonu. Kvůli omezení možného rušení.

Pro realizaci plošných spojů byl použit standardní typ desky FR4 1,5 mm 18 μ m Cu. Pro omezení možného rušení byly zvoleny dvouvrstvé plošné spoje, pro lepší rozložení uzemnění (GND). Všechny použité otvory jsou prokovené.

7 Měření

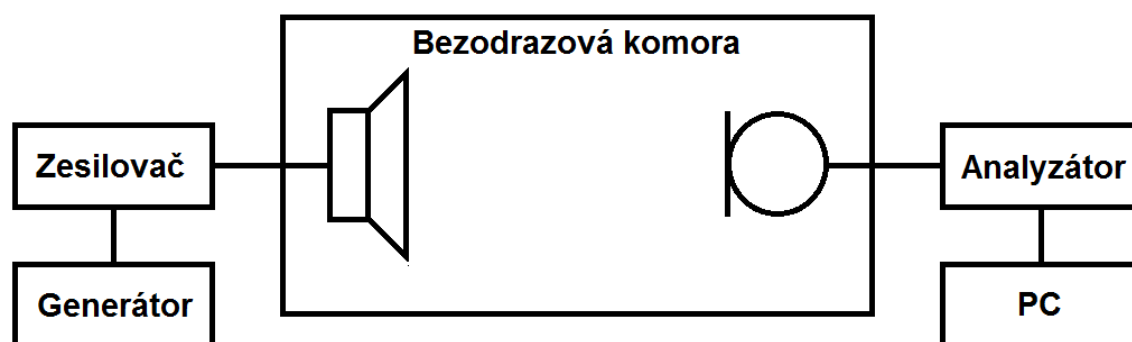
7.1 Způsob měření

Zvolená měřicí metoda slouží k ověření parametrů mikrofonů. Měřenými parametry jsou citlivost, frekvenční rozsah, SNR, zkreslení THD a směrová charakteristika. Pro uchycení mikrofonů ke stojanu je zvolena oboustranná lepicí páska. Mikrofony je nutné umístit do vzdálenosti 1 m od zdroje měřícího signálu. K měření je vybrána substituční metoda kalibrace mikrofonů. Tato metoda již byla popsána v kapitole 5.4. Měření pomocí substituční metody ve volném poli vyžaduje měření v bezodrazové komoře.

Vyhodnocení hodnot získaných substituční metodou ve volném poli spočívá v porovnání změřených hodnot neznámých mikrofonů s hodnotami změřenými referenčním mikrofonem. Toto vyhodnocení je nejpraktičtější způsob měření takového měření.

Pro vyhodnocení měřených signálů slouží analyzátor Brüel & Kjaer Pulse 3560C a software LabShop, kde je nastavena metoda FFT analýza. Nastavení FFT analýzy je FFT_Spectrum_Averaging, šířka pásma 25,6 kHz, 6400 spektrálních čar s nastaveným krokem 4 Hz. Jako vhodné časové okno pro FFT analýzu je použito okno Hamming. K dosažení ustálení a zpřesnění výsledků, je zapotřebí nastavit vhodné průměrování. Výsledná data získána pomocí FFT analýzy, lze následně exportovat do souboru .xls a zpracovat v programu MS Excel.

Měření zvolených parametrů mikrofonů je přesně definováno v normách ČSN EN 60268-4.



Obr. 38: Blokové schéma měřicího řetězce

7.2 Měření analogových mikrofonů

Všechny měřené analogové mikrofony mají aktivní výstup a jsou napájeny stabilizovaným zdrojem. Napájecí napětí lze nastavit v rozmezí 1,8 až 3,6 V. Pro připojení mikrofonu a analyzátoru je využit stíněný vodič.

7.3 Měření digitálních mikrofonů

Měření jednotlivých parametrů probíhá shodně jako u analogový mikrofonů s tím rozdílem, že výstupní data jsou ukládána přímo do PC.

Ke komunikaci s digitálními mikrofony je použit STM32F4 Discovery kit. Digitální mikrofony komunikují s STM32F4 pomocí sběrnice I2S. Komunikace spočívá v tom, že STM32F4 generuje hodinový signál, který je mikrofonem využíván k vyslání dat ve formátu PDM do STM32F4. Výpočet frekvence hodinového signálu :

$$\text{CLK} = 64 \cdot F_s \text{ [Hz]} \quad (7)$$

F_s je vzorkovací frekvence akustického signálu. 64 je hodnota decimace. Decimace znamená snížení vzorkovací frekvence.

Data přicházející z mikrofonu jsou pomocí decimačního filtru konvertovaná z formátu PDM do formátu PCM. Rekonstruovaný signál je ve formátu 16-bit PCM. Výsledný zvukový signál je posléze uložen jako zvukový soubor ve formátu .wave na USB. Ten je následně zpracován pomocí audio analyzátoru Brüel & Kjaer Pulse 3560C. Pro práci s STM32F4 jsem použil μ vision4 od společnosti Keil. Výsledný kód je napsán v jazyce C++.

Měření citlivosti

Pro měření citlivosti je nutné nastavit programovatelný generátor jako zdroj sinusového signálu s frekvencí 1 kHz. Pro zpracování signálu je použita FFT analýza. V bezodrazové komoře je zapotřebí nastavit úroveň tlaku 1 Pa, která se nastavuje pomocí referenčního mikrofonu. Hodnota 1 Pa odpovídá úrovni akustického tlaku 94 dBSPL. Tato hodnota je vypočtena ze vztahu:

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ [dB]} \quad (8)$$

Kde p je potřebná hodnota tlaku a p_0 je referenční úroveň tlaku 20 μ Pa.

Spektrum měřeného mikrofonu je spočteno pomocí analyzátoru Pulse. Pro získání citlivosti mikrofonu je potřeba odečíst amplitudu spektrální čáry pro frekvenci 1 kHz.

Měření frekvenčního rozsahu

Pro měření frekvenčního rozsahu mikrofonu je nutné nastavit programovatelný generátor jako zdroj bílého šumu. Bílý šum je náhodný signál s konstantní výkonovou spektrální hustotou. Je použit z důvodu zastoupení všech frekvencí. Pro zpracování je použita FFT analýza, která zaznamenává napěťovou úroveň jednotlivých frekvencí. Poté je zapotřebí nastavit referenční úroveň měřeného signálu. Ta je stanovena při frekvenci 1 kHz a je normalizována na 0 dB. Limity frekvenčního rozsahu jsou stanoveny na ± 3 dB. Tyto limity nám určují oblast použitelného rozsahu.

Měření SNR

Pro měření SNR se využívá referenčního a měřeného mikrofonu, které se umísťují do bezodrazové komory, kde je dokonale tiché prostředí. Měření probíhá bez použití zdroje akustického signálu. Měřena je úroveň vlastního šumu mikrofonu. Ta je získána pomocí FFT analýzy audio analyzátozem Pulse. Referenční mikrofon se využívá pro kontrolní měření šumového pozadí komory. Referenční mikrofon musí mít hodnotu vlastního šumu nižší než měřený mikrofon.

Měření THD

Pro měření THD je nutné nastavit programovatelný generátor jako zdroj sinusového signálu. Měřenými frekvencemi jsou 40 Hz až 5 kHz. Frekvenci lze měnit skokově nebo kontinuálně. Výsledná hodnota je vyjádřena v %. Měření jsou odečteny vždy napěťové úrovně základní frekvence a napěťové úrovně vyšších harmonických. THD je vypočteno pomocí vzorce popsaného v kapitole 4.6.

Měření směrové charakteristiky

Pro měření směrové charakteristiky mikrofonu je zapotřebí přidat do bezodrazové komory točnu, na kterou je umístěn měřený mikrofon. Točna je připojena k analyzátozem Pulse. Pro měření je nutné nastavit programovatelný generátor jako zdroj sinusového signálu o frekvencích 250 Hz, 1 kHz a 8 kHz. Krok otočení točny je nastaven na 10° . Při každém otočení točny je vyslán impuls do analyzátozem, který odečítá úroveň výstupního napětí. Měřené data jsou zapisována do programu MS Excel, kde je zapotřebí posunout data tak, aby 0° byl útlum 0 dB.

8 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 využívá 80 % všech MEMS mikrofonů. Dalšími principy jsou piezoelektrický princip a optický princip.

V následujících kapitolách jsou přiblíženy parametry mikrofonů. Jsou zde také rozebrány metody sloužící ke kalibraci mikrofonů. Z výčtu těchto metod byla následně vybrána substituční 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 STM32F4 Discovery kit od 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.

9 Použitá literatura

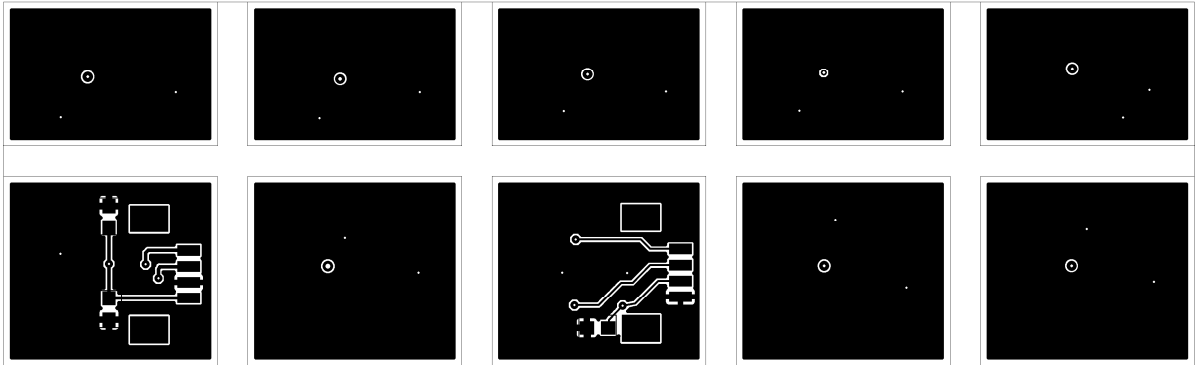
- [1] Konstrukce mikrofonů. [online]. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: http://www.elektroakustika.cz/types_microphones.html
- [2] Principy a typy mikrofonních systémů. [online]. [cit.2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.janzaudio.com/clanky/principy-a-typy-mikrofonnich-systemu.html>
- [3] Elektroakustika. [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 & Kjær. *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

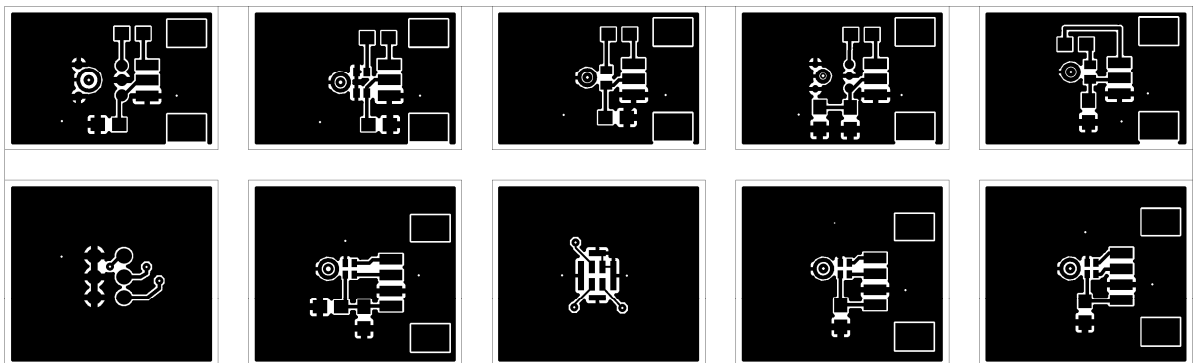
10 Přílohy

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:

