

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tvorba metodických návodů pro akustická měření v akustických laboratořích FEL

Autor:

Bc. Lenka Fránová

Vedoucí práce:

Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

Plzeň, 2017

ABSTRAKT

Práce rozebírá a popisuje metody používané pro stanovení parametrů reproduktoru, jako jsou frekvenční analýzy, charakteristická citlivost, impedanční křivka, zkreslení, směrové charakteristiky a TS parametry. V teoretické části je popsán princip fungování reproduktoru a jeho parametry. Dále jsou uvedeny metody stanovení parametrů v souladu s normami ČSN.

V příloze je ke každému typu měření uveden konkrétní návod (určený pouze pro akustické laboratoře FEL).

KLÍČOVÁ SLOVA

Akustika, měření, reproduktor, elektroakustika, TS parametry, frekvenční charakteristika reproduktoru, zkreslení reproduktoru, návod.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the main methods of loudspeaker parameters measurement, as are frequency analysis, characteristic sound pressure level, impedance curve, loudspeaker directivity and T-S parameters. There are the principle and the main parameters of loudspeaker described in the theoretical part, as well as methods of measurement according to CSN standards.

Detailed loudspeaker measuring instructions (designed for acoustic laboratories of FEE) are placed in the last part of the thesis.

KEYWORDS

Acoustic, measurement, loudspeaker, speaker, electroacoustic, T-S parameters, frequency response, loudspeaker distortion factor, manual.

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 vypracovala 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.

Lenka Fránová

OBSAH

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI	1
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ	1
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE	1
DIPLOMOVÁ PRÁCE	1
TVORBA METODICKÝCH NÁVODŮ PRO AKUSTICKÁ MĚŘENÍ V AKUSTICKÝCH LABORATOŘÍCH FEL.....	1
ABSTRAKT	2
KLÍČOVÁ SLOVA	2
ABSTRACT	3
KEYWORDS	3
PROHLÁŠENÍ	4
OBSAH	6
SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	9
ÚVOD	10
1 REPRODUKTORY	11
1.1 KONSTRUKCE REPRODUKTORŮ	11
1.1.1 ELEKTRODYNAMICKÝ REPRODUKTOR.....	11
1.2 DĚLENÍ REPRODUKTORŮ PODLE FREKVENČNÍHO ROZSAHU	13
2 NÁHRADNÍ OBVOD REPRODUKTORU	14
2.1 ANALOGIE ELEKTRICKÝCH A MECHANICKÝCH VELIČIN	14
2.1.1 ANALOGICKÝ OBVOD	15
2.1.2 MECHANICKÉ SOUSTAVY SE SOUSTŘEDĚNÝMI A ROZPROSTŘENÝMI PARAMETRY	16
2.2 ANALOGICKÝ OBVOD ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU	16
3 PARAMETRY REPRODUKTORŮ	18
3.1 PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA	18
3.2 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA	18
3.3 IMPEDANČNÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA	18
3.4 REZONANČNÍ FREKVENCE	19
3.5 TS PARAMETRY	19
3.6 ČINITEL JAKOSTI Q	20
3.7 ČITLIVOST	20
3.8 ZKRESLENÍ	21
3.8.1 HARMONICKÉ ZKRESLENÍ	21
3.8.2 INTERMODULAČNÍ ZKRESLENÍ	22
3.8.3 CHARAKTERISTICKÉ INTERMODULAČNÍ ZKRESLENÍ N-TÉHO ŘÁDU.....	22
3.9 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA	22
3.10 VLIV ZÁSTAVBY	23
4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ REPRODUKTORU	26
4.1 TECHNICKÉ VYBAVENÍ POUŽÍVANÉ PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ REPRODUKTORŮ	26

4.2 PODMÍNKY MĚŘENÍ	27
4.2.1 UPEVNĚNÍ REPRODUKTORŮ.....	27
4.2.2 AKUSTICKÉ POLE	27
4.2.3 VOLNÉ ZVUKOVÉ POLE.....	27
4.2.4 VOLNÉ ZVUKOVÉ POLE V POLOPROSTORU.....	28
4.2.5 POZICE VŮČI MĚŘICÍMU MIKROFONU	28
4.2.6 TESTOVACÍ SIGNÁLY.....	29
4.2.7 NEŽÁDOUCÍ AKUSTICKÝ A ELEKTRICKÝ ŠUM.....	29
4.2.8 KLIMATICKÉ PODMÍNKY	29
4.3 PŘÍPRAVA REPRODUKTORU K MĚŘENÍ	29
4.4 KALIBRACE	30
4.5 MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH CHARAKTERISTIK	30
4.5.1 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA	30
4.5.2 IMPEDANČNÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA	31
4.6 MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ	31
4.7 MĚŘENÍ CITLIVOSTI	33
4.8 MĚŘENÍ HARMONICKÉHO ZKRESLENÍ	34
4.9 MĚŘENÍ INTERMODULAČNÍHO ZKRESLENÍ	35
4.10 MĚŘENÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY	36
4.11 MĚŘENÍ ODPORU	37
5 ZÁVĚR	38
6 PŘÍLOHA	39
NÁVOD K MĚŘENÍ PARAMETRŮ REPRODUKTORŮ V AKUSTICKÝCH LABORATOŘÍCH FEL ZČU	39
BEZPEČNOSTNÍ POKYNY:	39
PŘÍPRAVA REPRODUKTORŮ K MĚŘENÍ	39
INSTALACE	40
VYPOČÍTANÉ HODNOTY NAPĚTÍ PŘI STANDARDNĚ MĚŘENÝCH VÝKONECH	40
KALIBRACE MIKROFONU	41
MĚŘENÍ AMPLITUDOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY	42
MĚŘENÍ CITLIVOSTI	43
ZKRESLENÍ	45
IMPEDANČNÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA	47
TS PARAMETRY	49
KONTROLNÍ MĚŘENÍ Z, L, R	51
PROTOKOL O MĚŘENÍ	52
7 SEZNAM LITERATURY	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Magnetický obvod elektrodynamického reproduktoru[9].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2 Řez elektrodynamickým reproduktorem[6].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 3 Analogický obvod reproduktoru</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4 Analogický obvod reproduktoru převedený na elektrickou stranu</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5 Impedanční charakteristika basového reproduktoru.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 6 Ukázka směrové charakteristiky reproduktoru [3].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 7 Rozměry deskové ozvučnice dle ČSN EN 60268-5 [1].....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 8 Změna frekvenční charakteristiky vlivem zástavby u basového reproduktoru pro automobilový průmysl.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 9 Uzavřená ozvučnice v bezodrazové komoře FEL.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 10 Ukázka presetu pro FFT analýzu signálu z mikrofону.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 11 Ukázka umístění reproduktoru v bezodrazové komoře.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 12 Příklad výstupu frekvenční analýzy basového reproduktoru</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 13 Schéma metody měření impedanční charakteristiky.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 14 Průběh impedance a hledané frekvence f_1 a f_2 při stanovení TS parametrů[8].....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 15 Schéma měření TS parametrů a impedanční charakteristiky.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 16 Schéma měření reproduktoru v bezodrazové komoře.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 17 Příklad měření zkreslení reproduktoru metodou „krok po kroku“</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 18 Schéma měření směrové charakteristiky.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 19 Schéma zapojení čtyřvodičového měření odporu</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 20 Nastavení kalibrace mikrofónu v programu Brüel&Kjaer PULSE.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 21 Průběh kalibrace</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 22 Výsledková tabulka pro měření citlivosti reproduktoru</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 23 Výsledková tabulka pro měření harmonického zkreslení</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 24 Schéma zapojení měření impedanční charakteristiky a TS parametrů.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 25 Tabulka pro stanovení korekce při měření impedanční charakteristiky</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 27 Výsledková tabulka pro měření TS parametrů</i>	<i>50</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Analogické veličiny [6].....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 2 Přepočítání měřících úrovní napětí.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 3 Nastavení presetu standard_ozv.pls pro měření amplitudové frekvenční charakteristiky.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 4 Frekvence a frekvenční pásma pro měření charakteristické citlivosti.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 5 Nastavení presetu standard_ozv.pls pro měření charakteristické citlivosti reproduktoru.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 6 Nastavení presetu standard_ozv.pls pro měření nelineárního zkreslení reproduktoru.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 7 Rozsah frekvencí při měření harmonického zkreslení.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 8 Nastavení presetu impedance.pls pro měření impedanční charakteristiky.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 9 Nastavení presetu impedance.pls pro zahřívání reproduktoru před měřením.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 10 Nastavení presetu TS-impedance.pls pro měření TS parametrů.....</i>	<i>50</i>

ÚVOD

Určení parametrů reproduktorů je jedním z řady často opakovaných měření prováděných v akustických laboratořích FEL ZČU. Jedná se o soubor měřicích postupů, jejichž výsledkem je komplexní popis chování a vlastností reproduktoru. Měřicí proces probíhá v drobných obměnách vždy stejně a je využitelný při navrhování ozvučovací soustavy, zjišťování parametrů nových prototypů, nebo v automobilovém průmyslu.

V akustických laboratořích FEL ZČU se tato měření provádějí jak v rámci výuky, tak i pro komerční sektor. Velký a trvalý zájem je i o diplomové a bakalářské práce s touto tematikou. Řada měření, která jsou prováděna v rámci komerčních zakázek, jsou rutinního charakteru, měření provádí řada pracovníků včetně některých studentů, kteří v laboratořích dlouhodobě působí. Dodržení přesných postupů měření je z důvodu opakovatelnosti značně důležité, takže vyvstala potřeba vytvoření podrobných návodů k často prováděným a opakovaným měřením.

První, teoretická část práce, si klade za cíl seznámit čtenáře se základními principy a pojmy souvisejícími s reproduktory a uvést je v souvislosti s měřicími metodami.

V druhé části jsou vysvětleny postupy a způsoby měření a výpočtu jednotlivých parametrů v souladu s příslušnými normami.

Kromě teoretické části práce obsahuje i přílohu, která popisuje měřicí procesy krok po kroku. Je cílena výhradně na měření v akustických laboratořích FEL ZČU s využitím konkrétní techniky a přípravků dostupných právě v těchto laboratořích. Je soustředěna na reproduktory používané pro ozvučování automobilů, což je jedno z často opakovaných měření v akustických laboratořích.

1 REPRODUKTORY

Reproduktor funguje na principu elektroakustického měniče, tedy zařízení, jehož vstupním signálem je elektrická veličina (např. napětí) a výstupem akustická (např. akustický tlak), přičemž k přeměně nedochází přímo, ale prostřednictvím tělesa, které se vlivem elektrického signálu pohybuje a tím tvoří akustickou vlnu. Na její šíření má zásadní vliv prostředí, ve kterém se pohybuje.

Ideální reproduktor by měl tyto vlastnosti:

- Nulové zkreslení
- Vyrovnanou a frekvenčně nezávislou charakteristiku
- Dokonale kulovou směrovou charakteristiku
- Neomezenou výchylku membrány
- Vysokou účinnost a citlivost

Reálné reproduktory takových vlastností nedosahují a při návrhu ozvučovacích soustav je třeba řešit mnoho kompromisů mezi jednotlivými vlastnostmi.

1.1 Konstrukce reproduktorů

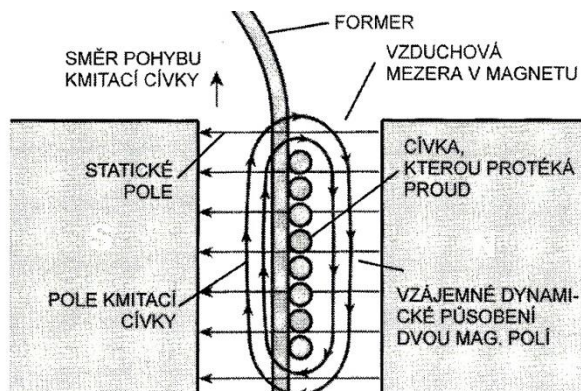
Podle způsobu vyzařování lze rozdělit reproduktory na přímovyzařující, kdy je akustická energie vyzařována kmitající membránou, jenž navazuje bezprostředně na okolní prostředí; a dále na reproduktory nepřímovyzařující, u nichž je mezi kmitající membránou a prostředím vložen ještě další prvek, zvukovod.

Membrána je zpravidla kruhového či eliptického tvaru, vyskytují se membrány obdélníkové, nebo dokonce nepravidelně tvarované, například ve spotřební elektronice. Akustická energie vyzářená membránou o ploše S kmitající ve směru kolmém na její rovinu rychlostí v , je přímo úměrná reálné složce akustického vyzařovacího odporu r_v membrány a kvadrátu objemové rychlosti $w = Sv [m^3s^{-1}]$. [6]

1.1.1 Elektrodynamický reproduktor

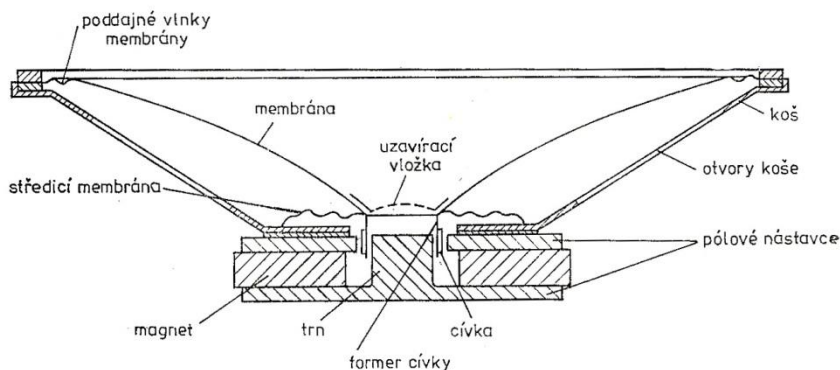
Mezi základní prvky patří membrána, pevně spojená s kmitací cívkou, po obvodu opatřená měkkým okrajem, který jí umožňuje pohybovat se pouze v ose reproduktoru, tomu napomáhá i středící zařízení umístěné v místě spojení cívky s membránou. Membrána je spolu s cívkou uložena v tzv. koši, plastovém, plechovém, či hliníkovém nosiči celé soustavy.

Magnetický obvod se skládá z přední a zadní desky, pólůvých nástavců a samotného magnetu.



Obrázek 1 magnetický obvod elektrodynamickeho reproduktoru[9]

Kmitací cívka je umístěna ve vzduchové mezeře magnetického obvodu ve tvaru mezikruží. V mezeře je magnetické pole, jehož siločáry protínají kolmo vodiče kmitací cívky. Čím vyšší je magnetická indukce ve vzduchové mezeře, tím silnější jsou účinky na pohybové ústrojí reproduktoru.



Obrázek 2 Řez elektrodynamickeým reproduktorem[6]

Membrána koná pístový pohyb, čímž se zřed'uje a zhušť'uje vzduch před i za ní a vzniká akustická vlna. Membrána by tedy měla být pokud možno co nejlehčí a zároveň tuhá, jinak během jejího pohybu dochází k deformacím. Nejčastěji se vyrábějí membrány kuželovité s rozvinutelným (rovným) nebo nerozvinutelným (prohnutým) tvarem. Jako materiál se používají uhlíková vlákna, papír, hliníkové fólie, polypropylen, nebo speciálně upravené textilie. [9]

1.2 Dělení reproduktorů podle frekvenčního rozsahu

Vzhledem k fyzikálním vlastnostem jednotlivých konstrukčních dílů reproduktoru prakticky není možné sestavit reproduktor tak, aby rovnoměrně pokryl celou frekvenční charakteristiku. Příliš velké a hmotné membrány nejsou kvůli setrvačnosti schopny dostatečně rychle kmitat s malou amplitudou při vysokých frekvencích, malé a lehké membrány oproti tomu nemohou dosáhnout dostatečné výchylky pro reprodukci nízkých kmitočtů.

Z toho důvodu se každá sofistikovanější ozvučovací soustava skládá z více reproduktorů, z nichž každý pokrývá (s jistým přesahem) určité frekvenční pásmo. Konstruuje se reproduktory hlubokotónové, určené pro přenos nejnižších frekvencí, středopásmové, jejichž úkolem je kvalitně reprodukovat pásmo 500 Hz - 4000 Hz, tedy pásmo nejdůležitější pro srozumitelnost řeči a vysokotónové pro pokrytí nejvyšších frekvencí (v pásmu 3 kHz - 16 kHz). Kompaktnější variantou jsou širokopásmové reproduktory. Jsou konstruovány buď jako klasické reproduktory s co nejširší frekvenční charakteristikou nebo jako triaxiální reproduktory, které v jedné ose kombinují hlubokotónovou i vysokotónovou jednotku.

2 NÁHRADNÍ OBVOD REPRODUKTORU

2.1 Analogie elektrických a mechanických veličin

Elektrické obvody a mechanické (tedy i akustické) soustavy jsou popsány řadou vztahů mezi veličinami, přičemž mezi těmito veličinami můžeme najít mnoho podobností funkčních i formálních. Pro každý člen soustavy lze najít ekvivalentní elektrický prvek a pro celou soustavu potom sestavit tzv. náhradní elektrický obvod, čehož lze s výhodou použít při její analýze.

S mechanickou soustavou jednáme, jako by se jednalo o obvod elektrický, použijeme metodu analýzy jako u běžného elektrického obvodu a výsledek poté opět převedeme na vlastnost či veličinu původní soustavy. Při řešení můžeme využít všechna pravidla a zákonitosti pro elektrické obvody, tedy například zákon superpozice, Kirchhoffovy zákony, výpočty s komplexními čísly atp.

V následující tabulce jsou vyjádřeny základní mechanické veličiny, jejich ekvivalenty akustické a elektrické:

Tabulka 1 Analogické veličiny [6]

Akustická soustava	Mechanická soustava (posuvná, translační)	Elektrický obvod
Akustický tlak $p = \frac{F}{S}$ $[\text{Pa} = \text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}]$	Síla F $[\text{N} = \text{m kg s}^{-2}]$	Napětí U $[\text{V} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-1}]$
Objemová akustická rychlost $V = S_v = \frac{dY}{dt}$ $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$	Rychlost $v = \frac{dy}{dt}$ $[\text{m s}^{-1}]$	Proud $I = \frac{dq}{dt}$ $[\text{A}]$
Akustický odpor $r_{ak} = \frac{p}{V}$ $[\Omega_{ak} = \text{m}^{-4} \text{kg s}^{-1}]$ Tření plynu na povrchu	Mechanický odpor $r = \frac{F}{v}$ $[\Omega_m = \text{kg s}^{-1}]$	Odpor $R = \frac{U}{I}$ $[\Omega = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}]$

<p>Akustická hmotnost</p> $m_{ak} = \frac{p}{j\omega V}$ <p>[m⁻⁴ kg]</p> <p>Hmotnost kmitajícího sloupce plynu</p>	<p>Hmotnost</p> $m = \frac{F}{j\omega v}$ <p>[kg]</p>	<p>Indukčnost</p> $L = \frac{u}{j\omega i}$ <p>[H = m² kg S⁻² A⁻²]</p>
<p>Akustická poddajnost</p> $c_{ak} = \frac{V}{j\omega p}$ <p>[m⁴ kg⁻¹ s²]</p> <p>Vlastnost uzavřené vzduchové kapsy</p>	<p>Poddajnost</p> $c = \frac{v}{j\omega F}$ <p>[m N⁻¹ = kg⁻¹ s²]</p>	<p>Kapacita</p> $C = \frac{i}{j\omega u}$ <p>[F = m⁻² kg⁻¹ s⁴ A²]</p>
<p>Akustická impedance</p> $Z_{ak} = \frac{p}{V}$ <p>[Ω_{ak} = m⁻⁴ kg s⁻¹]</p>	<p>Mechanická impedance</p> $Z_m = \frac{F}{v}$ <p>[Ω_m = kg s⁻¹]</p>	<p>Impedance</p> $Z = \frac{u}{i}$ <p>[Ω = m² kg s⁻³ A⁻²]</p>
<p>Objemové posunutí</p> $Y = S_Y = \frac{V}{j\omega}$ <p>[m³]</p>	<p>Výchylka</p> $y = \frac{v}{j\omega}$ <p>[m]</p>	<p>Náboj</p> $Q = \frac{i}{j\omega}$ <p>[C = s A]</p>

Mezi veličiny společné ve všech analogiích patří:

čas t [s]

frekvence f [Hz]

Častěji se místo poddajnosti c uvádí tuhost k [N m⁻¹], která je její převrácenou hodnotou ($c = \frac{1}{k}$), a která udává tuhost pružného elementu.

2.1.1 Analogický obvod

Máme-li řešit některá konkrétní uspořádání, můžeme je překreslit na přehlednější schéma soustavy a pomocí výše popsaných analogií stanovíme ekvivalentní analogický obvod, podobný elektrickému, ale při jeho řešení pracujeme s veličinami původní soustavy, které lze převést na náhradní elektrický obvod, kde všechny prvky soustavy jsou nahrazeny elektrickými součástkami.

Při překreslování určité konstrukce do schématu je třeba rozlišovat, jakým způsobem jsou prvky k sobě připojeny, a sledovat, zda na ně působí společná síla, nebo jestli kmitají

společnou rychlostí, či zda je jeden vůči druhému v klidu, popřípadě na ně sice působí stejná síla, ale jeden je „protékán“ jinou rychlostí. Tímto způsobem v analogických obvodech nahrazujeme sériová (společná rychlost) a paralelní (společná síla) zapojení, přičemž platí analogie s Kirchhoffovými zákony.

2.1.2 Mechanické soustavy se soustředěnými a rozprostřenými parametry

U mechanických soustav se soustředěnými parametry jsou jednotlivé elementy nositeli buď kinetické, nebo potenciální energie. Jednotlivé elementy jsou od sebe odděleny, což umožňuje jednodušší popis.

Oproti tomu u prvků mechanické soustavy s rozprostřenými parametry nejsou jednotlivé parametry soustředěny do jednoho bodu.

Při návrhu analogického obvodu reproduktoru uvažujeme soustavu se soustředěnými parametry.

2.2 Analogický obvod elektrodynamického reproduktoru

Proud i procházející kmitací cívku vyvolává sílu $F = Bli$, která působí na mechanický obvod reproduktoru, složený ze sériového zapojení (se společnou rychlostí) mechanické impedance membrány a její vyzařovací akustické impedance.

Impedance membrány závisí na:

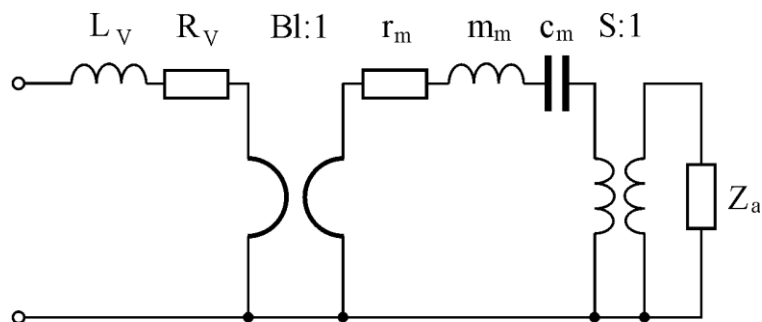
- hmotnosti membrány m_m ,
- poddajnosti jejího uložení c_m ,
- mechanickém odporu r_m .

Další součástí tvoří elektrické části elektroakustického převodníku:

- odpor vinutí kmitací cívky R_V [Ω],
- indukčnost vinutí kmitací cívky L_V [H] a
- odpor nahrazující ztráty v železe magnetického obvodu R_{LZ} [Ω]

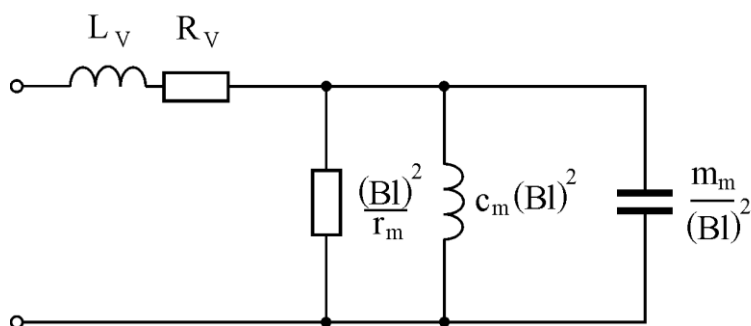
U elektrodynamického reproduktoru je spojení mezi mechanickou a elektrickou částí zprostředkováno silovým působením pole magnetu na vodič, kterým protéká proud. Pokud sestavíme náhradní obvod s oddělenou elektrickou a mechanickou částí, jsou tyto části spojeny prvkem, který se nazývá gyrátor. Jeho funkce je popsány gyrační konstantou Bl , anglicky Force factor.

Analogický obvod reproduktoru s uvažováním vyzařovací akustické impedance potom vypadá takto:



Obrázek 3 Analogický obvod reproduktoru

Na následujícím obrázku jsou všechny prvky převedeny na elektrickou stranu, je zanedbaná velikost vyzařovací akustické impedance membrány.



Obrázek 4 Analogický obvod reproduktoru převedený na elektrickou stranu

Podrobně je takto problematika popsána v [6].

3 PARAMETRY REPRODUKTORŮ

Parametrů charakterizujících reproduktor je mnoho, nejčastěji však sledujeme následující.

3.1 Přenosová charakteristika

Vlastnosti reproduktoru můžeme hodnotit mimo jiné podle kmitočtové charakteristiky, což je grafické znázornění závislosti citlivosti na frekvenci.

3.2 Amplitudová frekvenční charakteristika

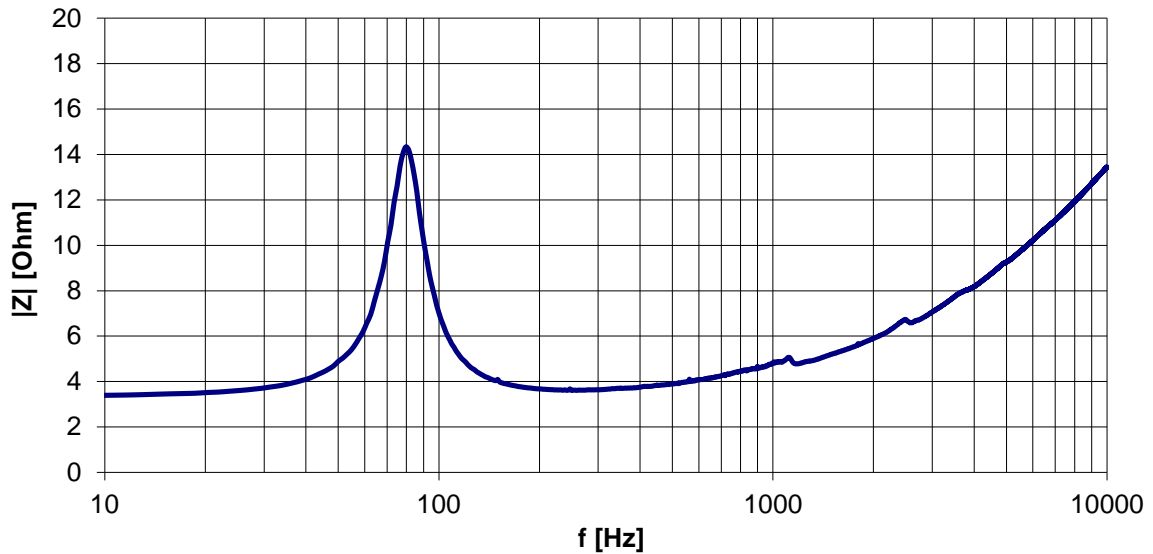
Amplitudová frekvenční charakteristika reproduktoru je frekvenční závislost hladiny akustického tlaku měřeného mikrofonom ve vzdálenosti 1 m při buzení reproduktoru signálem o výkonu 1 W.

Jak bylo řečeno v kapitole 1, ideální reproduktor by měl mít amplitudovou charakteristiku plochou a na všech frekvencích stejnou. Kvalitní reproduktor by se měl takovéto charakteristice alespoň blížit. Udává se v logaritmickém měřítku, a její tvar nám udává frekvenční pásmo nejvhodnější pro daný reproduktor, v tomto pásmu je citlivost relativně vysoká a nijak výrazně se nemění. Toto frekvenční pásmo je vymezeno horní a dolní mezí, pro kterou frekvenční charakteristika reproduktoru není o více než 10 dB nižší, než je průměrná hodnota hladiny akustického tlaku v oktávovém pásmu v oblasti nejvyšší citlivosti.

3.3 Impedanční frekvenční charakteristika

Nominální hodnota impedance reproduktoru nese pouze informaci o tom, v jakých hodnotách se skutečná impedance bude pohybovat. Impedance je frekvenčně závislá, komplexního charakteru. Impedanční křivka reprezentuje absolutní hodnotu impedance jako funkci frekvence. Při nulové frekvenci se projevuje pouze činný odpor kmitací cívky, s rostoucí frekvencí sledujeme náhlý nárůst impedance, na jehož vrcholu nastává rezonance, za ní následuje opět prudký pokles. Následuje oblast, kde se impedance v závislosti na frekvenci nemění. V této oblasti se stanovuje nominální hodnota impedance, v tomto frekvenčním rozsahu je také vhodné provozní pásmo pro reproduktor. Od určité frekvence se hodnota impedance vlivem indukčnosti kmitací cívky zvyšuje.

Tvar a poloha rezonančního vrcholu se mění v závislosti na uložení a zástavbě reproduktoru.



Obrázek 5 Impedanční charakteristika basového reproduktoru.

3.4 Rezonanční frekvence

Normou [5] je definovaná jako frekvence, na které absolutní modul impedance (absolutní hodnota) dosahuje svého prvního hlavního maxima na rostoucí frekvenční stupnici. Aby měl údaj o rezonanční frekvenci vypovídací hodnotu, je nutné uvést i způsob umístění reproduktoru v prostoru, způsob měření a specifikaci použité ozvučnice.

Rezonanční frekvence je jedním z nejdůležitějších parametrů při hodnocení vlastností reproduktorů a stanovení použitelného frekvenčního pásma pro daný reproduktor.

3.5 TS parametry

Označení TS vzniklo jako zkratka jmen Thiele a Small, průkopníků v oblasti analýzy reproduktorů, působících v polovině 20. století na universitě v Sydney. Jedná se o soubor veličin, kterými popisujeme vlastnosti reproduktoru jako mechanicko-elektrické soustavy a určujeme jeho chování v oblasti nízkých frekvencí, čehož můžeme s výhodou využít při návrhu ozvučnice.

Mezi TS parametry patří:

- f_s – rezonanční frekvence reproduktoru
- R_e – činný odpor cívky reproduktoru
- Q_{ms} – mechanický činitel jakosti, zahrnuje v sobě vliv mechanických ztrát pohyblivých částí reproduktoru
- Q_{es} – elektrický činitel jakosti, zahrnuje vliv elektrických ztrát v kmitací cívce

- Q_{ts} – celkový činitel jakosti
- L_e – indukčnost kmitací cívky
- V_{as} – ekvivalentní objem reproduktoru
- m_{ms} – celková kmitající hmotnost reproduktoru
- c_{ms} – poddajnost kmitacího systému
- Bl – grační konstanta, udává sílu, nebo také magnetickou účinnost soustrojí kmitací cívka- magnetický obvod. Jeho velikost je součinem magnetické indukce a délky navinutého vodiče kmitací cívky
- S_d – aktivní plocha membrány - buď zadána výrobcem, nebo změřena a dopočítána pomocí vzorce $S = \pi \left(r + \frac{1}{3} e \right)^2$, kde e je šířka mezikruží tvořeného vlnkou závěsu membrány.
- X_{max} – maximální lineární výchylka

3.6 Činitel jakosti Q

V souvislosti s reproduktory se zpravidla udávají tři činitelé jakosti:

- Q_{ms} - mechanický činitel jakosti, který v sobě zahrnuje vliv ztrát pohyblivých částí reproduktoru
- Q_{es} - elektrický činitel jakosti, jenž zahrnuje elektrické ztráty vlivem odporu vinutí kmitací cívky
- Q_{ts} - celkový činitel jakosti

Spolu s ekvivalentním objemem V_{as} a rezonančním kmitočtem f_r dobře definují chování reproduktoru na nízkých frekvencích. [9]

3.7 Citlivost

Účinnost přeměny elektrické energie ve zvuk je u reproduktorů velmi malá, většina energie se přeměňuje na teplo. Jako každá jiná energetická účinnost může být vyjádřena procenty, u reproduktorů obvykle používáme tzv. charakteristickou citlivost, celkovou hladinu akustického tlaku měřenou v akustické ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m od referenčního bodu při standardním příkonu 1 W. Budicím signálem je filtrovaný růžový šum o stanovené šířce pásma. Vyjadřuje se v hladině charakteristické citlivosti nad referenční hladinou $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. [6]

Ve starší literatuře lze najít citlivost udanou jako hladinu akustického tlaku pro harmonický signál.

Reproduktory pro spotřební elektroniku mají citlivost zhruba 84 dB - 94 dB, vysoce výkonné reproduktory pro ozvučování velkých ploch dosahují citlivosti nad 105 dB. Při běžné hudební produkci využíváme většinu provozní doby jen velmi malou část výkonu, zbylá část je však nutná pro věrnou reprodukci krátkodobých špiček.

3.8 Zkreslení

O zkreslení hovoříme tehdy, obsahují-li složky výstupního signálu frekvence, které budicí signál neobsahuje. Jedná se o vyšší harmonické složky, stejnosměrnou složku, zkreslení vzniklé modulací signálu a další. Souhrn všech nepatřičných složek se nazývá chybový signál a je součástí frekvenční charakteristiky.

3.8.1 Harmonické zkreslení

Nově vznikají signály o frekvencích, jejichž velikostmi jsou celočíselné násobky nebo podíly původní budicí frekvence.

Harmonické zkreslení se kvantitativně popisuje pomocí činitele harmonického zkreslení. Je to poměr efektivní hodnoty výstupního akustického tlaku všech vyšších harmonických složek (u reproduktorů se nejvíce projevuje druhá a třetí harmonická) k průměrné hodnotě první harmonické složky v daném frekvenčním pásmu. Závisí na frekvenci vstupního signálu a jeho amplitudě, s amplitudou jeho velikost roste.

Jeho velikost uvádíme v % a určujeme podle vzorce

$$d_t = \frac{\sqrt{p_{2f}^2 + p_{3f}^2 + \dots + p_{nf}^2}}{p_t} 100 [\%]$$

Mechanismus vzniku zkreslení je způsoben mimo jiné následujícími vlivy:

- Závěs kmitacího systému se chová nelineárně a jeho tuhost s rostoucí výchylkou roste.
- Při nadměrném vychýlení z rovnovážné polohy se kmitací cívka dostává mimo magnetické pole v mezeře magnetického obvodu, čímž se snižuje Bl faktor. Ten závisí také na velikosti proudu protékající kmitací cívku. Přesáhne-li výchylka membrány svoji lineární část, vzniká zkreslení třetí harmonickou složkou.
- Vznikem vířivých proudů indukovaných v pólových nastavcích proudem protékající kmitací cívku. [7]
- Deformací membrány při kmitání.

Při měření zkreslení sledujeme pouze složky do páté harmonické, na vyšších frekvencích ještě méně, neboť se vyšší harmonické dostávají mimo slyšitelné pásmo.

3.8.2 Intermodulační zkreslení

Speciálním případem zkreslení je takzvané zkreslení intermodulační. Projeví se, přivedeme-li na svorky reproduktoru signál o velmi nízkém kmitočtu, jenž způsobí velkou výchylku membrány, a zároveň s ním signál o výrazně vyšší frekvenci. Pokud má kmitací cívka tak velkou amplitudu, že se výrazně zvýší BI faktor, vznikne rušivá amplitudová modulace signálu o větší frekvenci, která se projeví vznikem signálů o součtových a rozdílových frekvencích signálů původních a jejich celých násobků. [7]

Intermodulační zkreslení 2. řádu stanovíme ze vzorce:

$$d_2 = \frac{p_{(f_2-f_1)} + p_{(f_2+f_1)}}{p_{f_2}} 100 \%$$

$$L_{d2} = 20 \log \left(\frac{d_2}{100} \right) [\text{dB}]$$

A obdobným způsobem i intermodulační zkreslení 3. řádu:

$$d_3 = \frac{p_{(f_2-2f_1)} + p_{(f_2+2f_1)}}{p_{f_2}} 100 \%$$

$$L_{d3} = 20 \log \left(\frac{d_3}{100} \right) [\text{dB}]$$

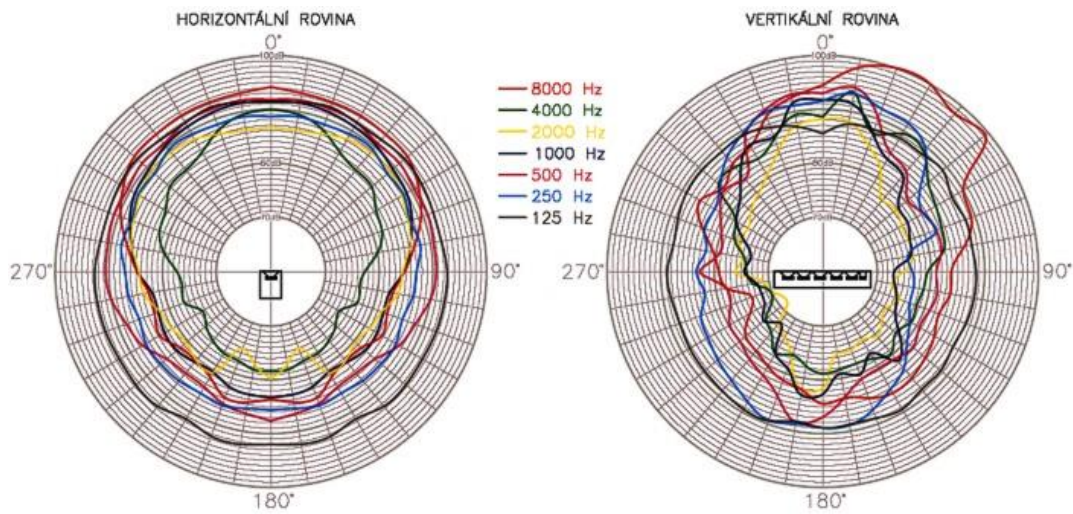
3.8.3 Charakteristické intermodulační zkreslení n-tého řádu

ČSN EN 60268-5 jej definuje jako intermodulační zkreslení vyjádřené pomocí akustického tlaku v daném frekvenčním pásmu s vyloučením frekvence f_1 . Postup měření je stejný jako v případě intermodulačního zkreslení s tím rozdílem, že velikost akustického tlaku p_{f_2} je nahrazena celkovým akustickým tlakem daného frekvenčního pásma, měřeného standardním postupem pro stanovení citlivosti reproduktoru. [1]

3.9 Směrová charakteristika

Reproduktor nevyzařuje akustickou energii ve všech směrech stejně. O takzvané směrovosti reproduktoru nás informuje směrová charakteristika. Vyjadřuje závislost vyzařování na směru. Pro vykreslení se používají polární souřadnice. Směrová charakteristika reproduktoru se udává jako soubor charakteristik pro jednotlivé frekvence

nebo frekvenční pásma (přednostně oktávová, třetinooktávová), nebo jako soubor frekvenčních charakteristik pro různé úhly vzhledem k referenční ose.



Obrázek 6 Ukázka směrové charakteristiky reproduktoru [3]

Pro číselné vyjádření směrové charakteristiky zavádíme veličinu zvanou činitel směrovosti D , který udává poměr výkonu přeneseného v ose vůči bočním směrům. Je to poměr intenzity zvuku měřené ve zvoleném bodě k intenzitě zvuku, jakou by ve stejném místě vyvolal bodový zdroj stejného akustického výkonu jako zkoušený reproduktor.

Čím je vyšší činitel směrovosti, tím více reproduktor vyzařuje ve směru referenční osy a méně do boků.

Činitel směrovosti vyjádřený v dB se nazývá index směrovosti a určuje se jako rozdíl mezi hladinou tlaku v daném směru vyvolaném měřeným zdrojem zvuku a průměrné hladiny akustického tlaku, kterou by vyvolal všesměrový zdroj stejného výkonu.

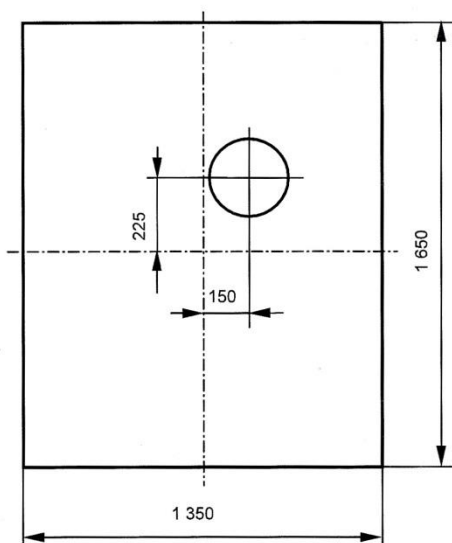
$$I_D = 10 \log D$$

3.10 Vliv zástavby

Český jazyk vnáší do problematiky označení reproduktorů poněkud zmatek, neboť termínu reproduktor lze užít jak pro označení samotného elektroakustického měniče, tak i pro celé zařízení sestávajícího z několika měničů umístěných do nějakého celku.

Umístění měničů má zásadní vliv na jejich chování a chování celé soustavy, zejména pro některé signály. Skříňka, deska, či jiné zařízení pro uložení reproduktoru se nazývá ozvučnice. Akustická vlna je vyzařována přední i zadní stranou membrány, ovšem s opačnou fází. Pokud se tyto vlny setkají, dochází (především na úrovni nízkých kmitočtů, kdy jsou rozměry membrány menší, než vlnová délka signálu) k jejich vzájemnému rušení.

Tento jev se někdy nazývá akustický zkrat. Zamezení akustického zkratu dosahujeme právě použitím ozvučnice.

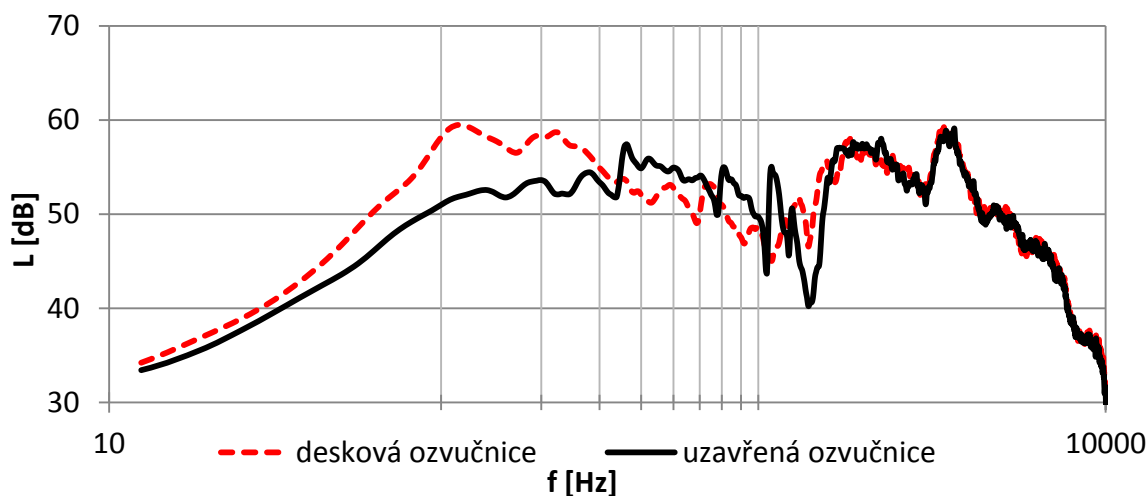


Obrázek 7 Rozměry deskové ozvučnice dle ČSN EN 60268-5 [1]

Nejjednodušším provedením je ozvučnice desková, v ideálním případě nekonečně velká a pevná, která akusticky odděluje přední a zadní stranu membrány. Nekonečně velká deska pochopitelně vyrobit nelze, reálné deskové ozvučnice správně fungují teprve od určité frekvence výše (podle velikosti ozvučnice). Deskové ozvučnice se obvykle v praxi nepoužívají, nejčastěji pro měřicí účely (Sýkora, 1998).

Běžněji se používá ozvučnice skříňová, do níž je reproduktor (či více reproduktorů) vestavěn tak, že přední vlna se šíří do vnějšího prostoru a zadní je v ideálním případě dokonale pohlcena stěnami skříně a její akustická energie je přeměněna na teplo.

Pokud uzavřeme reproduktor do ozvučnice, je třeba počítat se změnou jeho chování. Závěs membrány se bude chovat, jako by byl tužší a k dosažení stejné výchylky bude potřebovat více síly. To má za následek posun rezonanční frekvence výš oproti variantě bez zástavby.

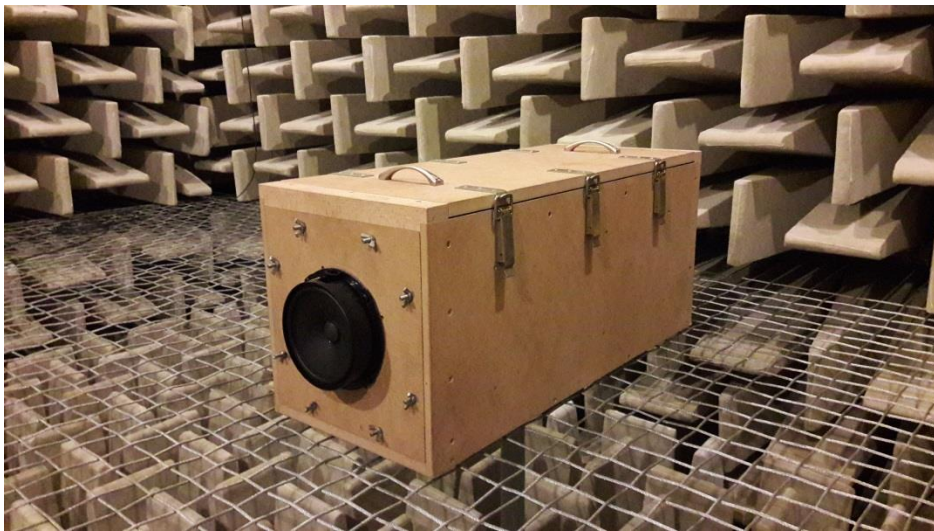


Obrázek 8 Změna frekvenční charakteristiky vlivem zástavby u basového reproduktoru pro automobilový průmysl

Vzhledem k tomu, že se parametry reproduktorů zpravidla neudávají v podobě ekvivalentních elektrických veličin, byl zaveden tzv. ekvivalentní objem V_{as} [m³]. Udává objem vzduchu v uzavřené ozvučnici, který by měl stejnou poddajnost jako hodnota c_m daného reproduktoru. Jeho velikost se pohybuje v jednotkách až stovkách litrů. Změnu rezonanční frekvence reproduktoru můžeme pomocí objemu ozvučnice spočítat takto:

$$f_{rb} = f_r \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_b}}$$

Kde V_b je vnitřní objem ozvučnice, V_{as} je ekvivalentní objem [8].



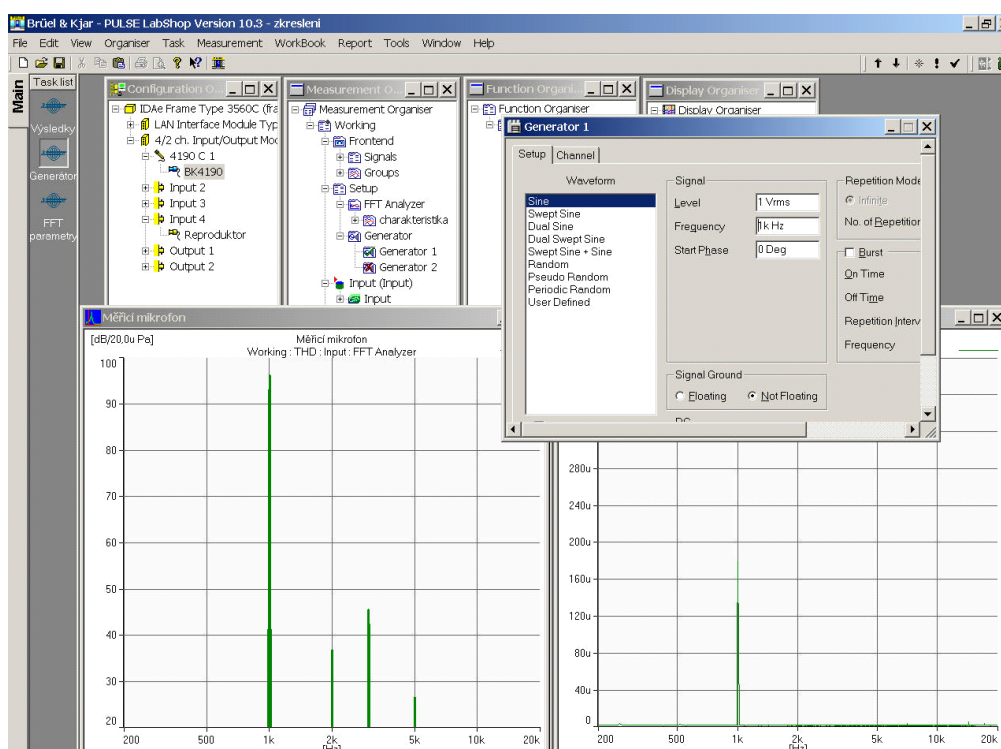
Obrázek 9 Uzavřená ozvučnice v bezodrazové komoře FEL

4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ REPRODUKTORU

4.1 Technické vybavení používané pro měření parametrů reproduktorů

Akustické laboratoře jsou vybaveny analyzátozem firmy Brüel&Kjaer PULSE 3560C, k dispozici jsou i měřicí mikrofony pro volné akustické pole stejné firmy, typu BK 4190. Analyzátor je vybavený vstupně / výstupní jednotkou BK 3109 v konfiguraci 4 vstupů a 2 výstupů. Vstupy umožňují připojení měřicích mikrofonů s variabilními možnostmi napájení (200 V nebo CCLD - napájení zdrojem konstantního proudu). Výstupy je možné využít jako výstupy programovatelného signálového generátoru. K dispozici je kromě periodických signálů (harmonický, obdélník, trojúhelník) i šumový signál (bílý nebo růžový), rozmítaný harmonický signál nebo uživatelem definovaný signál importovaný ve formátu *.wav.

Řídící software PULSE LabShop umožňuje realizovat variabilní konfigurace různých metod analýzy. Pro měření parametrů reproduktorů se nejčastěji využívá frekvenční analýza na principu FFT (s různým nastavením parametrů) nebo 1/3-oktávová analýza. Jednotlivé konfigurace měření jsou uloženy v samostatných Presetech. Výpočty a zobrazení výsledků jsou obvykle realizovány v šablonách v programu MS Excel, do kterých jsou data z Presetu PULSE získávána pomocí vazby OLE.



Obrázek 10 Ukázka presetu pro FFT analýzu signálu z mikrofónu.

4.2 Podmínky měření

Pro jednotnost při měření jsou normou (ČSN EN 60268-5) stanoveny postupy, jakými jsou jednotlivá zařízení měřena. Kromě normou stanovených podmínek by ke každému zařízení měla být k dispozici specifikace, která udává hodnoty a podmínky, které nejsou předmětem měření, nicméně jsou nezbytné pro měření ostatních charakteristik.

Mezi tyto výrobcem udávané hodnoty patří:

- Jmenovitá impedance - hodnota elektrického odporu, kterým nahrazujeme reproduktor při návrhu vhodného zesilovače. Nejnižší hodnota elektrického odporu v celém jmenovitém frekvenčním pásmu by neměla klesnout pod 80 % jmenovité impedance.
- Jmenovitá hodnota střídavého napětí / příkonu.
- Jmenovitá hodnota šumového napětí / příkonu.
- Frekvenční rozsah.
- Referenční plocha - plocha, z níž vystupuje akustická vlna z reproduktoru.
- Referenční bod - leží v průsečíku akustické osy a referenční plochy reproduktoru.
- Referenční osa - u osově symetrických reproduktorů je shodná s geometrickou osou, u ostatních určena výrobcem.

Bohužel se nezdá, že některé z těchto hodnot jsou udány nepřesně, nejasně, nebo dokonce vůbec.

4.2.1 Upevnění reproduktorů

- V deskové nebo uzavřené ozvučnici, případně jiném, specifikovaném uložení
- Ve volném poli bez ozvučnice
- V poloodrazovém poli, v jedné rovině s odrazovou plochou

4.2.2 Akustické pole

Akustická měření jsou prováděna v jednom ze tří specifikovaných prostředí. Volba akustického prostředí závisí na typu prováděného měření.

4.2.3 Volné zvukové pole

Akustická vlna bodového zdroje zvuku se ve volném akustickém poli šíří pomocí kulových vlnoploch. Akustický výkon P [W] se s rostoucí vzdáleností r [m] od zdroje rozprostírá na stále větší plochu $S=4\pi r^2$ [m²]. Za akustické volné pole je považováno takové,

kteřé tuto podmínku splňuje s přesností alespoň $\pm 10\%$. Tyto vlastnosti by měly být zachovány v celém frekvenčním rozsahu.

Pro simulaci šíření a měření zvuku v otevřeném prostoru v laboratorních podmínkách se používá speciálních bezodrazových komor, jejichž stěny odrážejí pouze minimum zvukových vln. Tzv. simulované podmínky volného akustického pole však lze vytvořit i v dostatečně velké místnosti bez zvukových překážek, kde lze měřit signály dostatečně krátké na to, aby zvuk šířený přímou cestou dorazil celý k měřicímu mikrofonu dříve, než zvuk odražený. K výsledkům měření by měla být připojena i informace o poloze mikrofonu a zdroje zvuku v prostoru a nejdelší záchytná doba pro signál v daném prostředí.

4.2.4 Volné zvukové pole v poloprostoru

Bodový zdroj zvuku je umístěn do odrazové roviny dostatečné velikosti, akustický tlak v poloodrazovém poli klesá se vzdáleností od zdroje stejným způsobem, jako v případě volného pole.

4.2.5 Pozice vůči měřicímu mikrofonu

Pro měření v bezodrazovém a poloodrazovém prostoru umísťujeme mikrofon do vzdálenosti 0,5 m, 1 m, nebo celých násobků metru od reproduktoru, a výsledky vztahujeme ke vzdálenosti 1 m. Mikrofon umísťujeme do osy reproduktoru. V bezodrazové komoře je třeba vzít v potaz odrazy od mikrofonních stojanů, podpěr reproduktoru, pochozí sítě a jiných předmětů umístěných v komoře. Chyba způsobená přítomností těchto předmětů by neměla být větší než 0,5 dB v celém měřeném frekvenčním pásmu.



Obrázek 11 Ukázka umístění reproduktoru v bezodrazové komoře.

Při měření reproduktorových soustav, kde se vyskytuje dva a více reproduktorů pracujících ve stejném frekvenčním pásmu nastává problém s interferencí vlnění v měřicím bodě. V takových případech je třeba zvolit měřicí bod tak, aby byl tento jev co nejvíce potlačen. [1]

4.2.6 Testovací signály

Akustická měření jsou prováděna následujícími normovanými signály, jejichž volba závisí na typu měření:

- Harmonický signál – jeho velikost by při žádné frekvenci neměla překonat hodnotu jmenovitého napětí.
- Širokopásmový šum – crest faktor (poměr dlouhodobé a špičkové hodnoty) by měl být mezi 3 a 4.
- Úzkopásmový šum – udržujeme konstantní relativní šířku pásma, obvykle o velikosti 1/3 oktávy, pro měření používáme generátor růžového šumu.
- Impuls – krátkodobé signály o šířce pásma alespoň v oblasti zájmu měření. V poměru k velikosti amplitudy nesou relativně malou energii.

4.2.7 Nežádoucí akustický a elektrický šum

Přítomnost šumu má negativní vliv na přesnost měření zejména signálů nízkých úrovní. Pokud je odstup měřeného signálu od hladiny šumu menší než 10 dB, považujeme naměřené hodnoty za neplatné. [4] Při měření v akustických laboratořích se běžně pracuje s výrazně větším odstupem šumu od signálu.

4.2.8 Klimatické podmínky

Měření smí být prováděno při jakékoli kombinaci teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu v následujících mezích (není-li uvedeno jinak výrobcem):

- Okolní teplota 15 °C až 35 °C, přednostně 20 °C
- Relativní vlhkost vzduchu 25 % až 75 %
- Tlak vzduchu 86 kPa až 106 kPa [4]

4.3 Příprava reproduktoru k měření

Nové reproduktory je třeba před měřením rozehrát, neboť v něm vlivem pohybu membrány nastávají trvalé změny oproti výchozímu stavu z výroby. Doporučuje se připravit reproduktor k měření použitím šumového signálu o jmenovitém šumovém napětí

(mělo by být zadáno výrobcem) po dobu nejméně jedné hodiny. Po této době by měl reproduktor projít ještě dobou zotavení, trvající taktéž alespoň jednu hodinu, během této doby je odpojen. [5]

Velikost amplitudy budicího signálu můžeme odhadnout i subjektivně, pohledem na výchylku membrány. Doporučuje se signál frekvenčně zdola omezit, aby nedošlo k příliš velkému vychýlení membrány.

4.4 Kalibrace

Každé měření začíná kalibrací měřicího řetězce. Měřicí řetězec bývá kalibrován na konstantní úroveň akustického tlaku 1 Pa při 1 kHz harmonického signálu.

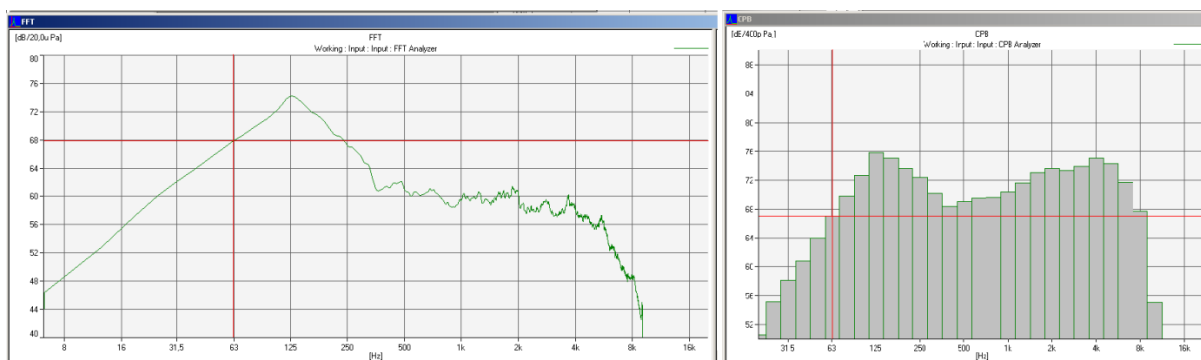
4.5 Měření přenosových charakteristik

4.5.1 Amplitudová frekvenční charakteristika

Měří se amplituda a fáze akustického tlaku jako funkce frekvence při přivedeném specifikovaném napětí. Použitá úroveň signálu musí zajistit, aby výsledky nebyly ovlivněny nelinearitou. Standardně se používá úroveň 1 V. Amplituda akustického tlaku se vyjadřuje jako ekvivalentní hladina akustického tlaku.

Reproduktor pracuje v normálních podmínkách, je napájen zkušebním signálem, jehož šířka pásma dosahuje buď celé šířky slyšitelného pásma, tedy 20 Hz - 20 kHz nebo je frekvenčně omezená oblastí použití daného reproduktoru. Proces je opakován a výsledky průměrovány. Vyjádření hladiny akustického tlaku jako funkce kmitočtu se provádí buď Fourierovou transformací nebo v 1/n – oktávových pásmech. Velikost signálu je vyjádřena ekvivalentní hladinou akustického tlaku pro vstupní výkon 1 W. [5]

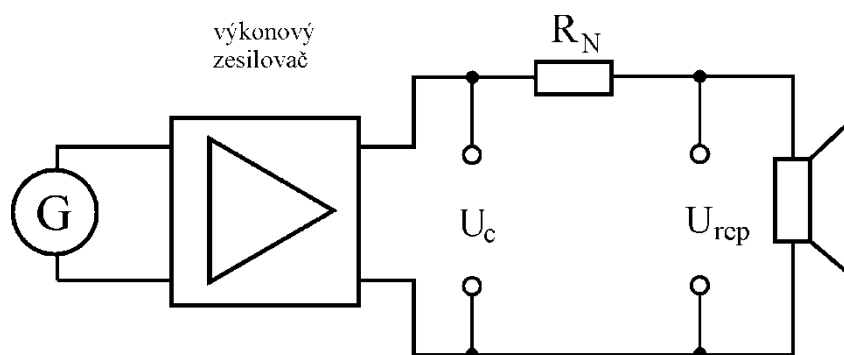
V laboratořích FEL se jako generátor signálu používá výstup 1 ze systému PULSE, výstupním signálem je bílý šum se šířkou pásma 25,6 kHz.



Obrázek 12 Příklad výstupu frekvenční analýzy basového reproduktoru

4.5.2 Impedanční frekvenční charakteristika

Schéma měření pro určení impedanční charakteristiky je na obrázku 13. Měření provádíme ve frekvenčním rozsahu 20 Hz – 20 kHz, případně je použita menší šířka pásma. Výsledky znázorňujeme graficky coby velikost impedance jako funkci frekvence při známém napětí nebo proudu.



Obrázek 13 Schéma metody měření impedanční charakteristiky

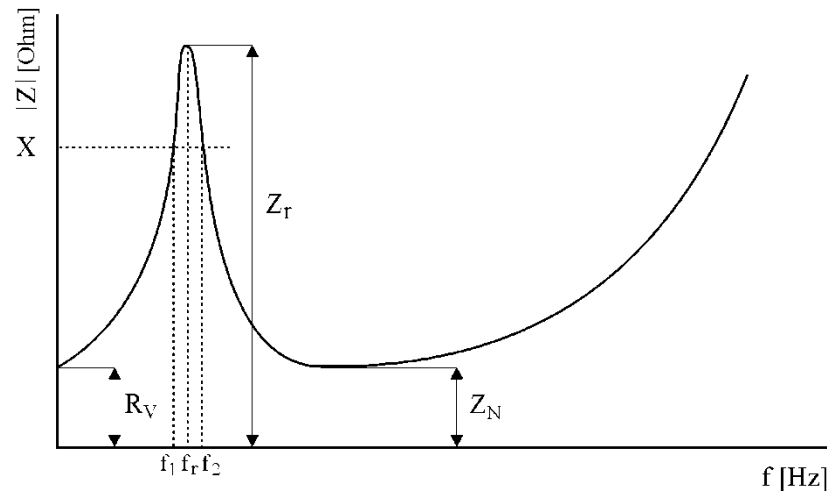
4.6 Měření TS parametrů

Měření TS parametrů probíhá podobně a při stejném zapojení jako měření impedanční charakteristiky, měříme šumovým nebo rozmítaným harmonickým (sweep) signálem v kmitočtovém rozsahu 30 - 300 Hz (měří se pouze basové reproduktory). Během měření není nutné reproduktor umísťovat do bezodrazové komory, je ale třeba položit jej vodorovně na měkkou, pružnou tlumicí podložku, membránou vzhůru. To je z důvodu minimalizace vlivu vibrací z okolí.

Nejdříve je třeba přesně změřit stejnosměrný odpor kmitací cívky R_V [Ω].

Pro zajištění opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření ještě před zahájením vlastního měření provedeme zahřátí reproduktoru, a to přivedením signálu růžového šumu o výkonu $\frac{1}{4}$ jmenovitého výkonu reproduktoru po dobu 3 minut.

Následně provedeme analýzu a výsledek vyneseme do grafu, čímž získáme křivku podobnou obrázku 14.



Obrázek 14 Průběh impedance a hledané frekvence f_1 a f_2 při stanovení TS parametrů [8]

Z něj určíme hodnotu rezonanční frekvence f_r [Hz] a maximální hodnotu impedance Z_r [Ω], které reproduktor dosáhne právě na této frekvenci. Dále zjistíme hodnotu X [Ω] pomocí vztahu

$$X = \sqrt{\frac{Z_r}{R_V}}$$

A z naměřených hodnot odečteme hodnoty f_1 a f_2 v okolí rezonanční frekvence, pro které je absolutní hodnota impedance rovna X . (Obrázek 14). Z nich vypočteme pomocnou veličinu F , která je dána vztahem:

$$F = \sqrt{\frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 - f_2}}$$

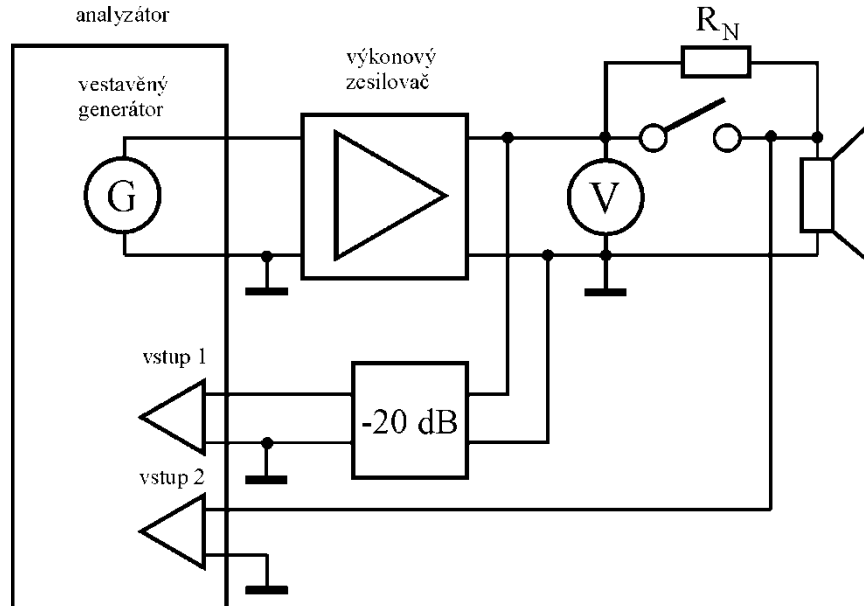
Z nichž můžeme vypočítat tři důležité parametry reproduktoru:

- Celkový činitel jakosti $Q_{ts} = \frac{F}{X}$ [-]
- Mechanický činitel jakosti $Q_m = F \cdot X$ [-]
- Elektrický činitel jakosti $Q_{ts} = \frac{F \cdot X}{X^2 - 1}$ [-] [8]

K tomu, abychom určili poddajnost kmitacího systému a ekvivalentní objem reproduktoru V_{as} , je třeba porovnávat dva stavy reproduktoru. To se řeší nejčastěji přidáním externí hmotnosti o známé velikosti na membránu a opakováním měření. Přídavná hmotnost může být např. přesně zvážený kousek modelovací hmoty v podobě

válečku stočeného a lehce přitlačeného k membráně okolo kaloty, difuzoru, nebo jiné středové části membrány.

Při měření v akustických laboratořích FEL se pro měření impedanční charakteristiky i TS parametrů používá toto zapojení:

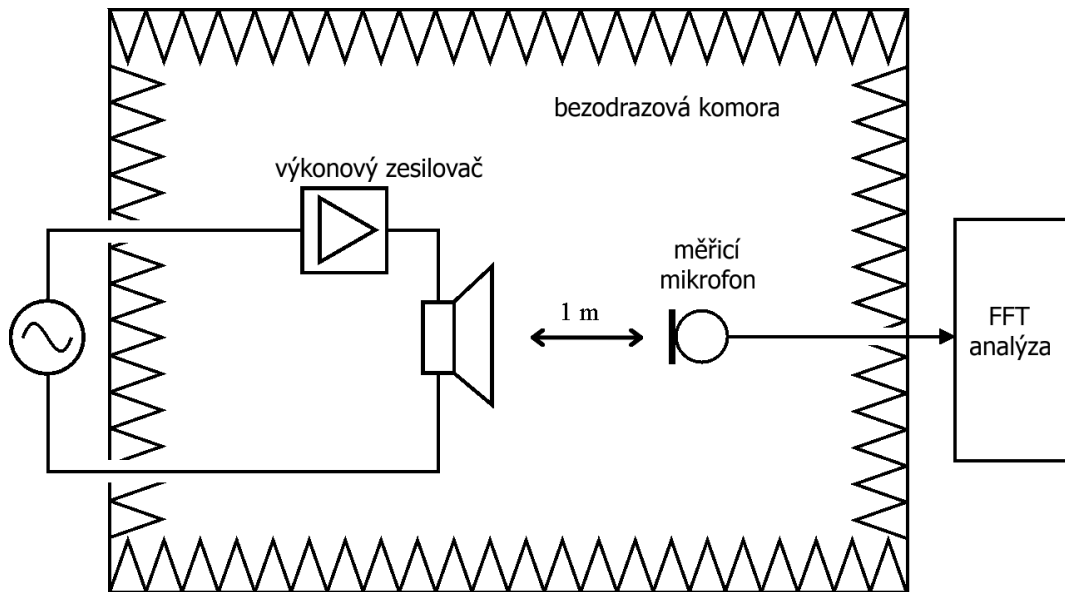


Obrázek 15 Schéma měření TS parametrů a impedanční charakteristiky

Do obvodu je zařazen útlumový článek 20 dB. Polohou přepínače volíme, zda je rozpojen (na přepínači označeno modře), či zkratován (označeno červeně). Je to z toho důvodu, že na vstup analyzátoru B&K Pulse smí být připojeno napětí maximálně 7 V, přičemž při zahřívání reproduktoru často potřebujeme napětí vyšší. Při měření je třeba důsledně kontrolovat polohu přepínače.

4.7 Měření citlivosti

Reproductor pracuje ve volném poli, nebo ve volném poli v poloprostoru (v rovině s odrazným povrchem), je napájen filtrovaným růžovým šumem přes pásmovou propust o strmosti alespoň 24 dB/oktávu, která omezuje šířku pásma signálu. Je možné použít aproximaci tohoto pásma na n 1/3 - oktávních pásem. Napájecí napětí je v každém 1/3 - oktávním pásmu rovno U_p/n . Napájecí napětí U_p odpovídá příkonu 1 W. Akustický tlak je měřen ve vzdálenosti 1 m od referenčního bodu v referenční ose. Je-li měřen v jiné vzdálenosti, výsledky musí být vztaheny ke vzdálenosti 1 m.



Obrázek 16 Schéma měření reproduktoru v bezodrazové komoře

4.8 Měření harmonického zkreslení

Měření provádíme v deskové i uzavřené ozvučnici, měříme harmonickým signálem s konstantní úrovní a mění se frekvencí a sledujeme rozdíl mezi signálem vstupním a výstupním.

Měřicí mikrofon je umístěn do vzdálenosti 1 m od referenčního bodu v ose reproduktoru, v případě jiného umístění jsou výsledky vztaženy k této pozici. [1]

Zkreslení můžeme měřit dvěma metodami:

- Rozmítaným harmonickým signálem - výsledek interpretujeme graficky jako velikost zkreslení v dB coby funkce frekvence. Celkové harmonické zkreslení určujeme vzorcem

$$L_{dt} = 20 \log \frac{d_t}{100} [dB]$$

Harmonické zkreslení n -tého řádu je určeno podle vztahu:

$$d_n = \frac{P_{nf}}{P_t} \cdot 100 [\%]$$

- Měřením krok po kroku - postupným proměřováním jednotlivých referenčních frekvencí. Výsledek vyjadřujeme v procentech.

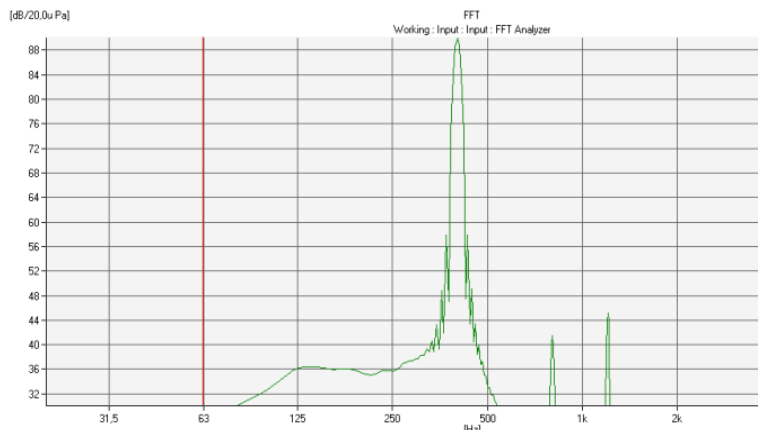
$$d_t = \frac{\sqrt{p_{2f}^2 + p_{3f}^2 + \dots + p_{nf}^2}}{p_t} 100 [\%]$$

Kde d_t ... celkové zkreslení

p_{nf} ... akustický tlak jednotlivých harmonických

p_t ... celkový akustický tlak [1]

Naměřená křivka by měla být pokud možno hladká, se zřejmým vrcholem.



Obrázek 17 Příklad měření zkreslení reproduktoru metodou „krok po kroku“

Při měření v laboratořích FEL slouží analyzátor PULSE jako generátor harmonického signálu o frekvenci f_1 , kterou je nutné ručně nastavit. Preset dále řeší FFT analýzu vstupního signálu z měřicího mikrofону, kdy parametry FFT jsou pevně zvoleny na 3200 spektrálních čar při šířce pásma 20 kHz a 10 průměrech spekter.

Preset i následné výpočty v programu MS Excel umožňují určit jak celkové harmonické zkreslení, tak harmonické zkreslení 2. a 3. řádu na dané frekvenci.

4.9 Měření intermodulačního zkreslení

Měření intermodulačního zkreslení je specifikováno jako poměr aritmetického součtu efektivních hodnot akustického tlaku odpovídajícího jednotlivým složkám zkreslení na frekvencích [1]

Reproduktor je umístěn ve volném poli nebo poloprostoru, na jeho vstup jsou přivedeny dva sinusové signály s poměrem amplitud 4:1 o frekvencích velikosti $f_1 < f_2/8$. Měřicí mikrofón je umístěn ve vzdálenosti 1 m od referenčního bodu v ose reproduktoru, k němu je připojen frekvenční analyzátor. Měří se jednak složky intermodulačního zkreslení,

tak zkreslení Dopplerovým jevem. Pro rozlišení těchto dvou měření je nutné i fázové měření. Z výsledků uvažujeme pouze složky o frekvencích $f_1 \pm f_2$ a $f_2 \pm 2f_1$.

Výsledek reprezentujeme graficky jako funkci referenčního napětí (efektivní hodnota sinusového napětí se stejnou velikostí amplitudy špička-špička), jako má zkušební signál. K výsledkům je přiložen i údaj o velikosti amplitudy a frekvenci měřených signálů a způsobu uložení reproduktoru.

4.10 Měření směrové charakteristiky

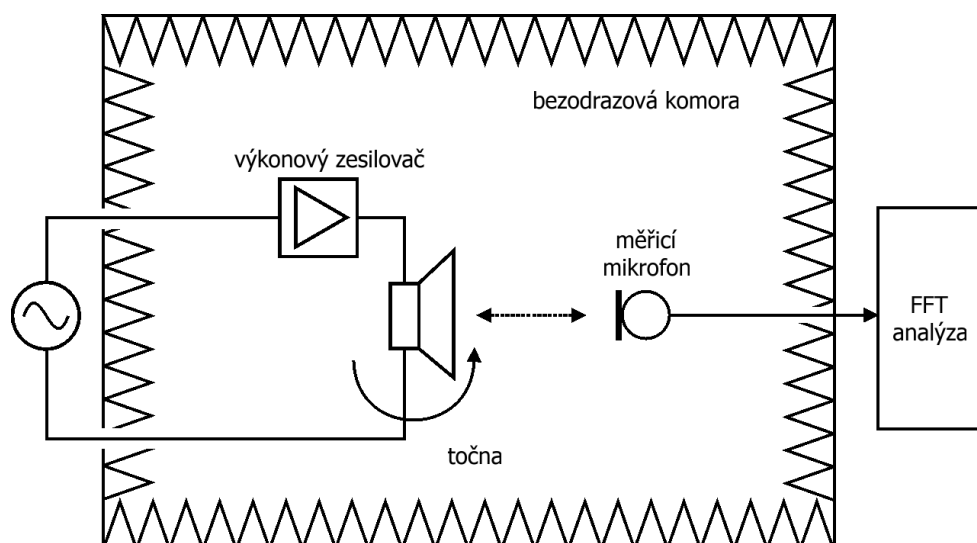
Reproduktor je umístěn do volného pole při normálních měřicích podmínkách, do vzdálenosti 1 m od měřicího mikrofону. Napájení reproduktoru závisí na požadavku buď sinusovým, nebo pásmovým šumovým signálem.

Vyobrazení je možné provést dvěma způsoby

- Jako soubor polárních charakteristik pro udané frekvence, či n -oktávová pásma ve jmenovitém frekvenčním rozsahu.
- Jako soubor frekvenčních charakteristik pro různé úhly vzhledem k referenční ose. Doporučuje se použít interval úhlů 15° , nebo menší.

Při prezentaci výsledků je nutné uvést použité úhly, popřípadě orientaci měřicí osy (horizontální nebo vertikální).

Z naměřených hodnot pak lze určit vyzařovací úhel, tj. úhel, v jehož rozmezí neklesá hladina akustického tlaku o více než 10 dB vůči referenční ose v daném kmitočtovém rozsahu. [5]

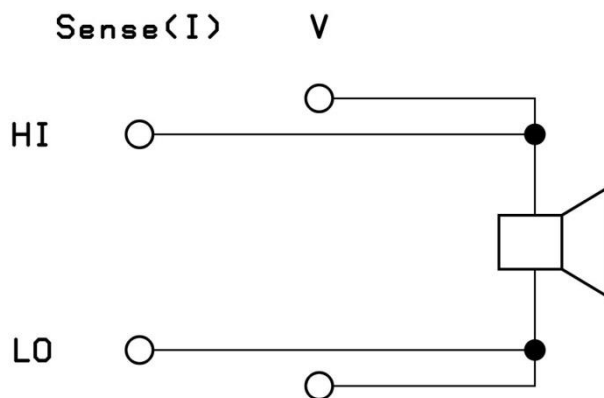


Obrázek 18 Schéma měření směrové charakteristiky

V akustických laboratořích FEL je reproduktor umístěn na dálkově ovládaném otočném zařízení nastaveném na 120 s / otáčku a pomocí signálu s četností rovněž 120 s / otáčku synchronizován s analyzátozem.

4.11 Měření odporu

Vzhledem k nepřesnosti běžných ohmmetrů měříme čtyřvodičovou metodou, neboť pomocí hodnoty R_V dopočítáváme řadu dalších veličin a případná chyba by se tímto



Obrázek 19 Schéma zapojení čtyřvodičového měření odporu

rozšířila dále do měřicího řetězce. Tato metoda umožňuje přesné měření bez ohledu na vliv odporu měřicích vodičů. Hodí se pro měření malých odporů v řádech jednotek či desítek Ω , měříme s přesností na tři platné číslice.

Měříme jak hodnotu referenčního odporu samotného R_R , tak i odpor přechodů R_D (svorky zkratujeme). Tyto dvě naměřené hodnoty odečteme.

Známy odpor má tedy hodnotu $R = R_R - R_D$.

5 ZÁVĚR

V rámci předložené diplomové práce byly vytvořeny metodické návody pro měření parametrů elektrodynamických reproduktorů v akustických laboratořích FEL ZČU v Plzni. Vzhledem k tomu, že jde o často opakovaná měření, která jsou prováděna řadou pracovníků včetně některých studentů, vznikla potřeba vytvořit podrobné popisy těchto měřicích postupů. V akustických laboratořích FEL ZČU se tato měření provádějí jak v rámci výuky, tak i pro komerční sektor. V rámci řešení komerčních zakázek bývají měřeny reproduktory pro automobilový průmysl, což je relativně specifická úloha, dále bývají měřeny reproduktory a reprosoustavy pro různé ozvučovací účely.

V příloze jsou uvedeny postupy pro měření reproduktorů určených pro automobilový průmysl. Tato měření reproduktorů se v akustických laboratořích FEL opakují nejčastěji. Obdobný návod byl vytvořen i pro měření ostatních typů reproduktorů, v této práci však není uveden.

Měření podle uvedeného návodu bylo ověřeno jak jedním velmi kvalifikovaným pracovníkem, tak dvěma studenty, kteří dlouhodobě v akustických laboratořích různá měření provádějí.

6 PŘÍLOHA

NÁVOD K MĚŘENÍ PARAMETRŮ REPRODUKTORŮ V AKUSTICKÝCH LABORATOŘÍCH FEL ZČU

Bezpečnostní pokyny:

- Při manipulaci se stojany nejdříve odpojit kabely, při odpojování kabelů nejdříve vypnout analyzátor, jinak hrozí riziko zničení mikrofonu.
- Kabely vždy odpojovat na obou stranách, v žádném případě nepokládat jednostranně připojený kabel volnou koncovkou na pochozí síť bezodrazové komory z důvodu vzniku zemní smyčky.
- Nikdy neukládat žádné změny do výpočtových tabulek a měřicích presetů.
- Všechna data z měření ukládat do jiné, samostatné složky.
- Při zahřívání reproduktorů pozor na velmi nízké frekvence, při velkém rozkmitu hrozí poškození závěsu membrány. Maximální výchylku lze odhadnout subjektivně pohledem, při pochybnostech volíme raději zdola omezené frekvenční pásmo.
- Dosahuje-li amplituda signálu takových hodnot, že problikávají spodní kontrolky úrovně signálu na zesilovači, je třeba úroveň signálu snížit.
- Během měření v bezprostřední blízkosti analyzátoru se doporučuje vypnout jeho ventilaci. Po ukončení měření nebo během přestávky je nutné opět ji zapnout, jinak hrozí přehřátí.

Příprava reproduktorů k měření

Nové reproduktory před měřením rozehrát:

- Šumovým signálem o jmenovitém šumovém napětí (při pochybnostech nižším nebo frekvenčně zdola omezeným)
- Nejméně jednu hodinu
- Poté opět minimálně hodinu „odpočinek“

Instalace

- Mikrofon umístit do vzdálenosti 1 m od referenčního bodu v ose reproduktoru a připojit k analyzátoru. Není-li specifikováno jinak, všechna měření se provádějí v tomto nastavení.
- Zapnout analyzátor B&K Pulse.
- Otevřít složku *d:\Data\Měření\Metody a presety\reproduktory - presety - 2009\Přenos*
- Otevřít nejdříve preset *standard_ozv.pls*, potom postupně otevírat jednotlivé tabulky formátu *.xlsx* ve složce a aktualizovat propojení (program MS Excel sám tuto možnost nabídne).
- Vytvořit složku, do které se bude výsledek měření ukládat; připravit si do něj kopie prázdné výsledkové tabulky z adresáře *d:\Data\Měření\Metody a presety\reproduktory - presety - 2009\výsledkové tabulky*
- Vytvořit textový dokument v témž souboru s názvem *co_to_je.txt*, kam se zapíše typ reproduktoru, jeho jmenovitá impedance a základní charakteristika, kvůli snadné případné dohledatelnosti.
- Před měřením je dobré vyzkoušet, zda je reproduktor správně zapojen a funguje (například subjektivním poslechem šumu, či sinusového signálu o frekvenci 1 kHz, na němž se běžným poslechem dají odhalit rušivá zkreslení).

Vypočítané hodnoty napětí při standardně měřených výkonech

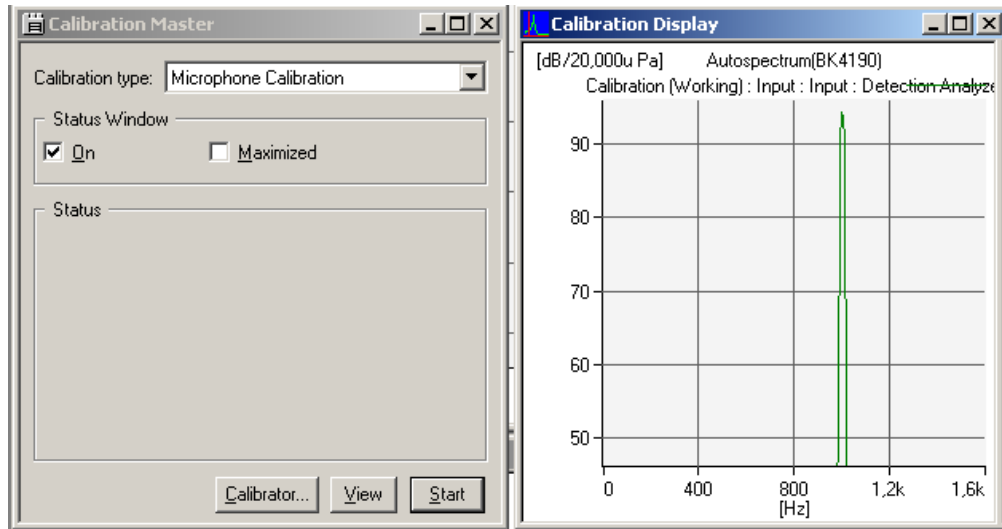
Pro zjednodušení je k dispozici tabulka přepočítaných napěťových úrovní pro různé výkony a jmenovité hodnoty odporů reproduktoru.

Tabulka 2 Přepočet měřicích úrovní napětí

P (W)	1	5	10	15	20	4
U_{2Ω} (V)	1,41	3,16	4,47	5,48	6,32	2,83
U_{4Ω} (V)	2,00	4,47	6,32	7,75	8,94	4,00
U_{6Ω} (V)	2,45	5,48	7,75	9,49	10,95	4,90
U_{8Ω} (V)	2,83	6,32	8,94	10,95	12,65	5,66

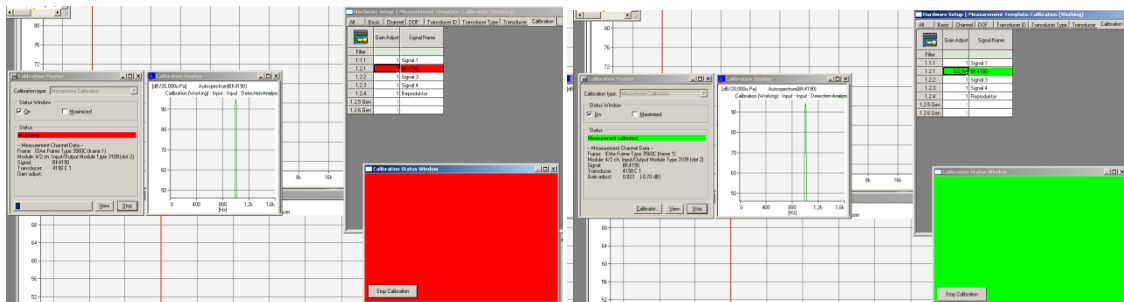
Kalibrace mikrofону

- Měřicí systém se kalibruje na hladinu akustického tlaku 94 dB na 1 kHz.
- Kalibrátor nasadit na mikrofon, zapnout jej
- V analyzátoru spustit program kalibrace.



Obrázek 20 Nastavení kalibrace mikrofону v programu Brüel&Kjaer PULSE

Proces proběhne následujícím způsobem:



Obrázek 21 průběh kalibrace

MĚŘENÍ AMPLITUDOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY

Otevřít:

d:\Data\Měření\Metody a presety\reproduktory – presety – 2009\Přenos\standard_ozv.pls

Amplitudovou frekvenční charakteristiku měřit v bezodrazové komoře.

Měření probíhá:

- V deskové ozvučnici
- V uzavřené ozvučnici

Tabulka 3 Nastavení presetu standard_ozv.pls pro měření amplitudové frekvenční charakteristiky

FFT Analyzer	Frequency Lines	3200
	Span	20 kHz
	Averaging mode	Exponential
	Averages	5000
	Overlap	Max
Generator	Waveform	Random
	Signallevel	500 mVrms
	Signalground	Not floating
	Frequencyspan	25,6 kHz

- Při měření dbát na ticho v pozadí. Při zaznamenání rušivých zvuků z okolí (zejména na nízkých frekvencích) měření opakovat.
- Měřit vždy bílým šumem při výkonu 1 W.
- Naměřené hodnoty zkopírovat a vložit do levého sloupce výsledkové tabulky (je třeba vložit jako hodnoty a formáty čísla).
- Celou frekvenční charakteristiku vztáhnout k hodnotě citlivosti při 100 Hz.

Podrobnosti v kapitole 4.5.1

MĚŘENÍ CITLIVOSTI

Citlivost měřit vždy filtrovaným růžovým šumem v rozsahu dle tabulky 4 (pokud není zadáno jinak).

Tabulka 4 Frekvence a frekvenční pásma pro měření charakteristické citlivosti

Typ reproduktoru	Frekvenční pásmo běžné	Frekvenční pásmo kontrolní	Harmonický signál
Basové	70 Hz – 4 kHz	20 Hz – 10 kHz	100 Hz
Výškové	4,5 kHz – 20 kHz	600 Hz – 20 kHz	5 kHz
Ecall	300 Hz – 3,4 kHz	100 Hz – 12,5 kHz	400 Hz

Proměřit

- Běžné pásmo
- Kontrolní pásmo
- Harmonický signál o frekvenci 100 Hz

Vždy při výkonu 1 W.

Tabulka 5 Nastavení presetu standard_ozv.pls pro měření charakteristické citlivosti reproduktoru

FFT Analyzer	Frequency Lines	3200
	Span	20 kHz
	Averaging mode	Exponential
	Averages	5000
	Overlap	Max
Generator	Waveform	User defined
	Output range	500 mVPeak
	Signalground	Not floating
	File	d:\Data\Měření\Metody a presetý\signály\ostatní

Pokud se s ovládáním zesilovače dostaneme na maximum a stále nedosahujeme požadovaného napětí, zvýšíme úroveň signálu Output Range generátoru.

Proměnné úrovně citlivosti se přepisují do výsledkové tabulky (Obrázek 22).

	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Zjm			8 Ohm									
deska							bedna					
100Hz		87,1	dB				100Hz		dB			
citlivost		86,6	60-4k				citlivost		60-4k			
		85,7	20-10k						20-10k			
		2,83 V	6,32 V	8,94 V	10,95 V	12,65 V		2,83 V	6,32 V	8,94 V	10,95 V	12,65 V
		1 W	5 W	10 W	15 W	20 W		1 W	5 W	10 W	15 W	20 W
100 Hz		0,22	0,44	0,68	0,87	1,01	100 Hz					
250 Hz		0,19	0,34	0,46	0,54	0,62	250 Hz					
325 Hz		0,3	0,59	0,81	1	1,11	325 Hz					

	F	G	H
1			
2	Citlivost	89,2	dB
3			

Obrázek 22 Výsledková tabulka pro měření citlivosti reproduktoru

Podrobnosti v kapitole 4.7

ZKRESLENÍ

Měřit v:

- deskové ozvučnici
- uzavřené ozvučnici
- měříme harmonickým signálem o frekvencích a při výkonech dle výsledkové tabulky

Tabulka 6 Nastavení presetu *standard_ozv.pls* pro měření nelineárního zkreslení reproduktoru

FFT Analyzer	Frequency Lines	3200
	Span	20 kHz
	Averaging mode	Exponential
	Averages	10
	Overlap	Max
Generator	Waveform	Sine
	Level	500 mVrms
	Frequency	Nastavuji
	Start Phase	0 Deg

- Z tabulky Zkreslení postupně odečíst požadované frekvence.
- Každou danou frekvenci nastavit na generátoru.
- Velikost zkreslení najít v tabulce Zkreslení.
- Opsat hodnotu zkreslení na příslušné místo do výsledkové tabulky (Obrázek 23).
- Proměřit pro všechny hodnoty výkonů podle výsledkové tabulky.

Měřicí rozsah:

Tabulka 7 Rozsah frekvencí při měření harmonického zkreslení

Basové reproduktory	50 Hz – 2 kHz
Středové reproduktory	Dle typu a požadavků zadavatele
Výškové reproduktory	1 kHz – 5 kHz

Jednotlivé hodnoty vycházejí z třetinooktávových pásem a jsou součástí výsledkové tabulky.

Po ukončení každého kroku měření se ve spodní tabulce aktualizuje údaj o velikosti zkreslení k příslušné frekvenci, tuto hodnotu kopírujeme do horní tabulky.

chary																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	f [Hz]	L des [dB]	L bed [dB]														
2	0	37,6			Zjm		8 Ohm										
3	6,25	46,7			deska						bedna						
4	12,5	53,1			100Hz		87,1 dB				100Hz		dB				
5	18,75	57,5			citlivost		86,6 60-4k				citlivost		60-4k				
6	25	60,4					85,7 20-10k						20-10k				
7	31,25	62,2					2,83 V	6,32 V	8,94 V	10,95 V	12,65 V		2,83 V	6,32 V	8,94 V	10,95 V	12,65 V
8	37,5	63,6					1 W	5 W	10 W	15 W	20 W		1 W	5 W	10 W	15 W	20 W
9	43,75	64,8			100 Hz	0,22	0,44	0,68	0,87	1,01	100 Hz						
10	50	65,8			250 Hz	0,19	0,34	0,46	0,54	0,62	250 Hz						
11	56,25	66,8			325 Hz	0,3	0,59	0,81	1	1,11	325 Hz						
12	62,5	67,6			400 Hz	0,32	0,71	0,9	1,09	1,27	400 Hz						
13	68,75	68,3			500 Hz	0,4	0,74	1,02	1,2	1,39	500 Hz						
14	75	68,9			630 Hz	0,29	0,57	0,76	0,86	0,95	630 Hz						
15	81,25	69,5			800 Hz	0,27	0,53	0,88	1,07	1,26	800 Hz						
16	87,5	70,1			1 kHz	0,26	0,54	0,66	0,7	0,73	1 kHz						
17	93,75	70,7			1,25 kHz	0,39	0,61	0,75	0,86	0,95	1,25 kHz						
18	100	71,2			1,6 kHz	0,16	0,28	0,36	0,42	0,48	1,6 kHz						
19	106,25	71,9			2 kHz	0,12	0,21	0,28	0,34	0,4	2 kHz						
20	112,5	72,7			50 Hz	2,9	8,76	15,33			50 Hz						
21	118,75	73,4			75 Hz	0,55	1,36	2,48	3,34	5,1	75 Hz						
22	125	73,8															
23	131,25	73,7															

zkreslení [režim kompatibility]															
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	p [Pa]			100 Hz	250 Hz	325 Hz	400 Hz	500 Hz	625 Hz	800 Hz	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz	2 kHz	4 kHz
2	6,84E-04		1. harm.	1,83E-04	9,91E-05	1,09E-04	8,88E-05	1,09E-04	1,17E-04	1,23E-04	1,33E-04	2,44E-04	3,70E-04	5,78E-04	2,17E-03
3	1,16E-03		2. harm.	9,64E-05	0,000109	0,000132	0,000123	0,000133	0,000244	0,00037	0,578049	0,000255	0,000133	2,17E-03	7,71E-05
4	1,36E-03		3. harm.	9,67E-05	0,000132	0,000128	0,000226	0,000269	0,000979	0,000294	0,000143	8,2E-05	4,21E-05	1,38E-03	1,68E-05
5	1,32E-03		4. harm.	8,88E-05	0,000133	0,000233	0,00037	0,578049	0,000255	0,000133	0,002166	3,64E-05	1,42E-05	7,71E-05	8,18E-05
6	1,06E-03		5. harm.	0,000109	0,000244	0,000368	0,578049	0,000255	0,000147	0,002166	3,64E-05	1,39E-05	7,71E-05	2,57E-04	1,53E-05
7	8,11E-04														
8	6,33E-04														
9	4,63E-04		THD [%]	74,41	172,89	168,94	376,28	306,17	865,48	383,88	435359,83	110,12	37,75	0,44	3,64
10	3,17E-04														
11	2,68E-04														
12	3,32E-04														
13	4,29E-04														
14	4,80E-04														
15	4,54E-04														

Obrázek 23 Výsledková tabulka pro měření harmonického zkreslení

Při měření na spodní frekvenční hranici daného reproduktoru (např. u basových reproduktorů na frekvencích 50 Hz a 70 Hz) výrazně roste zkreslení s přibývajícím výkonem. Vidíme-li, že jeho hodnota přerůstá 20 %, na těchto frekvencích raději dále neměříme, aby nedošlo k trvalému poškození membrány reproduktoru.

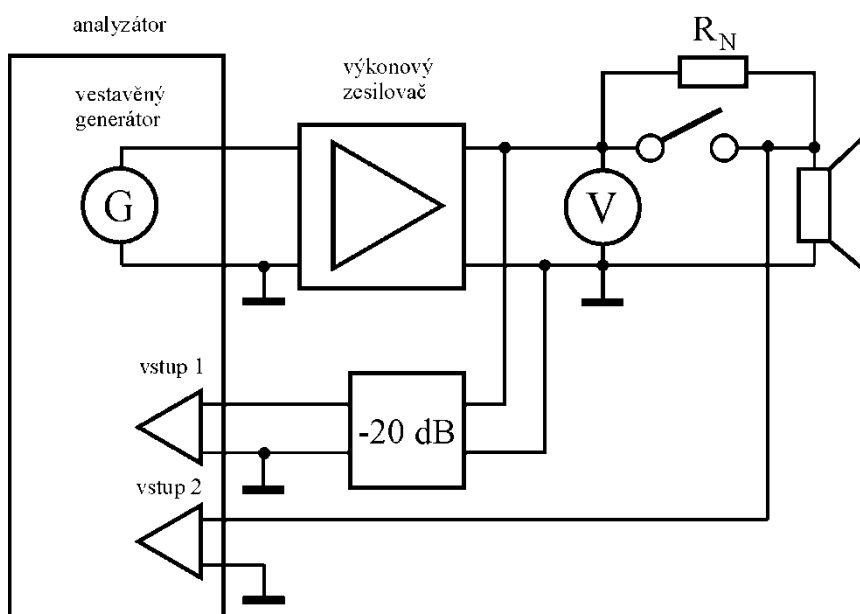
U reproduktorů typu Ecall měřit zkreslení při výkonech 1 W, 4 W.

Podrobnosti v kapitole 4.8

IMPEDANČNÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

Předchází-li měření impedanční charakteristiky nebo TS parametrů jedno nebo více z uvedených měření, doporučuje se analyzátor vypnout, odpojit mikrofony, všechny výpočtové tabulky zavřít, opět zapnout.

- Otevřít složku *d:\Data\Měření\Metody a presety\reproduktory - presety - 2009\Impedance*
- Změřit R_V (čtyřvodičovou metodou).
- Změřit referenční odpor (cca 3,33 Ω).
- Zapojit podle obrázku:



Obrázek 24 Schéma zapojení měření impedanční charakteristiky a TS parametrů

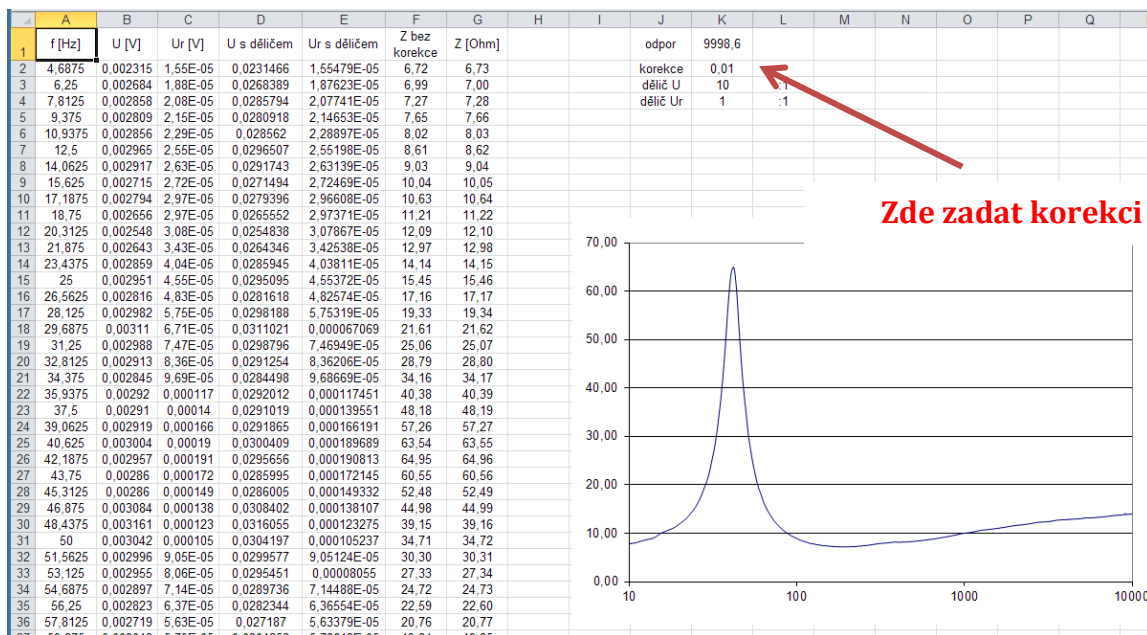
- Aktivovat Generator 2 (program má snahu spouštět jedničku!).

Tabulka 8 Nastavení presetu impedance.pls pro měření impedanční charakteristiky

FFT Analyzer	Frequency Lines	6400
	Span	10 kHz
	Averaging mode	Exponential
	Averages	1000 (možno ukončit dřív)
	Overlap	Max
Generator	Waveform	Random
	Signallevel	500 mVrms
	Signalground	Not floating
	Frequencyspan	25,6 kHz

Impedance se měří do 10 kHz pro basové reproduktory, do 20 kHz pro výškové.

- Připojit referenční odpor, proměřit.
- Stanovit korekci (upravit hodnotu korekce v tabulce) aby si hodnoty naměřené čtyřvodičově a analyzátozem odpovídaly).



Obrázek 25 Tabulka pro stanovení korekce při měření impedanční charakteristiky

- Úroveň napětí zvolit cca mezi 2 V - 5 V.
- Připojit reproduktor.
- Proměřit.
- Zahřát (týká se pouze hlubokotónových reproduktorů)

Odpojit kabel z Input 2, přepnout na červenou.

Zahřívat zátěží o velikosti ¼ jmenovitého výkonu po dobu 3 minut růžovým šumem.

Tabulka 9 Nastavení presetu impedance.pls pro zahřívání reproduktoru před měřením

Generator	Waveform	Random
	Level	1 Vrms
	Signalground	Not floating
	Frequencyspan	1,6 kHz LowPass
	Pink filter	On

- Připojit kabel, přepnout na modrou.

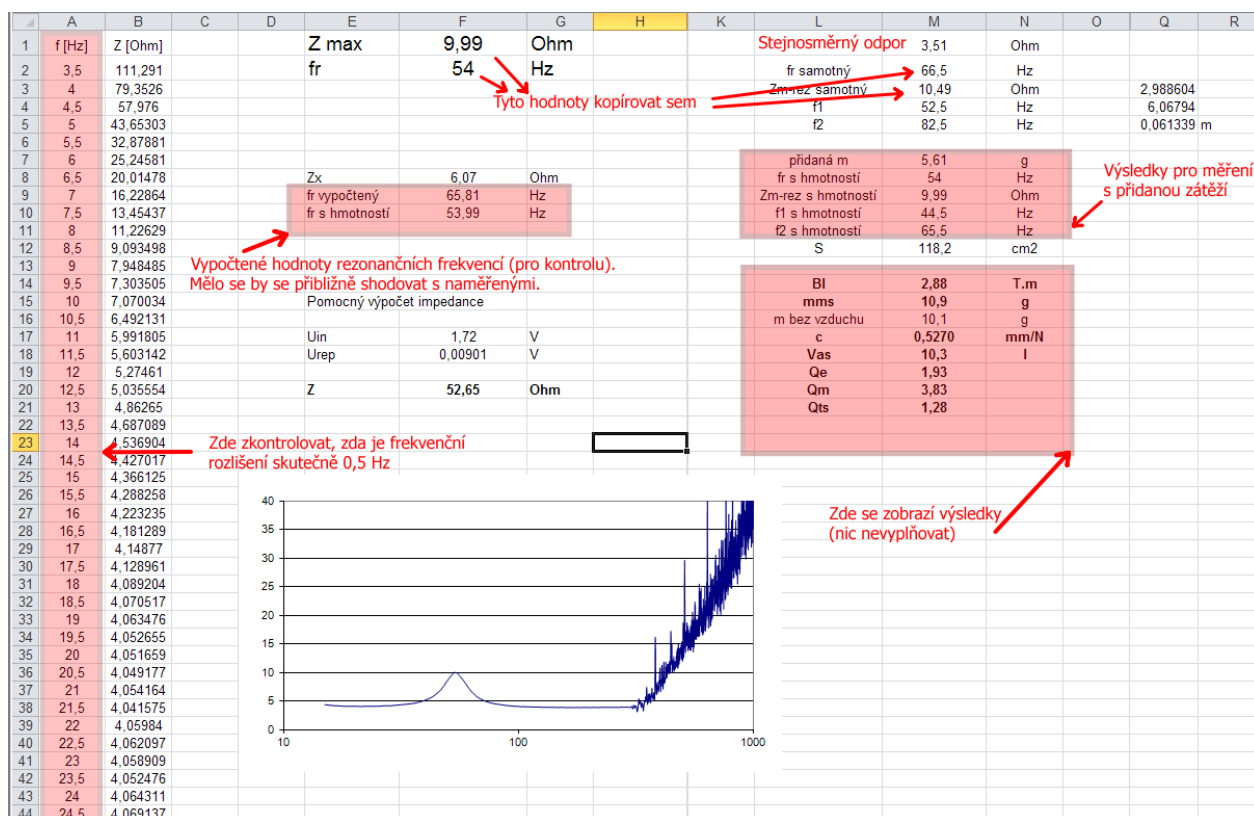
- Opakovat měření.
- Zkopírovat naměřené hodnoty do výsledkové tabulky.

TS PARAMETRY

- Otevřít *d:\Data\Měření\Metody a presety\reproduktory - presety - 2009\TS parametry*
- Otevřít soubor *TS-výpočet.xlsx*, aktualizovat propojení s programem
- Změřit R_v reproduktoru (čtyřvodičovou metodou)
- Kalibrace odporu - stejným způsobem jako u impedanční charakteristiky, pouze místo šumu použít sweep signál (Tabulka 10)
- Změřit odpor vodičů (svorky zkratovat) pro ověření, voltmetr by měl ukazovat nulovou hodnotu.
- Zahřát - stejným způsobem jako u impedanční charakteristiky
- Proměřit
- Měření zahájit ihned po zahřívání,
- Dbát na ticho v pozadí.
- Opsat rezonanční frekvenci a impedanci do výsledkové tabulky.
- Najít f_1 , f_2 pro impedanci Z_x , opsat hodnotu do výsledkové tabulky.
- Aplikovat zátěž (přesně změřenou).
- Opakovat měření včetně zahřívání, popřípadě měřit ihned se zátěží, v tom případě není nutné znovu ohřívat.

Tabulka 10 Nastavení presetu TS-impedance.pls pro měření TS parametrů

FFT Analyzer	Frequency Lines	3200
	Span	1,6 kHz
	Averaging mode	Peak
	Averages	1000
	Overlap	Max
Urep	Max Peak input	223,6 mVnebo vyšší - kontrolovat přebuzení!
Generator	Waveform	Swept sine
	Level	500 mVrms
	Start Frequency	10 Hz
	Stop Frequency	300 Hz
	Start Phase	0 Deg
	Sweep	Unidirectional Logarithmic 20m dec/s



Obrázek 26 Výsledková tabulka pro měření TS parametrů

Podrobnosti v kapitole 4.6

KONTROLNÍ MĚŘENÍ Z, L, R

Měříme pomocí měřidla HIOKI 3531 Z při následujících hodnotách:

- $U = 2 \text{ V}$
- $f = 400 \text{ Hz}$
- Range = auto
- Ave = 8 times

Měření probíhá bez ozvučnice, reproduktor volně leží na podložce membránou vzhůru.
Před měřením zahřívát výkonem cca 1 W po dobu 1 min.

Naměřené hodnoty Z, L_s , R_s a Q jsou součástí protokolu o měření.

PROTOKOL O MĚŘENÍ

Protokol o měření by měl obsahovat tyto údaje:

Typ reproduktoru:

Sériové číslo, označení, průměr membrány

Bezodrazová komora:

Rozměry: 5,0 m × 4,0 m × 6,4 m

Objem: 128 m³

Tlak, teplota, relativní vlhkost:

Analyzátor: BK PULSE 3560C, S/N 2241811, sw v. 10,

Mikrofony: BK 4190

Zesilovač: Yamaha CP2000

RLC Bridge: HIOKI 3531 Z HiTester

Multimetr: HP 34401

Ozvučnice: V souladu s IEC 60268-5

Naměřené hodnoty jednotlivých parametrů včetně:

- grafů,
- tabulek,
- měřicích úrovní a rozsahů,
- použitých signálů,
- podmínek měření.

7 SEZNAM LITERATURY

[1] ČSN EN 60268-5 Elektroakustická zařízení – Část 5 - Reproduktory. Česká technická norma ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004

[2] KAŇKA, J. Šíření zvuku v uzavřeném prostoru. *TZB info*. [Online] <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/227-sireni-zvuku-v-uzavrenem-prostoru-difuzni-zvukove-pole>.

[3] Reproduktorový sloup pro výkonové ozvučení. *Elektroakustika.cz*. [Online] <http://www.elektroakustika.cz/reprosloup.html>.

[4] ČSN IEC 268-1 Elektroakustická zařízení – Část 1 - všeobecně. *ELEKTROAKUSTICKÁ ZAŘÍZENÍ*. 1994.

[5] ČSN IEC 268-5 Elektroakustická zařízení – Část 5 - Reproduktory. Česká technická norma ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1996

[6] SMETANA, C. *Praktická elektroakustika*. Praha : SNTL, 1981. ISBN 80-85623-57-9

[7] SÝKORA, B. Reproduktory a reproduktorové soustavy. *Amatérské rádio*. 1993. ISSN: 0139-7087

[8] SÝKORA, B. Stavíme reproduktorové soustavy. *Praktická elektronika*. 1998.

[9] TOMAN, K. *Reproduktory a reprosoustavy II*. Orlová : Dexon Czech s.r.o., 2010. ISBN 8591459280812