

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Porovnání metod měření zvukové pohltivosti  
akustických prvků**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub HOLENDR**  
Osobní číslo: **E14B0329P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Porovnání metod měření zvukové pohltivosti akustických prvků**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Prostudujte metodu měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře
2. Prostudujte metodu měření činitele zvukové pohltivosti v alfa-kabinetu
3. Pro vybraný akustický prvek zrealizujte obě metody měření
4. Porovnejte naměřené výsledky mezi sebou



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. ČSN EN ISO 354: Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti. Praha: Český normalizační institut, listopad 2003.
2. KUTTRUFF, H. Room Acoustics. Oxfordshire: Spon Press, 2009, ISBN 978-0-415-48021-5.
3. EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. Master Handbook of Acoustics. New York: MC Graw Hill, 2009, ISBN 978-0-07-160333-1.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Bouzek**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan  
V Plzni dne 10. října 2017



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis metod měření činitele zvukové pohltivosti a jejich realizace. V úvodu práce jsou shrnuty základní poznatky z prostorové akustiky. První kapitola je věnována popisu základních akustických prvků, ve druhé kapitole jsou shrnuty poznatky týkající se náhradního schématu reproduktoru a ve třetí popis jednotlivých metod měření. Následující kapitoly jsou věnovány jednotlivým měřením a jejich porovnáním.

## **Klíčová slova**

činitel zvukové pohltivosti, doba dozvuku, dozvuková místnost, alfa-kabinet, akustické prvky, prostorová akustika

## **Abstract**

The presented bachelor's thesis describes the methods of measuring the acoustic absorption coefficient and their realization. At the beginning of the thesis are summarized basic knowledge of room acoustics. The first chapter deals with the description of the basic acoustic elements, the second chapter summarizes the knowledge about the replacement of the speaker scheme and the third chapter describes of the individual measurement methods. The following chapters are dedicated to individual measurements and their comparisons.

## **Key words**

sound absorption coefficient, reverberation time, reverberation chamber, alpha-cabin, acoustic elements, room acoustics

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 14.6.2018

Jméno příjmení

## Obsah

ÚVOD .....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	10
<b>1 AKUSTICKÉ POHLTIVÉ PRVKY .....</b>	<b>11</b>
1.1 PORÉZNÍ MATERIÁLY .....	11
1.2 MEMBRÁNY A KMITAJÍCÍ DESKY .....	11
1.3 HELMHOLTZOVY REZONÁTORY .....	12
<b>2 SIMULACE PRŮBĚHU IMPEDANCE REPRODUKTORU V OZVUČNICÍCH .....</b>	<b>14</b>
2.1 ELEKTRODYNAMICKÝ REPRODUKTOR .....	14
2.2 THIELE-SMALLOVY PARAMETRY .....	15
2.3 ANALOGICKÉ SCHÉMA REPRODUKTORU .....	15
2.3.1 Schéma elektrické a mechanické části .....	16
2.3.2 Převedení na elektrickou stranu .....	16
2.4 ANALOGICKÉ SCHÉMA REPRODUKTORU V UZAVŘENÉ OZVUČNICI .....	17
2.5 ANALOGICKÉ SCHÉMA REPRODUKTORU V BASSREFLEXOVÉ OZVUČNICI .....	18
2.6 POROVNÁNÍ SIMULACE A REÁLNĚHO MĚŘENÍ .....	19
<b>3 ZVUKOVÁ POHLTIVOST .....</b>	<b>23</b>
3.1 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI .....	23
3.2 DOBA DOZVUKU .....	23
3.2.1 Sabinův vzorec .....	23
3.2.2 Eyringův vzorec .....	24
3.2.3 Millingtonův vzorec .....	24
3.2.4 Vliv prostředí na dobu dozvuku .....	25
<b>4 METODY MĚŘENÍ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI .....</b>	<b>26</b>
4.1 METODA MĚŘENÍ V DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI .....	26
4.1.1 Základní pojmy .....	26
4.1.2 Podstata metody .....	26
4.1.3 Kmitočtový rozsah měření .....	27
4.1.4 Parametry dozvukové místnosti .....	27
4.1.5 Rovinné pohltivé obklady .....	28
4.1.6 Samotné pohltivé objekty .....	28
4.1.7 Teplota a relativní vlhkost .....	28
4.1.8 Umístění mikrofonů a zdrojů .....	29
4.1.9 Metody měření .....	29
4.2 METODA MĚŘENÍ V ALFA-KABINETU .....	29
<b>5 ZREALIZOVANÁ MĚŘENÍ .....</b>	<b>30</b>
5.1 MĚŘENÍ V DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI .....	30
5.1.1 Měřicí přístroje .....	30
5.1.2 Měření prázdné dozvukové místnosti .....	31
5.1.3 Měření prvního vzorku .....	32
5.1.4 Měření druhého vzorku .....	34
5.1.5 Porovnání měřených vzorků .....	35
5.1.6 Podmínky měření .....	35
5.2 MĚŘENÍ V OZVUČNICI .....	36
5.2.1 Schéma zapojení .....	36
5.2.2 Měření rezonátorů .....	37
5.2.3 Měření lahví .....	39
5.2.4 Měření panelu Soning .....	40

---

5.2.5	Měření pěny Basotect .....	41
<b>6</b>	<b>POROVNÁNÍ METOD .....</b>	<b>42</b>
6.1	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	42
6.2	VÝHODY A NEVÝHODY METOD.....	43
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH .....</b>	<b>1</b>



## Úvod

Pro zajištění kvalitního poslechového vjemu v uzavřeném prostoru je potřeba, kromě kvalitního zdroje, také znát akustické parametry prostoru. Každý objekt v prostoru jako například nábytek, ale také samotné stěny mohou pohlcovat část zvukové energie v určitých frekvenčních pásmech, přičemž záleží také na pozici jednotlivých objektů v prostoru. Ve výsledku se tedy může stát, že zvuk šířený prostorem bude v určitém frekvenčním pásmu více utlumen a tím se může zvýraznit jiné frekvenční pásmo, což může mít za následek zhoršení poslechového vjemu. V takovém případě je potřeba zvýrazněné pásmo utlumit přemístěním objektů v prostoru nebo použitím vhodného akustického prvku, který má na tomto pásmu dostatečně vysokou hodnotu činitele zvukové pohltivosti.

Při návrhu akustického prvku se vychází z teoretických předpokladů, díky kterým je možné chování daného prvku předpovídat. Je ovšem nutné tyto vlastnosti ověřit jednou z dostupných měřících metod, které jsou více či méně přesné, časově a finančně náročné a které nemusí úplně odpovídat reálným situacím v prostoru. Také je v dnešní době potřeba dbát na požadavky z hlediska estetické stránky pro dané účely.

Česká literatura zabývající se prostorovou akustikou je poměrně stará, ale i v dnešní době ji lze použít jako cenný zdroj informací.

## Seznam symbolů a zkratek

$A$ .....	Ekvivalentní pohltivá plocha
$B$ .....	Magnetická indukce
$C$ .....	Kapacita
$c$ .....	Poddajnost
$c_0$ .....	Rychlost zvuku ve vzduchu
$F$ .....	Síla
$f$ .....	Frekvence
$I$ .....	Elektrický proud
$L$ .....	Indukčnost
$l$ .....	Délka
$l'$ .....	Koncová korekce
$M_s$ .....	Plošná hmotnost
$m$ .....	Hmotnost
$P$ .....	Výkon
$p$ .....	Tlak
$Q$ .....	Činitel jakosti
$R$ .....	Elektrický odpor
$R_m$ .....	Mechanický odpor
$S$ .....	Plocha
$T$ .....	Doba dozvuku
$U$ .....	Elektrické napětí
$V$ .....	Objem
$v$ .....	Rychlost
$w$ .....	Objemová rychlost
$Z$ .....	Impedance
$\alpha$ .....	Činitel zvukové pohltivosti
$\rho$ .....	Hustota

# 1 Akustické pohltivé prvky

Akusticky pohltivé prvky se používají k akustickým úpravám prostoru, zejména k úpravě doby dozvuku, zmenšení hluku nebo zlepšení srozumitelnosti. Pohlcování zvuku je proces, při kterém se část akustické energie přemění na tepelnou energii. Následující text byl čerpán převážně z [7]

## 1.1 Porézní materiály

Pohlcování v těchto materiálech probíhá pomocí tření vzduchu v otvorech v materiálu a díky prostupování vzduchu z jednoho prostředí do druhého. Nejvyšší účinnost z hlediska pohltivosti mají tyto materiály od mezní frekvence (1.1), tedy pro střední a vysoké frekvence, pro běžně používané vzorky do 100 mm. Porézní materiály se kvůli zachytávání prachu a své nízké mechanické odolnosti běžně nepoužívají samostatně, ale v kombinaci s dalšími prvky.

$$f_m = \frac{c}{10h} \quad (1.1)$$

kde:

$c$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] je rychlost zvuku ve vzduchu

$h$  [m] je tloušťka materiálu

## 1.2 Membrány a kmitající desky

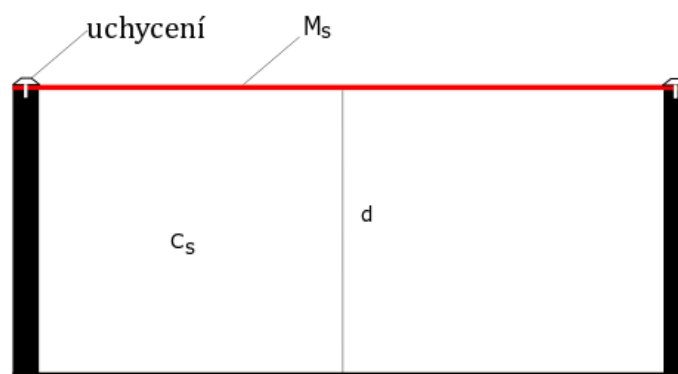
Membrána se skládá z nosné folie a nosného kazetování (obr.1.1). Jedná se o mechanický rezonanční obvod, jehož poddajnost tvoří výška vzduchového polštáře a jeho hmotnost tvoří plošná hmotnost membrány, rezonanční kmitočty se vypočte podle (1.2). Mohou se také objevit rezonance na vyšších kmitočtech, které jsou dané poddajností samotné membrány. Část energie dopadající na membránu způsobí její kmitání a tím vzniká zvuk v prostoru za membránou. Účinnost membrány lze zvýšit přidáním porézního materiálu do vnitřního prostoru za membránou.

$$f_o = 60 \sqrt{\frac{1}{M_S \cdot d}} \quad (1.2)$$

kde:

$M_S$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ] je plošná hmotnost membrány

$d$  [m] je výška vzduchového polštáře



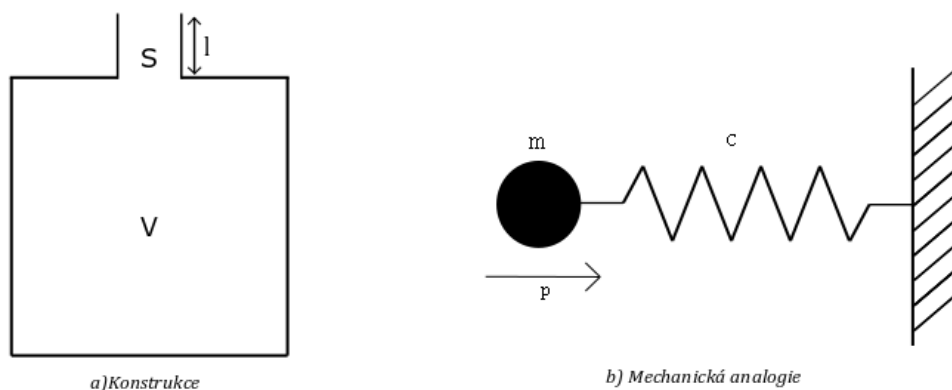
Obr. 1.1 Náčrt membrány

Kmitající desky jsou pružně připevněné k nosnému kazetování. Výpočet rezonanční frekvence je stejný jako u membrán. Díky tomu, že desky mají vyšší plošnou hmotnost, je jejich rezonanční kmitočet nižší. Porézní materiály se u kmitajících desek používají jen k omezení vlastních kmitů prostoru, protože samotné ztráty způsobené třením v pružném upevnění jsou obvykle již vyšší, než je pro dané úpravy potřeba.

### 1.3 Helmholtzovy rezonátory

Pro akustické úpravy se většinou používají děrované desky, které pracují na principu Helmholtzova rezonátoru. Oproti předešlým prvkům lze Helmholtzův rezonátor naladit na požadovaný kmitočet nejvyššího pohlcování pouhou úpravou rozměrů otvorů. Samostatné Helmholtzovy rezonátory, naladěné na určitou frekvenci, se používají pro tlumení vlastních kmitů.

Helmholtzův rezonátor si lze představit jako objem, který je propojen s okolním prostředím pomocí hrdla (obr. 1.2 a). Vzduch v hrdle představuje akustickou hmotnost a vnitřní objem představuje akustickou poddajnost. V mechanické analogii je Helmholtzův rezonátor znázorněn jako hmotnost na pružině, na kterou působí tlak (obr. 1.2 b).



Obr. 1.2 Náčrt konstrukce a mechanické analogie Helmholtzova rezonátoru

Rezonanční frekvence Helmholtzova rezonátoru se vypočte pomocí vzorce (1.3).

$$f_r = 55 \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot l'}} \quad (1.3)$$

kde:

$S [m^2]$  je průřez hrdla

$V [m^3]$  je objem uvnitř rezonátoru

$l' [m]$  je délka hrdla s koncovou korekcí

Koncová korekce zastupuje spolukmitající vzduch po stranách hrdla. Její výpočet závisí na porovnání délky a průměru hrdla. Je-li délka hrdla menší než jeho průměr, platí vzorec (1.4), pokud je délka hrdla větší než jeho průměr, platí vzorec (1.5). Uvedené vzorce platí pro hrdla s kruhovými průřezy.

$$l' = l + 0,85D \quad (1.4)$$

$$l' = 1,2l \quad (1.5)$$

kde:

$l [m]$  je délka hrdla

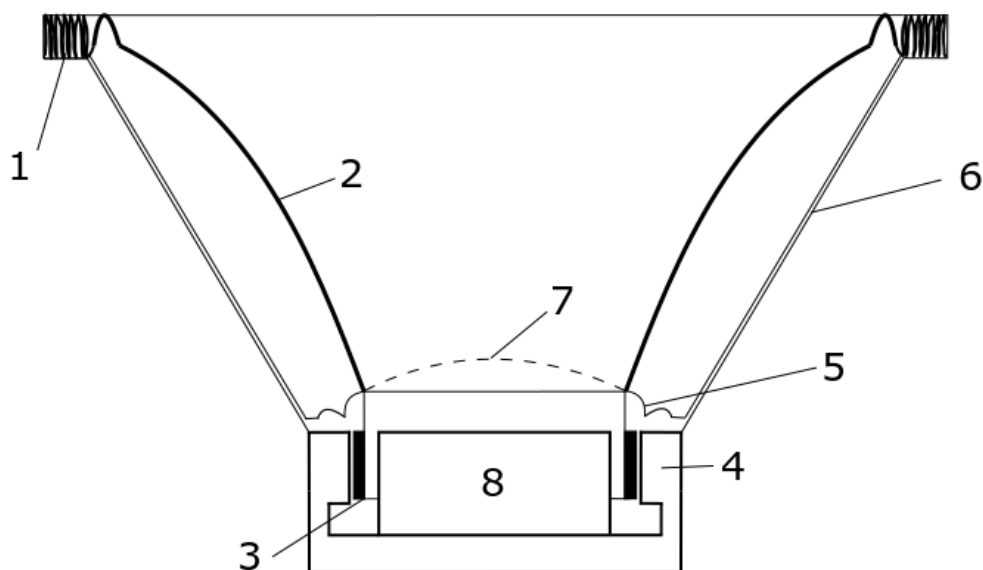
$D [m]$  je průměr hrdla

## 2 Simulace průběhu impedance reproduktoru v ozvučnicích

Následující text popisuje základní teorii k elektrodynamickému reproduktoru a chování jeho impedance v závislosti na frekvenci pro případ samotného reproduktoru, reproduktoru v uzavřené ozvučnici a reproduktoru v bassreflexové ozvučnici. Měření impedance reproduktoru slouží jako základ pro měření činitele zvukové pohltivosti v alfa-kabinetu.

### 2.1 Elektrodynamický reproduktor

Reproduktor je elektroakustický měnič pracující na principu kmitání cívky v magnetickém poli při průchodu střídavého elektrického signálu. Na obrázku 2.1 je náčrt složení reproduktoru [1].



Obr. 2.1 Složení elektrodynamického reproduktoru [1]

Popis součástí: 1. horní závěs membrány, 2. membrána, 3. cívka, 4. pólové nástavce magnetu, 5. spodní závěs membrány, 6. koš reproduktoru, 7. prachovka, 8. otvor v magnetu

## 2.2 Thiele-Smallovy parametry

Thiele-Smallovy (dále jen TS) parametry charakterizují daný reproduktor pro nízké frekvence a jsou udávány přímo výrobcem. Pro simulaci je potřeba následujících TS parametrů [5]:

$R_s$ [ $\Omega$ ]	stejnoseměrný odpor kmitající cívky
$L$ [H]	indukčnost kmitající cívky
$R_{ms}$ [ $N \cdot s \cdot m^{-1}$ ]	mechanický odpor reproduktoru
$m_{ms}$ [kg]	hmotnost kmitajícího systému včetně hmotnosti spolukmitajícího vzduchu
$c_{ms}$ [ $m \cdot N^{-1}$ ]	poddajnost membrány
$f_r$ [Hz]	rezonanční frekvence
$S_d$ [ $m^2$ ]	efektivní plocha membrány
$Bl$ [ $T \cdot m$ ]	tzv. silový faktor (gyrační konstanta)
$V_{as}$ [ $m^3$ ]	ekvivalentní objem (objem vzduchu o stejné poddajnosti jako má reproduktor)
$Q_{es}$ [-]	elektrický činitel jakosti
$Q_{ms}$ [-]	mechanický činitel jakosti
$Q_{ts}$ [-]	celkový činitel jakosti

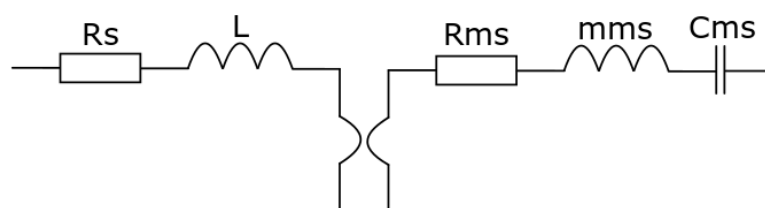
Označení jednotlivých parametrů se může lišit v závislosti na autorovi.

## 2.3 Analogické schéma reproduktoru

Analogické schéma reproduktoru je složeno z elektrické části, mechanické části a vyzařovací impedance [2]. Vyzařovací impedance je při vložení reproduktoru do ozvučnice nahrazena parametry dané ozvučnice, proto se v tomto případě odvození základního náhradního schématu neuvažuje.

### 2.3.1 Schéma elektrické a mechanické části

Elektrická část je tvořena zejména sériovým zapojením indukčnosti kmitající cívky  $L$  a jejího elektrickým odporem  $R_s$  [2]. Mechanická část je tvořena sériovým zapojením poddajnosti membrány  $c_{ms}$ , hmotností  $m_{ms}$ , která je dána součtem hmotnosti membrány, závěsu, spolukmitajícího vzduchu atd., a mechanickým odporem  $R_{ms}$  [2]. Schéma v nejjednodušší podobě je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Analogické schéma elektrodynamického reproduktoru [2]

### 2.3.2 Převedení na elektrickou stranu

K převodu celého obvodu na elektrickou stranu, je potřeba si ujasnit analogii mezi veličinami elektrické a mechanické části. Napětí na elektrické straně odpovídá síla a proud odpovídá rychlost [3]. Síla se vypočítá ze známého vzorce (2.1). Použitím rovnice, podle zákona zachování energie, (2.2) a vzorce (2.1), se odvodí vzorec pro výpočet rychlosti (2.3). Z těchto závěrů je patrné, že vazba mezi elektrickou a mechanickou částí převádí proud na sílu (analogicky napětí) a napětí na rychlost (analogicky proud). Proto lze říci, že reproduktor se chová jako gyrátor s konstantou  $Bl$  [2]. Gyrátor mění napětí na proud, indukčnost na kapacitu, odpor na vodivost a paralelní spojení na sériové (a naopak) [2]. Dále je potřeba odvodit převodní vztahy pro impedance. Použitím analogie vyjde vzorec (2.4). Při použití uvedených vzorců lze převést obvod na elektrickou stranu. Schéma je na obrázku 2.3.

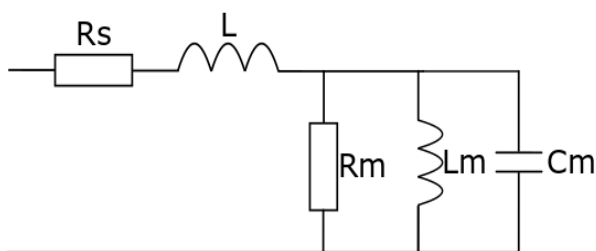
$$F = B \cdot I \cdot l \quad (2.1)$$

$$U \cdot I = F \cdot v \quad (2.2)$$

$$v = \frac{U}{B \cdot l} \quad (2.3)$$

$$Z_m = \frac{F}{v} = \frac{I \cdot B \cdot l}{\frac{U}{B \cdot l}} = \frac{1}{Z_e} \cdot (B \cdot l)^2 \quad (2.4)$$





Obr. 2.3 Analogické schéma reproduktoru převedené na elektrickou stranu [2]

## 2.4 Analogické schéma reproduktoru v uzavřené ozvučnici

Uzavřením reproduktoru do ozvučnice se omezí zvuk tvořený zadní stěnou membrány a vytvoří se akustická strana analogického schématu, tvořená akustickou poddajností vzduchu uvnitř ozvučnice [2]. Akustická poddajnost se vypočte podle vzorce (2.5), kde  $V_b$  je objem ozvučnice,  $c_0$  rychlost zvuku ve vzduchu a  $P$  hustota vzduchu [3]. Mezi mechanickou a akustickou částí je vazba podle vzorce (2.6), kde  $p_{ak}$  je akustický tlak vytvářený silou  $F$  na efektivní plochu membrány  $S$ . Tlak je analogií síly, proto spojení mezi akustickou a mechanickou stranou funguje na principu transformátoru. Analogií rychlosti v akustické soustavě je objemová rychlost  $w$ , platí vztah (2.7) [3]. Opět pomocí analogie lze odvodit vztah pro převedení impedance (2.8). Pro převedení na elektrickou stranu tedy platí (2.9) [3].

$$c_{ak} = \frac{V_b}{c_0^2 \cdot \rho \cdot S^4} = 7,03 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{V_b}{S^4} \quad (2.5)$$

$$p_{ak} = \frac{F}{S_d} \quad (2.6)$$

$$w = v \cdot S \quad (2.7)$$

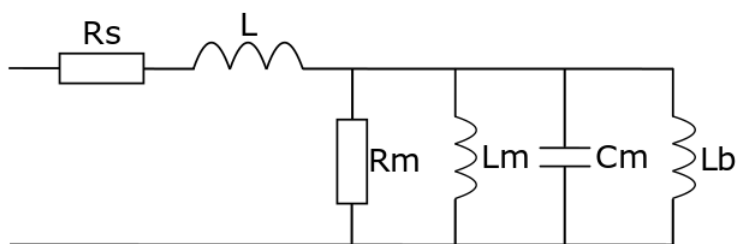
$$Z_{ak} = \frac{p_{ak}}{w} = \frac{\frac{F}{S_d}}{v \cdot S} = \frac{Z_m}{S_d^2} \quad (2.8)$$

$$Z_e = \frac{(B \cdot l)^2}{Z_m} = \frac{1}{Z_{ak}} \cdot \frac{(B \cdot l)^2}{S_d^2} \quad (2.9)$$

Akustická poddajnost se tedy po převedení na elektrickou stranu připojí paralelně k mechanické části a bude reprezentována indukčností. Výsledná indukčnost zapojení bude tedy menší a vzroste rezonanční frekvence reproduktoru podle vzorce (2.10), kde  $L_b$

představuje akustickou poddajnost převedenou na elektrickou stranu [3,4]. Schéma převedené na elektrickou stranu je na obrázku 2.4.

$$f_{rb} = f_r \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{V_{as}}{V_b}\right)} = f_r \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{L_m}{L_b}\right)} \quad (2.10)$$



Obr. 2.4 Schéma reproduktoru v uzavřené ozvučnici převedené na elektrickou stranu [4]

## 2.5 Analogické schéma reproduktoru v bassreflexové ozvučnici

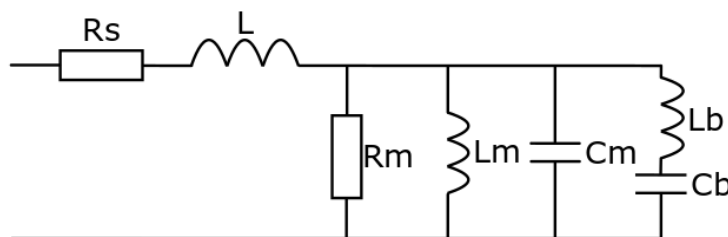
Bassreflexová ozvučnice je oproti uzavřené ozvučnici doplněna nátrubkem, který propojuje vnitřní objem ozvučnice s okolním prostředím. Toto spojení se chová jako Helmholtzův rezonátor [4]. Výpočet akustické hmotnosti s využitím výše zmíněných vzorců pro koncovou korekci je popsán vzorci (2.11) a (2.12).

$$m_{ak} = \frac{1}{s} \cdot l' \cdot \rho = \frac{1}{s} \cdot (l + 0,85D) \cdot \rho \quad (2.11)$$

$$m_{ak} = \frac{1}{s} \cdot l' \cdot \rho = 1,2 \cdot \frac{1}{s} \cdot l \cdot \rho \quad (2.12)$$

Po převedení na elektrickou stranu se akustická hmotnost chová jako kapacita. Celá bassreflexová ozvučnice je tedy reprezentována sériovým spojením této kapacity a indukčnosti  $L_b$ . Rezonanční frekvence se vypočítá stejně jako u Helmholtzova rezonátoru.

$$f_r = 55 \cdot \sqrt{\frac{s}{V \cdot l'}} \quad (2.13)$$



Obr. 2.5 Schéma reproduktoru v bassreflexové ozvučnici převedené na elektrickou stranu [4]

Z obrázku 2.5 je patrné, že obvod má 2 rezonanční frekvence. Do frekvence  $f_b$  je charakter impedance akustické strany kapacitní a společně s  $C_m$  a  $L_m$  vytváří 1. rezonanci, která se na grafu impedance projeví špičkou a představuje rezonanci nátrubku. Po překročení frekvence  $f_b$  bude charakter impedance akustické části induktivní a nastane 2. rezonance, která se opět projeví jako špička na impedance charakteristice a představuje rezonanci reproduktoru.

## 2.6 Porovnání simulace a reálného měření

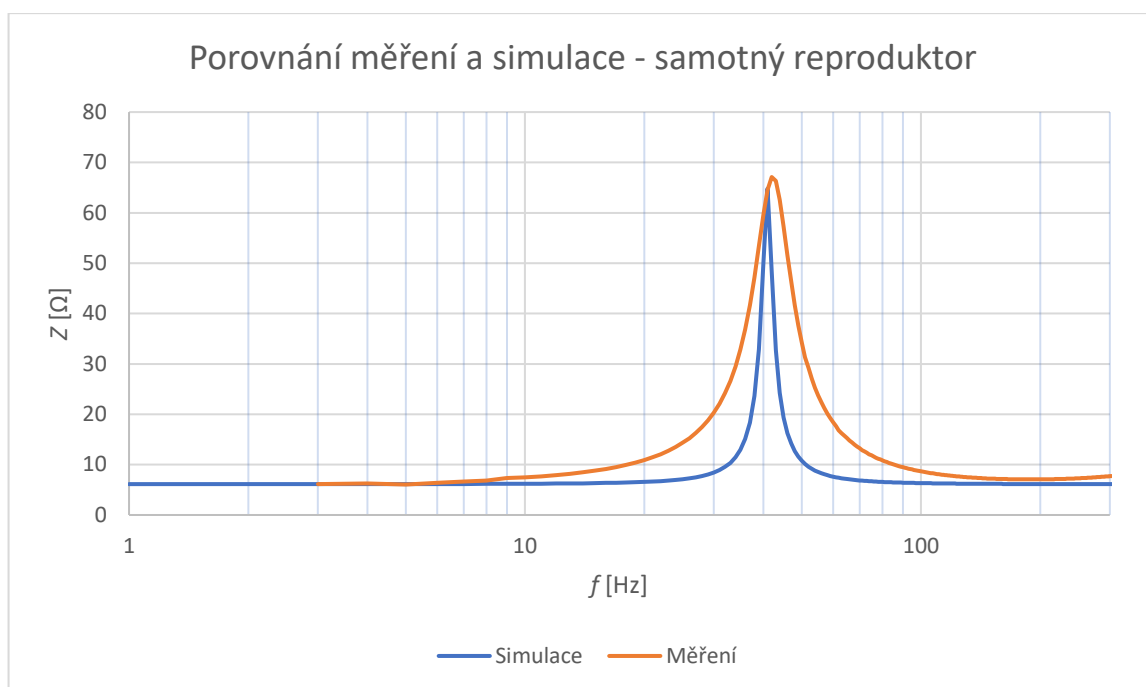
Simulace byla vytvořena, pomocí výše uvedených vztahů, v programu MS Excel a je v elektronické podobě na CD dodávaným společně s touto bakalářskou prací.

Pro účely měření byl použit reproduktor Xavian popsany následujícími TS parametry.

L	348	$\mu\text{H}$
$R_s$	6,128	$\Omega$
$f_r$	41	Hz
$Z_{mr}$	65	$\Omega$
S	122,7	$\text{cm}^2$
Bl	4,04	T.m
mms	19,2	g
m bez vzduchu	18,4	g
cms	0,7867	$\text{mm.N}^{-1}$
Vas	16,6	l
Qe	1,85	-
Qm	17,80	-
Qts	1,68	-

Tabulka 2.1 TS parametry používaného reproduktoru

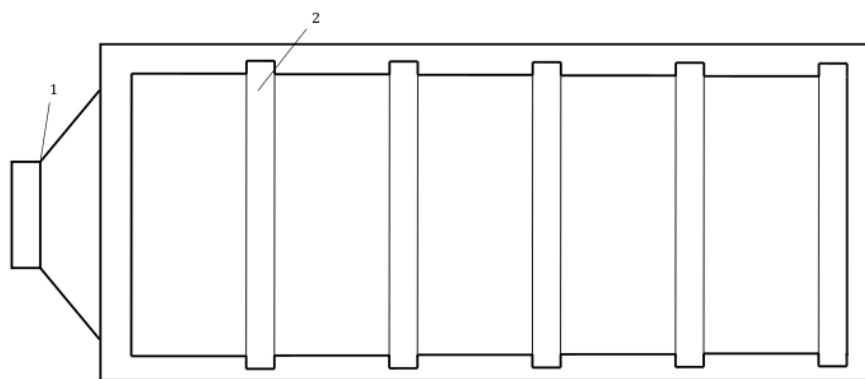
Samotný reproduktor byl změřen a porovnán se simulací.



Obr. 2.6 Porovnání simulace a měření samotného reproduktoru

Simulace dobře odhaduje rezonanční frekvenci reproduktoru, ale jak je z grafu patrné, reálně není průběh impedance tak strmý jako u simulace. Je to dáno tím, že pro potřeby simulace byla použita nejjednodušší náhradní schémata, a také faktem, že v reálném prostředí tlumí i samotný vzduch.

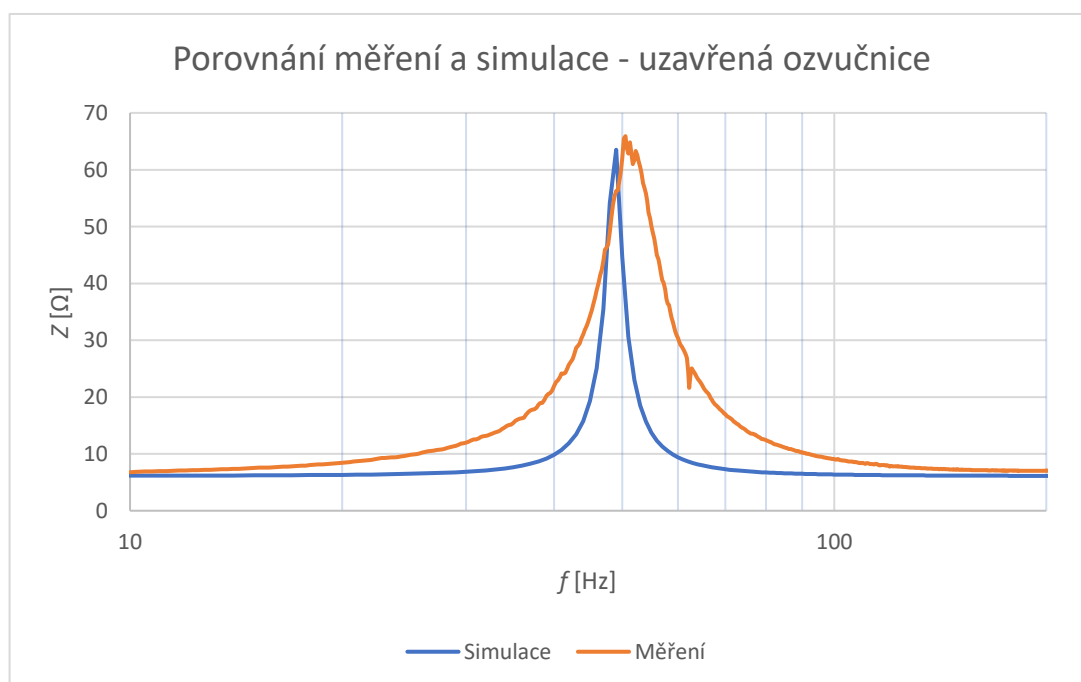
Pro měření s ozvučnicemi byla zvolena ozvučnice, ve které lze nastavit objem pomocí změny pozice přepážky. Nastavitelné velikosti objemů jsou 16,5 l, 24,5 l, 32,3 l, 40,3 l a 48,5 l. Největší objem byl použit pouze pro měření bassreflexové ozvučnice. K získání správných výsledků bylo důležité, aby byl vnitřní objem ozvučnice řádně utěsněn a nedocházelo ke kontaktu s vnějším prostředím. Náčrt ozvučnice při pohledu shora je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7 Náčrt používané ozvučnice

Popis: 1. umístění reproduktoru, 2. umístění přepážek.

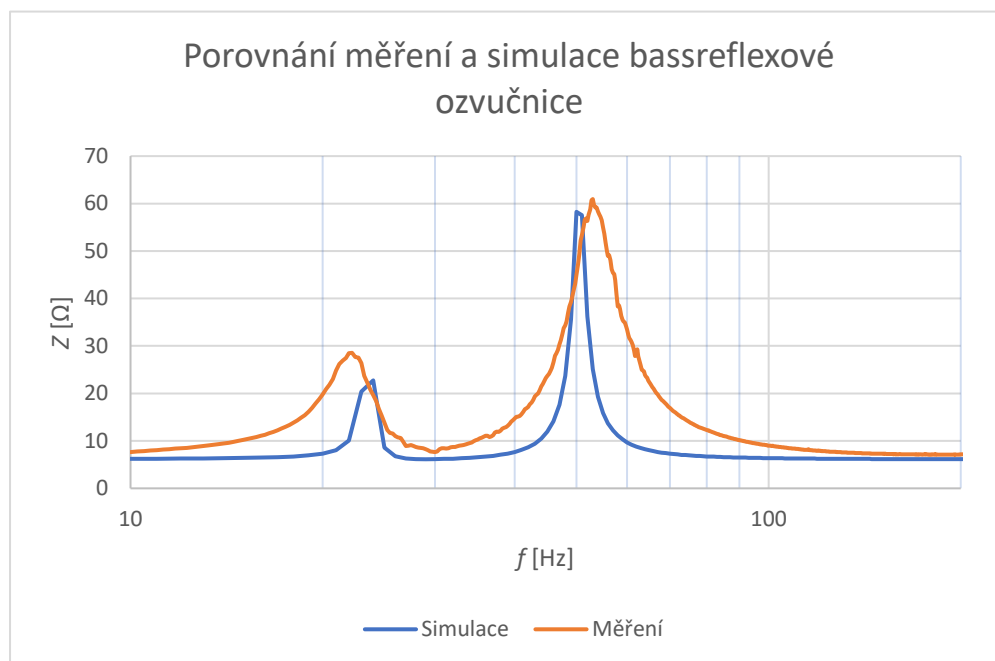
Na následujícím grafu je porovnání naměřené a nasimulované impedanční charakteristiky pro ozvučnici o objemu 40,3 l.



Obr. 2.8 Porovnání měření a simulace pro uzavřenou ozvučnici o objemu 40,3 l

Velikost rezonanční frekvence pro simulaci vychází 49 Hz, pro reálné měření je rezonanční frekvence 50 Hz, tedy rozdíl 1 Hz. Průběh simulace je stejně jako u měření samotného reproduktoru strmější.

Pro měření v bassreflexové ozvučnici byl použit největší objem ozvučnice, tedy 48,5 l, a tři různé nátrubky o rozměrech (průměr x délka) 70x140 mm, 35x80 mm a 45x80mm. Dále byly použity také samotné desky bez nátrubku s otvory o rozměrech 35x18 mm a 45x18 mm. Bassreflex vyzařoval do volného prostoru a nebyl nijak tlumen. Výsledky měření a simulace byly opět porovnány.



Obr. 2.9 Porovnání simulace a měření pro bassreflexovou ozvučnici s rozměry nátrubku 45x80 cm

Rezonanční frekvence u simulace jsou 24 a 50 Hz a u měření 22,5 a 53,5 Hz. Rozdíl by mohl být dán koncovou korekcí a tím, že hrany nátrubku nebyly zakulacené, což by bylo ideální, ale ponechány ostré.

## 3 Zvuková pohltivost

### 3.1 Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti (dále jen pohltivost) vyjadřuje schopnost materiálu pohlcovat akustickou energii [6]. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která se pohybuje v hodnotách od 0 do 1 [3]. Pohltivost je definována jako poměr energie pohlcené ku energii dopadající, tato energie se většinou mění na teplo [3]. Pro určení činitele zvukové pohltivosti se nejčastěji používá měření doby dozvuku v dozvukové místnosti.

### 3.2 Doba dozvuku

Při ustáleném stavu je energie, která je pohlcována stěnami, neustále doplňována zdrojem zvuku [3]. Dozvukem se označuje zvuk v prostoru, který doznívá po vypnutí zdroje a je postupně pohlcován stěnami, doba dozvuku je pak doba trvání dozvuku [6]. Doba dozvuku se běžně uvádí jako doba, za kterou se utlumí hustota energie nebo intenzita zvuku na  $10^{-6}$  hodnoty v ustáleném stavu, tedy o 60 dB [6]. Jak je vidět doba dozvuku je mimo jiné závislá na pohltivosti stěn. Pro výpočet doby dozvuku existují 3 vzorce.

#### 3.2.1 Sabinův vzorec

Wallace Clement Sabine předpokládal, že zvuk je pohlcován stěnami rovnoměrně a definoval na přelomu 20. století dobu dozvuku jako (3.1), kde  $A$  se nazývá celkovou pohltivostí stěn [3,6]. Tento vztah je jedním ze základních vztahů prostorové akustiky [3]. Sabine také zjistil, že doba dozvuku se v jednotlivých místech v prostoru příliš neliší a není ovlivňována dílčími pohltivostmi stěn, ale pouze celkovou pohltivostí všech stěn (3.2) [3,6]. Sabinův vztah je velmi zjednodušený a platí pouze pro hrubý odhad málo tlumené místnosti [3]. Za teoretického předpokladu dokonale pohltivých stěn ( $\alpha=1$ ) by doba dozvuku byla rovna 0, podle Sabineho bychom dostali hodnotu větší než 0 [3,6].

$$T_s = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad (3.1)$$

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_{iS} \quad (3.2)$$

### 3.2.2 Eyringův vzorec

Carl Ferdinand Eyring přišel ve 30. letech 20. století s teorií, že zvuk je pohlcován v určitých časových intervalech, které jsou průměrně rovné času potřebnému k šíření zvuku v prostoru [6]. Zavedl tzv. střední volnou dráhu  $l_s$ , neboli průměrnou dráhu, kterou urazí akustická vlna mezi dvěma odrazy od stěn [3]. Definoval tedy časový interval jako (3.3). Pro většinu prostorů se uvádí (3.4). Eyringův vzorec pro dobu dozvuku je (3.5). Tento vzorec naplňuje teoretickou představu, že při dokonalém pohlcování stěnami získáme nulovou dobu dozvuku, a je vhodný pro prostory s větším činitelem zvukové pohltivosti [3,6].

$$\tau = \frac{l_s}{c_0} \quad (3.3)$$

$$l_s = \frac{4 \cdot V}{S} \quad (3.4)$$

$$T_E = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha)} \quad (3.5)$$

### 3.2.3 Millingtonův vzorec

Eyring předpokládal, že počet odrazů od jednotlivých stěn je stejný. Tento předpoklad se v praxi ukázal nepravdivý, protože počet odrazů je závislý na ploše stěny. G. Millington uvažoval, že stěny v prostoru jsou tvořeny z  $n$  ploch o různé zvukové pohltivosti a každá z těchto ploch způsobuje v čase úbytek intenzity zvuku. Millingtonův vzorec je tedy modifikací Eyringova vzorce (3.6) [3,6].

$$T_M = 0,161 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (3.6)$$



### 3.2.4 Vliv prostředí na dobu dozvuku

Sabine, Eyring i Millington uvažovali, že akustická energie je pohlcována pouze stěnami. Ve skutečnosti existuje v prostředí činitel útlumu, který má za následek snižování intenzity zvuku při šíření prostředím. Toto tlumení je závislé také na dráze, kterou se zvuk šíří. Činitel útlumu  $m=m_1+m_2$ ,  $m_1$  je určeno tepelnou vodivostí a viskozitou plynu,  $m_2$  disperzí a molekulární absorpcí. Díky této skutečnosti lze napsat jednotlivé vzorce v konečných tvarech. Podle Sabineho (3.7), podle Eyringa (3.8) a podle Millingtona (3.9) [6].

$$T_s = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S + 4mV} = 0,161 \cdot \frac{V}{A + 4mV} \quad (3.7)$$

$$T_E = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1-\alpha) + 4mV} \quad (3.8)$$

$$T_M = 0,161 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1-\alpha_i) + 4mV} \quad (3.9)$$

## 4 Metody měření zvukové pohltivosti

V následujícím textu jsou popsány metody pro měření zvukové pohltivosti. První metodou je měření v dozvukové místnosti, druhou je měření v alfa-kabinetu a třetí je měření v impedanční trubici. Měření v impedanční trubici se provádí pro malé vzorky kruhového průřezu při kolmém dopadu zvuku, tato metoda není předmětem této bakalářské práce, a proto není dále detailněji popsána.

### 4.1 Metoda měření v dozvukové místnosti

Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti popisuje norma ČSN EN ISO 354. Následující text je proto z této normy čerpán.

#### 4.1.1 Základní pojmy

Ekvivalentní pohltivá plocha místnosti je plocha dokonale pohltivé stěny v jinak dokonale odrazivé místnosti, která by měla stejnou dobu dozvuku jako místnost měřená. Značí se jako  $A_1$  pro samotnou dozvukovou komoru a  $A_2$  pro dozvukovou komoru s měřeným vzorkem.

Ekvivalentní pohltivá plocha vzorku je rozdíl ekvivalentní pohltivé plochy dozvukové místnosti s měřeným vzorkem a bez něj. Značí se  $A_T$ .

Plocha vzorku je plocha stěny v místnosti pokrytá měřeným vzorkem. Značí se  $S$ .

Činitel zvukové pohltivosti je poměr ekvivalentní a skutečné plochy měřeného vzorku. Značí se  $\alpha_s$ . Na rozdíl od klasické definice činitele zvukové pohltivosti, jako poměru pohlcené a dopadající energie, může být činitel zvukové pohltivosti vypočítán pomocí doby dozvuku větší než 1 například v důsledku ohybového jevu.

#### 4.1.2 Podstata metody

Měření se provádí v místnosti s měřeným vzorkem a bez něj. Z výsledných dob dozvuku získáme, pomocí Sabineho vzorce, ekvivalentní plochu vzorku. Pro vzorek rovnoměrně pokrývající povrch se činitel zvukové pohltivosti vypočítá jako poměr ekvivalentní a skutečné plochy vzorku. Pokud je vzorek složen ze skupiny stejných objektů, vypočte se

ekvivalentní plocha jednoho jako poměr ekvivalentní plochy celého vzorku ku počtu objektů, z nichž je vzorek složen.

#### 4.1.3 Kmitočtový rozsah měření

Měření se provádí v třetinooktávových pásmech se středními kmitočty uvedených v ISO 266.

100	125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000	1250

Tabulka 4.1 Střední kmitočty třetinooktávových pásem

#### 4.1.4 Parametry dozvukové místnosti

Minimální objem dozvukové místnosti musí být 150 m<sup>3</sup>, pro nové místnosti se doporučuje minimálně 200 m<sup>3</sup>. Pokud je objem místnosti větší než 500 m<sup>3</sup>, nelze měřit zvukovou pohltivost na vyšších frekvencích kvůli pohltivosti vzduchu.

Dozvuková místnost musí splňovat následující podmínku  $l_{max} < 1,9V^{\frac{1}{3}}$ . Kde  $l_{max}$  představuje nejdelší vzdálenost dvou bodů na hranici místnosti a  $V$  je objem místnosti. Poměr stran místnosti nesmí být poměrem malých celých čísel kvůli dosažení rovnoměrného rozložení vlastních kmitů.

Ekvivalentní pohltivá plocha samotné místnosti nesmí být větší než hodnoty uvedené v následující tabulce.

Kmitočet [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$A_T$ [m <sup>2</sup> ]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Kmitočet [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$A_T$ [m <sup>2</sup> ]	6,5	7,0	7,5	8,0	9,5	10,5	12,0	13,0	14,0

Tabulka 4.2 Mezní ekvivalentní pohltivé plochy

Tabulka platí pro místnost o objemu 200 m<sup>3</sup>. Pokud je objem místnosti jiný vynásobí se ekvivalentní pohltivé plochy konstantou  $(\frac{V}{200})^{\frac{2}{3}}$ .

#### 4.1.5 Rovinné pohltivé obklady

Měřený vzorek musí mít plochu 10-12 m<sup>2</sup>, pokud je objem místnosti větší než 200 m<sup>3</sup> je nutno horní hranici plochy vynásobit konstantou  $(\frac{V}{200})^{\frac{2}{3}}$ . Čím je objem místnosti větší, tím by měla být větší i volená plocha vzorku. Plocha vzorků s nízkým činitelem zvukové pohltivosti by měla být co nejbližší horní hranici plochy.

Vzorek musí mít pravoúhlý tvar s poměrem délky k šířce 1:0,7. Vzorek by měl být umístěn tak, aby jeho strany nebyly rovnoběžně s nejbližší stěnou místnosti a aby žádná jeho část nebyla blíže než 1 m od jakékoliv stěny. Minimální vzdálenost je alespoň 0,75 m. Jedná-li se o těžký vzorek, který musí spočívat na stěně či podlaze, nemusí být minimální vzdálenost splněna.

#### 4.1.6 Samotné pohltivé objekty

Samotné objekty, jako je například nábytek, jsou postaveny tak jak se běžně vyskytují v praxi. Objekty se staví minimálně 1 m od stěny a od mikrofonů. Počet objektů ve vzorku musí být dostatečný k vyvolání změny ekvivalentní pohltivé plochy místnosti minimálně o 1 m<sup>2</sup> ne však více než o 12 m<sup>2</sup>. Pokud je objem místnosti větší než 200 m<sup>3</sup> tyto hranice se opět vynásobí konstantou  $(\frac{V}{200})^{\frac{2}{3}}$ . Samostatně používané objekty se rozmístí minimálně ve vzdálenosti 2 m od sebe. Je-li vzorek tvořen jedním objektem, provádí se měření alespoň pro 3 místa v místnosti vzdálených minimálně 2 m od sebe a poté se výsledky zprůměrují.

#### 4.1.7 Teplota a relativní vlhkost

Měření místnosti bez a se vzorkem by se měla provádět za co nejbližších podmínek z hlediska teploty a relativní vlhkosti, aby se korekce na útlumu ve vzduchu mezi oběma měřeními významně nelišily. Relativní vlhkost musí být od 30 % do 90 % a teplota vyšší než 15 °C. Měřený vzorek musí být v místnosti dostatečně dlouhou dobu, aby se těmto podmínkám přizpůsobil.

#### 4.1.8 Umístění mikrofonů a zdrojů

Použité mikrofony musí mít všesměrovou charakteristiku. Měření se provádějí pro různá umístění mikrofonů. Jednotlivá místa jsou od sebe vzdálena alespoň 1,5 m, 2 m od zdroje zvuku a 1 m od kterékoliv stěny místnosti a zkušební vzorku.

Zdroj musí mít všesměrový vyzařovací diagram. Pro zdroj zvuku se volí různá místa vzdálená od sebe minimálně 3 m.

Nejmenší počet nezávislých křivek dozvukového poklesu musí být 12, proto součin počtu míst mikrofonů a počtu míst zdroje musí být také minimálně 12. Minimální počet míst mikrofonu musí být 3, minimální počet míst zdroje 2. Je možné použít více zdrojů najednou za předpokladu, že rozdíly vyzařovacích výkonů jsou v pásmu 3 dB pro všechna třetinooktávová pásma. Při použití více zdrojů lze zmenšit počet nezávislých vyhodnocovacích křivek na 6.

#### 4.1.9 Metody měření

Norma popisuje dvě metody měření doby dozvuku, a to metodu přerušného šumu a metodu integrované pulsní odezvy. Pro naše měření byla použita metoda přerušného šumu.

Při použití metody přerušného šumu se místnost nabudí širokopásmovým nebo pásmovým šumem. Při použití širokopásmového šumu nesmí být v místnosti rozdíly hladin akustického tlaku v sousedních třetinooktávových pásmech větší než 6 dB. Pásmový šum musí zabírat alespoň třetinu oktávy.

Doba buzení musí být alespoň polovina očekávané doby dozvuku, kvůli vytvoření ustáleného stavu ve všech používaných kmitočtových pásmech.

#### 4.2 Metoda měření v alfa-kabinetu

Metoda měření v alfa-kabinetu je v současné době ve fázi výzkumu a nelze zhotovený alfa-kabinet zakoupit. Metoda vychází z měření impedance reproduktoru. Z tohoto důvodu byla jako náhrada tohoto měření zvolena metoda měření impedance reproduktoru v ozvučnici.

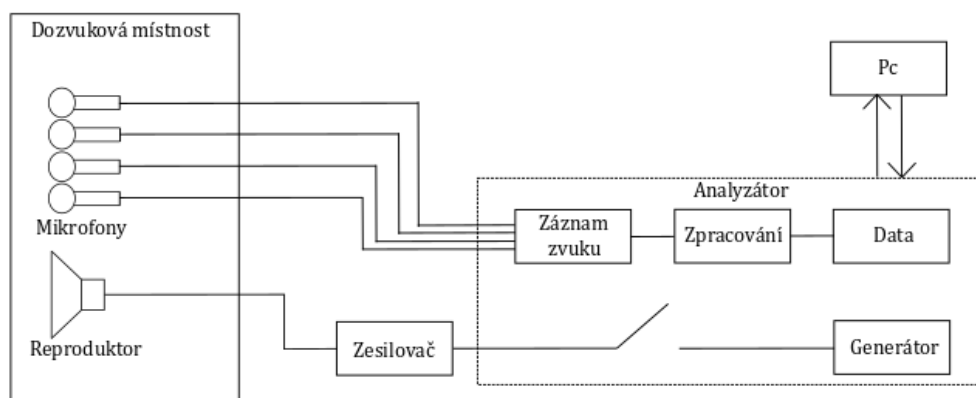
## 5 Zrealizovaná měření

### 5.1 Měření v dozvukové místnosti

Při měření v dozvukové místnosti byla použita metoda přerušného šumu. Byly použity čtyři mikrofony a jeden zdroj. Před zahájením měření byl každý mikrofon zkalibrován. Všechna měření proběhla pro dvě pozice reproduktoru, každý mikrofon byl postupně přesouván mezi třemi pozicemi. Bylo tedy měřeno dvanáct pozic mikrofону pro dvě pozice zdroje, tedy celkem 24 měřících bodů. Pro každou pozici byla provedena a zprůměrována tři měření. Tabulka s popisem jednotlivých pozic mikrofónů a obrázek s nákresem dozvukové místnosti s pozicemi mikrofónů a zdroje je součástí příloh na CD.

#### 5.1.1 Měřicí přístroje

Při měření byl použit analyzátor, který dokáže ovládat vypnutí reproduktoru při dosažení dostatečného nabuzení místnosti. Data, naměřená pomocí čtveřice mikrofónů, jsou posílána do počítače, kde jsou zpracovávána programem Pulse LabShop v. 10.3. Blokové schéma měřícího řetězce je na obrázku 5.1.



Obr. 5.1 Blokové schéma měřícího řetězce pro měření v dozvukové místnosti

V následující tabulce jsou uvedeny měřicí přístroje.

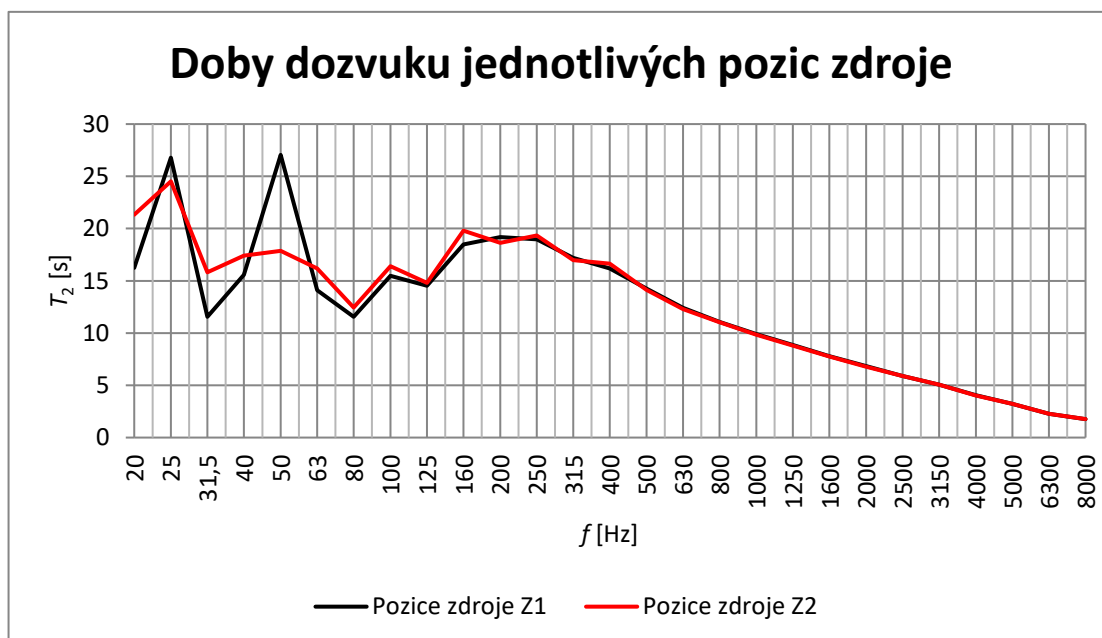
4xMikrofon	Brüel & Kjaer difúzní 4943
Reproduktor	Yamaha S115V 500 W
Kalibrátor	Brüel & Kjaer 4231 (94 dB/1kHz)
Analyzátor	Brüel & Kjaer 3560 C
Zesilovač	QCS PLX 1804

Tabulka 5.1 Použité přístroje k měření v dozvukové místnosti

### 5.1.2 Měření prázdné dozvukové místnosti

Měření prázdné dozvukové místnosti posloužilo ke kontrole vlastností místnosti vzhledem k požadavkům uvedených v normě a k porovnání s měřeními se vzorky. Objem místnosti je 212 m<sup>3</sup>. Místnost je opatřena zavěšenými difuzory k zajištění difúzního pole v místnosti podle požadavků normy.

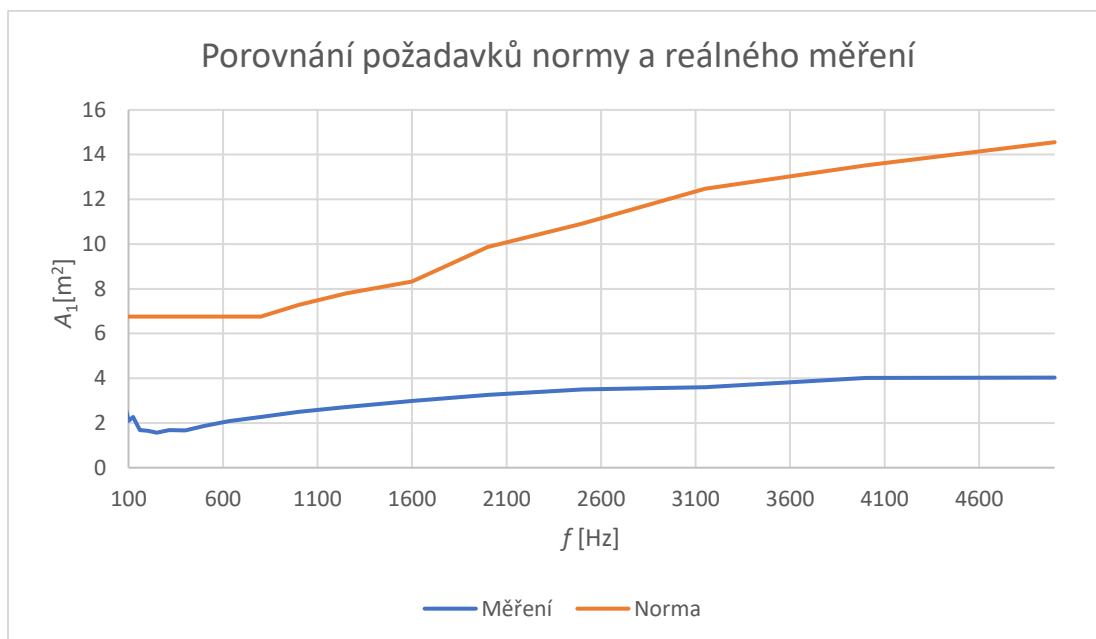
Na následujícím grafu je závislost doby dozvuku na frekvenci pro obě pozice zdroje.



Obr. 5.2 Porovnání dob dozvuku pro jednotlivé pozice zdroje

Z grafu je patrné, že pozice zdroje v prostoru má velký vliv na dobu dozvuku při nízkých frekvencích, proto norma uvádí měření až od 100 Hz, kde jsou již rozdíly mezi pozicemi minimální. Od 250 Hz jsou rozdíly již zanedbatelné.

Na dalším grafu je porovnání ekvivalentních ploch místnosti s požadavky normy uvedených v tabulce 4.2 přepočtených pro používanou místnost o objemu 212 m<sup>3</sup>.



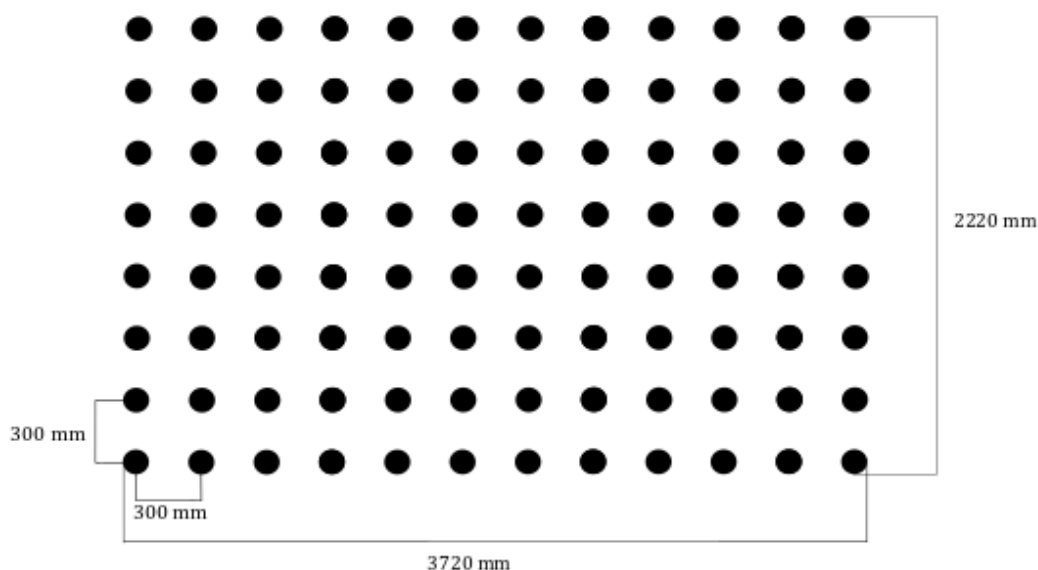
Obr. 5.3 Porovnání efektivních ploch měřené místnosti a požadovaných efektivních ploch z hlediska normy

Uvedený graf ukazuje, že použitá dozvuková místnost splňuje požadavek normy na maximální přípustné pohltivé plochy.

### 5.1.3 Měření prvního vzorku

Pro měření bylo použito 104 lahví o objemu 0,5 l. Hlavním důvodem pro výběr lahví jako měřeného vzorku je fakt, že lahev je v podstatě jednoduchý Helmholtzův rezonátor a jsou nejjednodušším řešením k porovnávacímu měření. Uspořádání lahví je načrtnuto na obrázku 5.4.





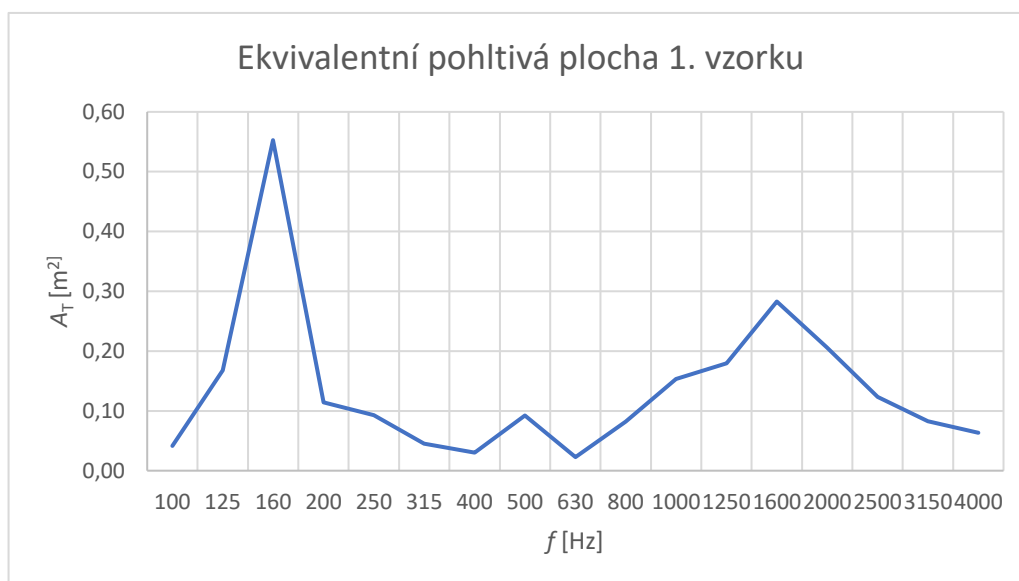
Obr. 5.4 Uspořádání lahví pro měření v dozvukové místnosti

Tímto uspořádáním lahví vznikl vzorek o ploše  $8,3 \text{ m}^2$ , tato plocha není v souladu s minimální plochou vzorku podle normy. Lahve byly uspořádány podle normy tak, aby žádná ze stran vzniklého obdélníka nebyla rovnoběžná se stěnami místnosti. Jedna z fotografií dozvukové místnosti s rozmístěnými lahvemi je na obrázku 5.5. zbytek fotografií z měření je dostupný v přílohách na CD.



Obr. 5.5 Fotografie rozmístění lahví v dozvukové místnosti

Z důvodu nevyhovující velikosti plochy vzorku je dále uveden pouze graf ekvivalentní plochy vzorku v závislosti na frekvenci, jejichž průběh kopíruje průběh zvukové pohltivosti.

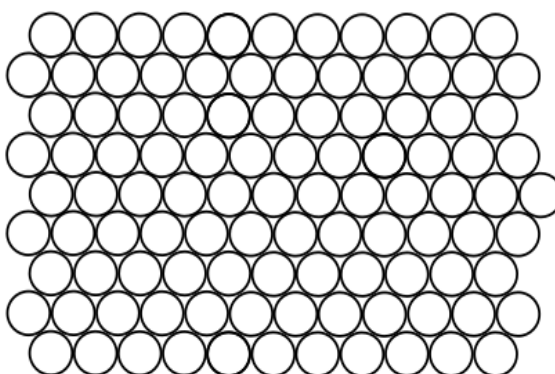


Obr. 5.6 Ekvivalentní pohltivá plocha 1. vzorku závislá na frekvenci

Z grafu je zřetelně vidět, že naměřené velikosti ekvivalentních pohltivých ploch dosahují maxima při 160 Hz.

#### 5.1.4 Měření druhého vzorku

Druhý vzorek byl uspořádán ze stejného počtu lahví, s tím rozdílem, že byly minimalizovány vzdálenosti mezi jednotlivými lahvemi. Náčrt uspořádání je na obrázku 5.7. Fotografie vzorku jsou opět dostupné na CD.



Obr. 5.7 Uspořádání lahví v druhém vzorku

Uvedeným uspořádáním byl vytvořen vzorek, který pokrýval plochu 1,17 m<sup>2</sup>. Tato plocha není opět v souladu s normou.



Obr. 5.8 Ekvivalentní pohltivá plocha 2. vzorku závislá na frekvenci

Graf vykazuje nejvyšší ekvivalentní pohltivou plochu při 160 Hz a dále u 630 a 2000 Hz.

### 5.1.5 Porovnání měřených vzorků

Z porovnání grafů měřených vzorků je patrné, že láhve mají největší ekvivalentní pohltivou plochu při 160 Hz. U obou vzorků byly také zaznamenány pohltivosti i na vyšších frekvencích, nejspíše v důsledku tvaru lahví, vzdálenosti hrdla od podlahy, jejich rozmístěním a dalšími faktory. U druhého vzorku se navíc objevily významné špičky v oblastech kolem 630 až 2000 Hz, to mohlo být zapříčiněno vzduchem, který u druhého vzorku vyplňoval malé mezery mezi jednotlivými láhvemi.

### 5.1.6 Podmínky měření

Relativní vlhkost v místnosti se pohybovala v rozmezí od 72 do 75 %, teplota v místnosti se pohybovala od 20,8 do 29,9 °C a atmosférický tlak byl 975 hPa.

## 5.2 Měření v ozvučnici

Jak již bylo uvedeno, metoda měření v alfa-kabinetu je zatím předmětem výzkumu. Z tohoto důvodu je níže uvedena metoda zaznamenávání změny impedance reproduktoru v ozvučnici při přítomnosti měřeného vzorku. Měření probíhá na principu porovnávání napětí na reproduktoru a napětí dodávaném zesilovačem. Pro potřeby měření byla použita ozvučnice a reproduktor, které jsou popsány v kapitole 2. Fotografie používané ozvučnice je na obrázku 5.9.

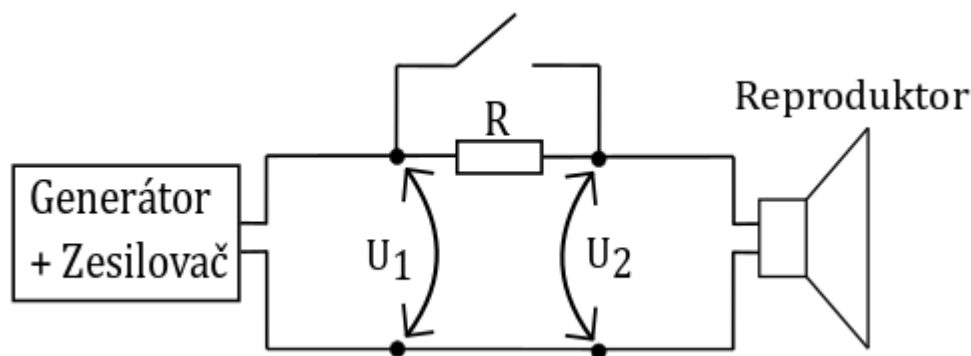


Obr. 5.9 Fotografie ozvučnice používané k měření

Měření bylo realizováno v programu Pulse LabShop analýzou FFT, která měří maximální hodnotu, v rozsahu 10-500 Hz s krokem 0,25 Hz. Jako měřicí signál posloužil signál sweep.

### 5.2.1 Schéma zapojení

Na následujícím obrázku je schéma zapojení pro měření impedance a TS parametrů reproduktoru.



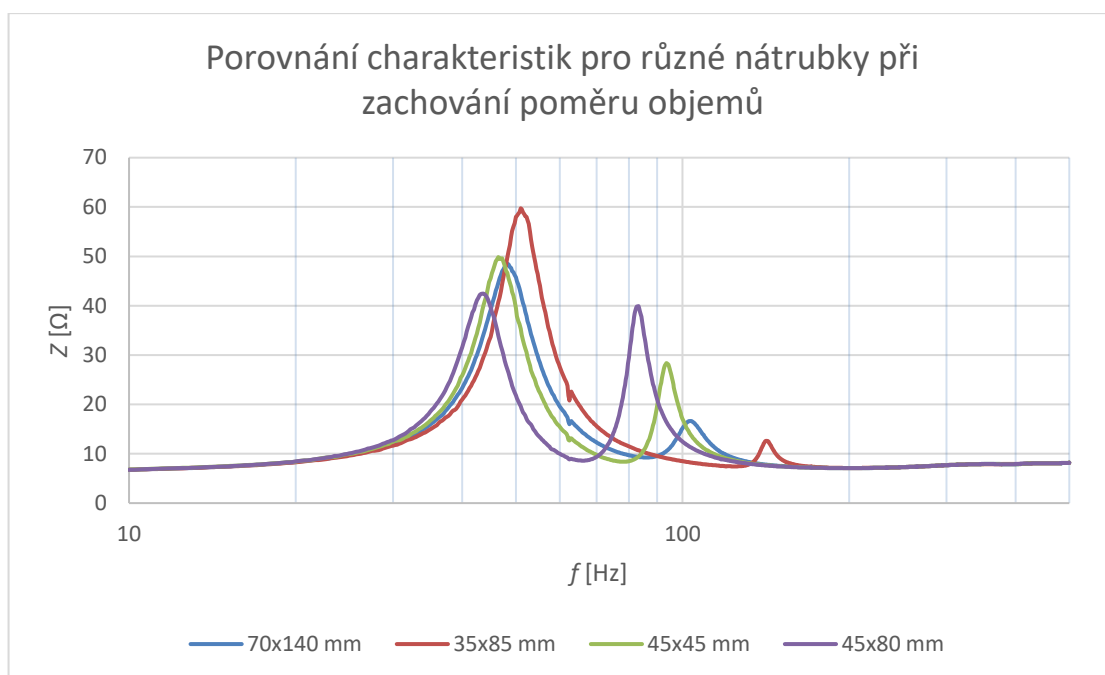
Obr. 5.10 Schéma zapojení pro měření impedanční charakteristiky a TS parametrů reproduktoru

Pro měření TS parametrů je nutno reproduktor nejdříve ohřát, aby výsledky měření odpovídali co nejvíce reálnému používání reproduktoru. Při ohřívání reproduktoru se rezistor zkratuje vypínačem, tak aby celý výkon, dodávaný zesilovačem, byl na svorkách reproduktoru. Pro měření impedančních charakteristik je výhodnější pracovat se „studeným“ reproduktorem, pro zajištění stejných podmínek pro všechna měření.

### 5.2.2 Měření rezonátorů

Jako vzorky k měření byly použity přepážky s nátrubky, které rozdělili ozvučnici na dva uzavřené objemy, tím vznikl Helmholtzův rezonátor, určený k pohlcování zvuku, a přenosové prostředí mezi reproduktorem a přepážkou. Umístění přepážky bylo pro všechna měření realizováno tak, aby část objemu ozvučnice, od reproduktoru ke vzorku, byla pro všechna měření stejná a to 16,5 l. Změnou pozice přepážky byl pak měněn objem Helmholtzova rezonátoru.

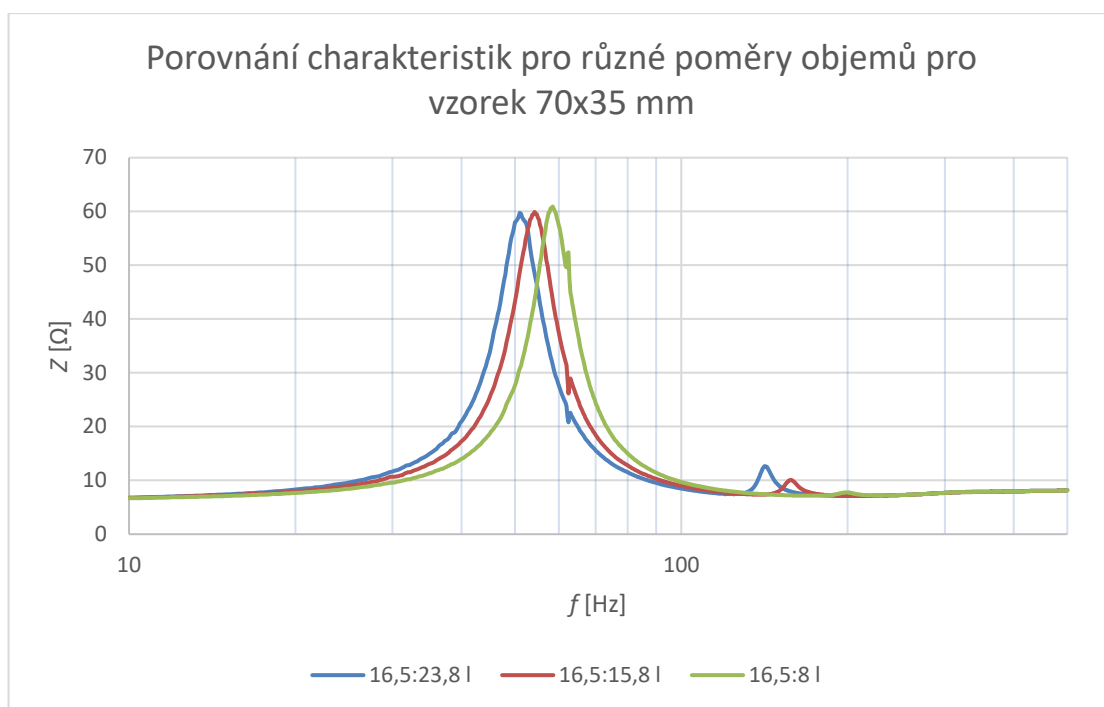
V následujícím grafu jsou zachyceny průběhy impedance reproduktoru pro konstantní poměr objemu ozvučnice a rezonátoru (16,5:23,8 l) v závislosti na použitém nátrubku.



Obr. 5.11 Porovnání impedančních charakteristik reproduktoru v závislosti na použitém nátrubku při zachování poměru objemů ozvučnice

Z grafu je patrné, že volba nátrubky má velký vliv na chování impedance reproduktoru. První rezonancí je rezonance samotného reproduktoru, druhou pak rezonance způsobená v důsledku přítomnosti rezonátoru. Při měření samotné bassreflexové ozvučnice, která vyzařovala do nekonečného prostoru, bylo pořadí rezonancí opačné, protože bassreflexová ozvučnice je naladěná tak, aby rozšířila použitelné pásmo reproduktoru směrem k nižším frekvencím. Dále je zajímavé si povšimnout, že čím je větší hodnota impedance při rezonanci reproduktoru, tím menší je při rezonanci rezonátoru.

Následující graf zobrazuje průběh impedance reproduktoru pro nátrubek (70x35 mm) v závislosti na změně poměru objemu ozvučnice a rezonátoru.



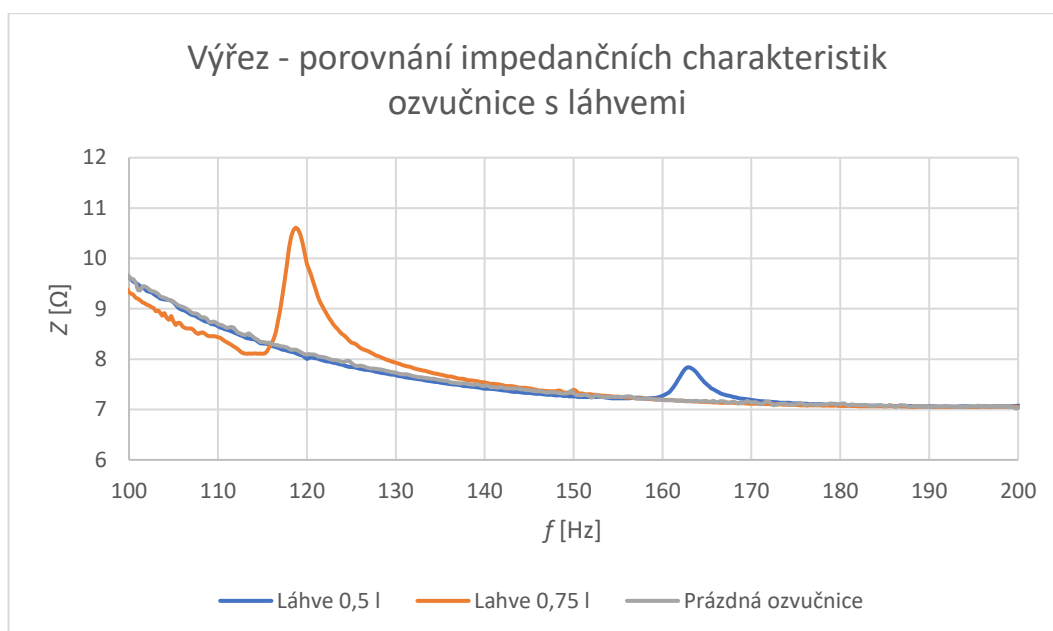
Obr. 5.12 Porovnání průběhu frekvenční závislosti impedance v závislosti na změně poměru objemů pro vzorek 70x35 mm

Z grafu je patrné, že zmenšením objemu rezonátoru, dojde k zvětšení rezonančních frekvencí. Impedance při rezonanci reproduktoru se zvětšuje, zatím co impedance při rezonanci rezonátoru se zmenšuje.

Z uvedených měření je zřejmé, že výrazné změny impedance lze sledovat pokud vzorek rezonuje blízko rezonanční frekvence samotného reproduktoru.

### 5.2.3 Měření lahví

Měření jedné lahve o objemu 0,5 l nepřineslo žádný čitelný výsledek, nejspíše proto, že v předchozích měřeních byly použity objemy vzorků srovnatelné s objemem ozvučnice. Z těchto důvodů byly měřeny najednou čtyři lahve. Dále byly změřeny čtyři láhve o objemu 0,75 l pro porovnání. V následujícím grafu jsou impedanční křivky ozvučnice bez a s lahvemi. Z důvodu malých změn impedance při rezonanci lahví, je graf uveden pouze pro okolí rezonančních frekvencí lahví.

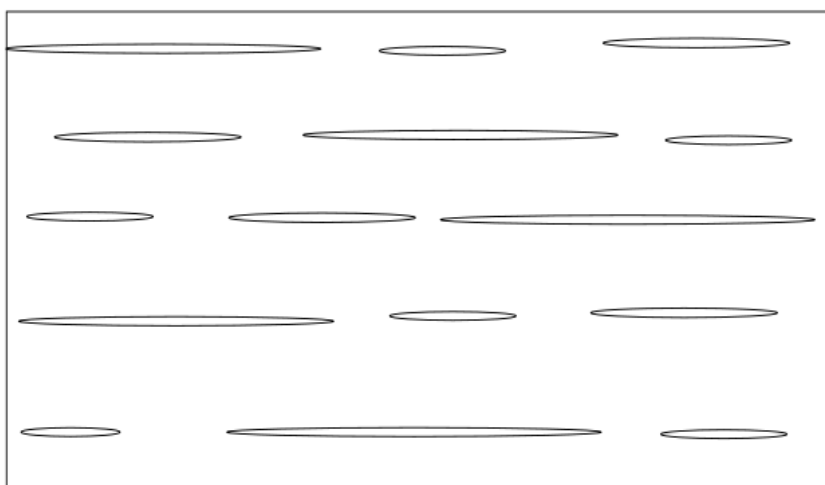


Obr. 5.13 Porovnání impedančních charakteristik ozvučnice bez s láhvemi, pro objem ozvučnice 24,5 l

V grafu jsou vidět rezonanční frekvence lahví. Změny impedancí jsou ovšem velmi malé v porovnání s předchozími měřeními větších objemů. Větší lahve rezonují při 119 Hz a menší při 163 Hz. Na těchto frekvencích lze očekávat nejvyšší hodnotu pohltivosti.

#### 5.2.4 Měření panelu Soning

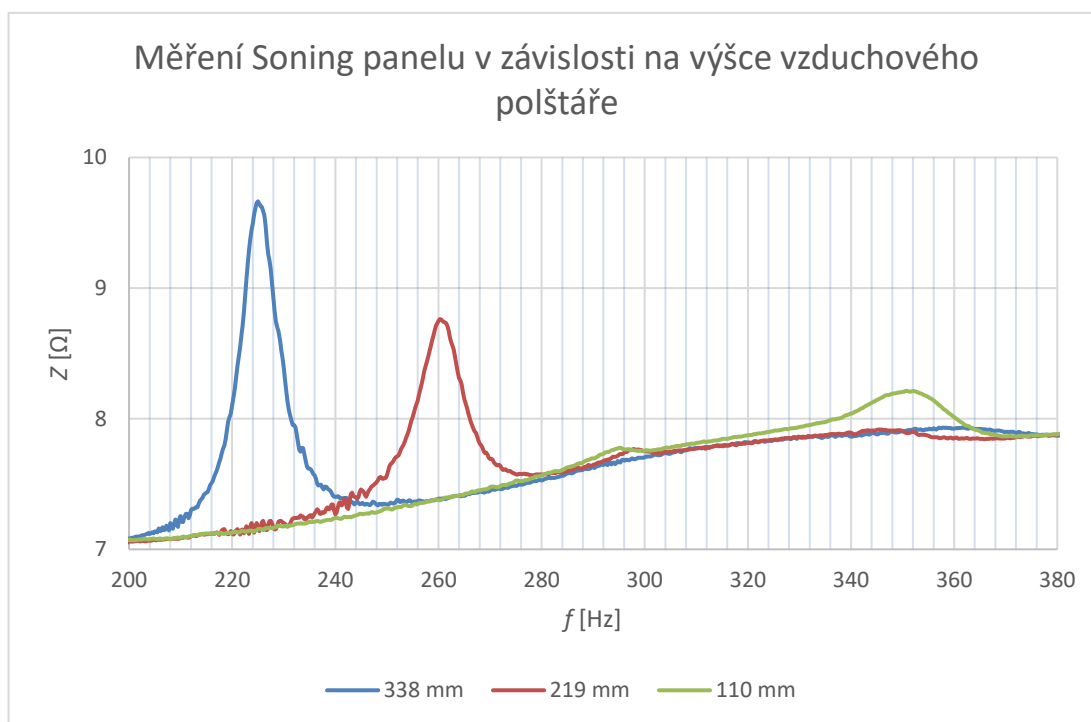
Panel VERSO T-MA3 od firmy Soning je akustický prvek na bázi dřeva. Celá deska je opatřena děrováním. Jednoduchý náčrt desky je na následujícím obrázku. Podrobnosti a fotodokumentace je k dispozici v přílohách na CD.



Obr. 5.14 Náčrt panelu VERSO T-MA3 od firmy Soning



Panel byl zasazen do ozvučnice stejně jako vzorky při měření rezonátorů. Hodnoty byly naměřeny pro různou výšku vzduchového polštáře a vyneseny do následujícího grafu.

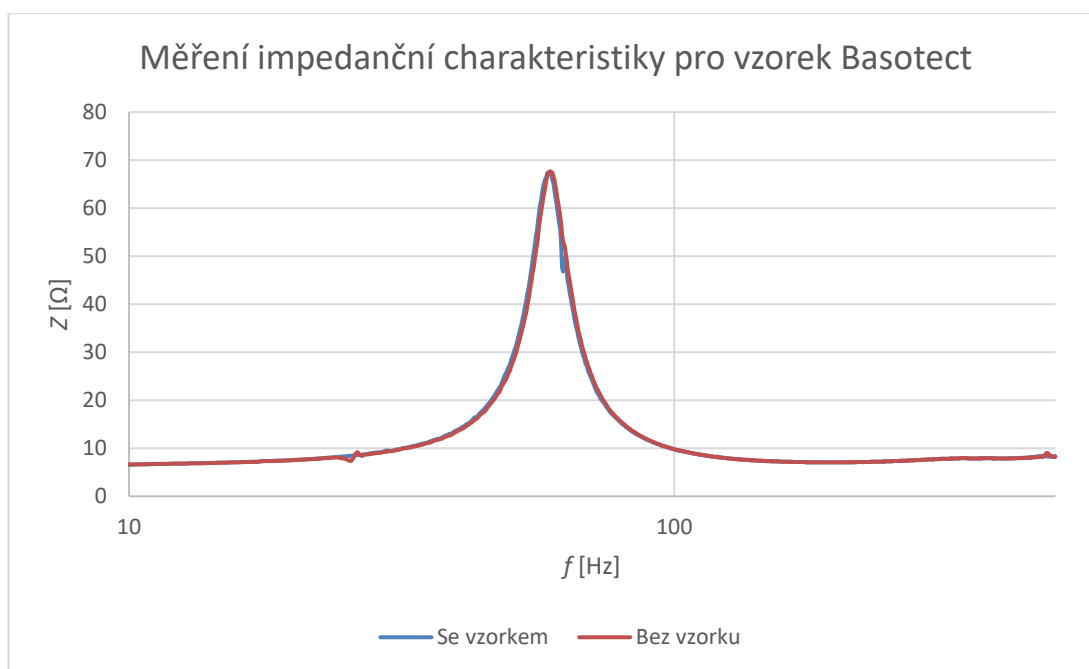


Obr. 5.15 Frekvenční závislost impedance při měření Soning panelu pro různé poměry objemů

Graf je stejně jako v případě měření lahví uveden pouze ve výřezu kvůli lepší viditelnosti rezonančních špiček.

### 5.2.5 Měření pěny Basotect

Tento materiál má dobré tepelné i akustické izolační vlastnosti. V následujícím grafu je porovnání impedance prázdné ozvučnice o objemu 16,5 l a impedance po vložení vzorku o tloušťce 4 cm a rozměrech 25x25 cm.



Obr. 5.16 Porovnání impedanční charakteristiky prázdné ozvučnice a ozvučnice se vzorkem Basotect

Měření tohoto materiálu ukazuje, že metoda měření v ozvučnici, je vhodná jen pro materiály na rezonančním principu. Téměř nezatelný posun rezonanční frekvence je dán zmenšením objemu ozvučnice o objem vzorku a o akustické pohltivosti nijak nevypovídá.

## 6 Porovnání metod

### 6.1 Porovnání výsledků

Výsledky měření lahví o objemu 0,5 l, na nichž byla provedena měření pomocí obou zvolených metod, ukazují, že pomocí měření v ozvučnici sice nelze určit velikost zvukové pohltivosti lahví, ale byla získána frekvence při, které mají lahve pohltivost nejvyšší, a to 163 Hz. Měření v dozvukové místnosti potvrdilo nejvyšší pohltivost při 160 Hz.

Pro porovnání dat naměřených pro Soning panel byl použit datasheet od výrobce, který je součástí příloh na CD. Výrobce udává, pro výšku vzduchového polštáře 184 mm, maximální pohltivost pro 250 Hz. V ozvučnici byla, pro výšku vzduchového polštáře 219 mm, změřená rezonanční frekvence 260 Hz

Z uvedených srovnání je zřetelné, že při měření v ozvučnici je třeba volit reproduktor s rezonanční frekvencí v pásmu očekávané rezonanční frekvence zkušebního prvku, aby bylo možné zřetelně detekovat změny impedance.

Metodou měření v dozvukové místnosti lze získat přesnou hodnotu zvukové pohltivosti i pro jiné prvky jako jsou například porézní materiály. Měření probíhá za všesměrového dopadu signálu, a tedy odpovídá lépe reálným podmínkám.

## 6.2 Výhody a nevýhody metod

Metoda měření v uzavřené ozvučnici je časově méně náročná. Měření jednoho vzorku i s přípravou vybavení trvá asi 15 minut. Metoda měření v dozvukové místnosti zabrala asi 4 hodiny, pro měření prázdné místnosti a dvou konfigurací vzorku. Z této doby trvala příprava vybavení a rozmístění vzorku 45 minut.

Vybavení k měření v uzavřené ozvučnici lze pořídit v řádech desetitisíců korun. Není potřeba velkých ploch měřených vzorků ani velkých prostorů pro realizaci měření, proto je tato metoda vhodná i pro návrhy prototypů. K měření v dozvukové místnosti je potřeba speciální místnost o objemu kolem 200 m<sup>3</sup>, ve kterém je zajištěna stálá teplota a relativní vlhkost. Cena vybavení, potřebného k měření, se pohybuje v řádech milionů korun. Je potřeba měřit velké plochy vzorků, které mohou být náročné na výrobu a dopravu.

## 7 Závěr

Pro účely měření v dozvukové místnosti jsem prostudoval normu ČSN EN ISO 354, ze které jsem napsal stručný výtah informací. Následně jsem provedl samotné měření vzorku, složeného ze 104 lahví o objemu 0,5 l, v dozvukové místnosti pro dvě varianty rozmístění. Bohužel plocha zabíraná lahvemi nebyla dostačující vzhledem k požadavkům normy, z tohoto důvodu nebylo možné určit přesnou velikost činitele zvukové pohltivosti, ale pouze ekvivalentní pohltivé plochy vzorku. Z frekvenční závislosti ekvivalentních ploch jsem zjistil, že nejvyšší hodnotu zvukové pohltivosti má vzorek pro frekvence kolem 160 Hz.

Jako náhradu za měření v alfa-kabinetu, který je ve fázi výzkumu, jsme zvolili měření v uzavřené ozvučnici. Pro účely měření jsem prostudoval náhradní schémata reproduktoru v uzavřené a bassreflexové ozvučnici a následně zpracoval simulaci jednotlivých případů. Simulaci jsem porovnal s reálnými měřeními, které ukázali, že simulace je nejpřesnější pro případ, kdy se jedná o samotný reproduktor. V uzavřené ozvučnici jsem následně změřil velké množství vzorků. Výsledky měření ukázali, že metoda je vhodná pouze pro rezonanční prvky s rezonanční frekvencí blízkou rezonanční frekvenci reproduktoru. Pro vyšší frekvence byly změny impedance již nedetekovatelné. Proběhlo také měření lahví, které ukázalo, lahve rezonují při frekvenci 163 Hz, při této frekvenci tedy očekávám nejvyšší činitel zvukové pohltivosti.

Na závěr jsem provedl porovnání obou použitých metod jak z hlediska výsledků, tak z hlediska finanční a časové náročnosti. Hlavní výhodou dozvukové místnosti je možnost přesně určit velikost činitele zvukové pohltivosti. Měření v uzavřené ozvučnici je levnější, rychlejší a není potřeba velkých ploch vzorků. Nejsme však schopni určit přesnou hodnotu činitele zvukové pohltivosti, ale pouze frekvence největšího pohlcování.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Reprodukce zvuku aneb základy teorie – AVmania.cz. AVmania.cz – Audio, video, domácí kino [online]. Dostupné z: <https://avmania.e15.cz/reprodukce-zvuku-aneb-zaklady-teorie>
- [2] SÝKORA, Bohumil. *Reproduktory a reproduktorové soustavy trochu jinak. Amatérské radio: časopis pro elektroniku*. Praha: Magnet-Press, 1997, 42(5), 163-195. ISSN 0139-7087.
- [3] SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [4] SÝKORA, Bohumil. *Stavíme reproduktorové soustavy*. Praktická elektronika A Radio. Praha: Amaro, 1997. ISSN 1211-328X.
- [5] Radio & Audio Artikelen [online]. Dostupné z: <https://www.by-rutgers.nl/PDFfiles/Thiele%20-%20Small-parameters.pdf>
- [6] KYNCL, Jaroslav a KOLMER, Felix. *Prostorová akustika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury
- [7] KRŇÁK, Milan. *Akustické obklady*. Praha: Výzkumný ústav zvukové, obrazové a reprodukční techniky, 1971.
- [8] VAVERKA, Jiří. *Stavební fyzika*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-1283-6.
- [9] ČSN ISO 354. *Akustika – Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.

## **Seznam elektronických příloh**

Datasheety k reproduktoru a Soning panelu

Fotografie dozvukové místnosti a ozvučnice

Nákres dozvukové místnosti s místy mikrofonů a zdrojů

Naměřené hodnoty

Nastavení Pulse LabShop

Simulace