

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Realizace přípravku pro měření TS parametrů
reproduktorů**

**vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
autor: Bc. Jan Sukdol**

2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan SUKDOL**
Osobní číslo: **E10N0148P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**
Název tématu: **Realizace přípravku pro měření TS parametrů reproduktorů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Prostudujte možnosti měření TS parametrů reproduktorů.
2. Navrhněte přípravek pro měření TS parametrů elektrodynamických reproduktorů pomocí analyzátoru BK Pulse.
3. Navržený přípravek realizujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**

Katedra technologií a měření

Konzultant diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**

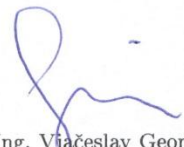
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá rozborem metod pro měření TS parametrů reproduktorů. Uvedeny jsou také stručně důvody měření TS parametrů a jejich význam. Druhá část práce je zaměřena na praktickou konstrukci přípravku pro měření TS parametrů, kde je popsán postup návrhu, volba nejvhodnější metody měření a také tvorba uživatelského rozhraní pro měření v programu LabView. Presentovány jsou také výsledky ověření funkčnosti a měření přesnosti přípravku.

Klíčová slova

TS parametry, Thiele-Small, měření reproduktorů

Abstract

Realization of device for TS parameters measurement

This diploma thesis deals with analysis of methods for TS parameters measurement of loudspeakers. There are also briefly introduced reasons for these measurements and their meaning. Second part of thesis is aimed at practical construction of device for measurement of TS parameters of loudspeakers, where there is described procedure of design, choosing of the most suitable method and also development of user interface for measurement in LabView. There are also presented results of functionality and accuracy measurements.

Key words

TS parameters, Thiele-Small, Loudspeakers measurement

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 11.5.2012

Jméno příjmení

.....

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	7
ÚVOD	8
1 TS PARAMETRY A JEJICH VYUŽITÍ	9
1.1 HISTORIE.....	9
1.2 PŘEHLED TS PARAMETRŮ	9
2 MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ	12
2.1 METODY MĚŘENÍ IMPEDANČNÍ KŘIVKY	12
2.2 TEPelná ZÁVISLOST A KALIBRACE PŘÍPRAVKU PRO SROVNÁVACÍ METODU	23
2.3 POSTUP URČENÍ TS PARAMETRŮ	26
3 KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ	30
3.1 CÍLE NÁVRHU	30
3.2 VLASTNOSTI MĚŘICÍ KARTY NI USB-6221BNC	30
3.3 NÁVRH PŘÍPRAVKU	32
3.4 PROPOJENÍ PŘÍPRAVKU A MĚŘICÍ KARTY	34
4 TVORBA MĚŘICÍ APLIKACE	35
4.1 NÁVRH MĚŘICÍ SEKVENCE	36
4.2 BLOK ZAHŘÍVÁNÍ REPRODUKTORU	36
4.3 BLOK MĚŘENÍ.....	39
4.4 OPAKOVÁNÍ MĚŘENÍ PO ZATÍŽENÍ REPRODUKTORU.....	42
4.5 VÝPOČTY TS PARAMETRŮ	43
5 ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ	44
ZÁVĚR	46
POUŽITÁ LITERATURA	47
PŘÍLOHY	1

Seznam použitých symbolů

$R_{\text{rep}}[\Omega]$	..... odpor reproduktoru
$Z_{\text{rep}}[\Omega]$	..... impedance reproduktoru
$U_{\text{Rrep}}[\text{V}]$	..... napětí na reproduktoru
$U_{\text{zes}}[\text{V}]$	..... napětí na zesilovači
$R_1[\Omega]$	..... velikost předřadného odporu
$\Delta R_{\text{rep}}[\Omega]$	..... chyba určení odporu reproduktoru
$R_{\text{kcelk}}[\Omega]$	..... celkový odpor kabelů
$R_{\text{zes}}[\Omega]$	..... odpor zesilovače
$R_{\text{in}}[\Omega]$	..... vnitřní odpor přístroje
$C_{\text{in}}[\text{F}]$	..... vnitřní kapacita přístroje
$R_0[\Omega]$	..... počáteční odpor
$\alpha[\text{K}^{-1}]$	..... teplotní koeficient
$\rho[\mu\Omega\cdot\text{cm}]$	..... měrný odpor materiálu
$R_{\text{ch}}[\Omega]$	..... chybový odpor
$R_{\text{kal}}[\Omega]$	..... velikost kalibračního odporu
$R_{\text{měř}}[\Omega]$	..... měřená hodnota odporu

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí přípravku pro měření Thiele-Small parametrů reproduktorů, který může být dále využíván ve zvukových laboratořích pro zjednodušení prováděných měření a výpočtů TS parametrů.

Mezi požadavky na podobu přípravku byla implementace kompletního měřicího procesu, jak je popisován v normách a odborné literatuře, a to bez nutnosti ručního přepojování během průběhu měření. Před samotným měřením musí být totiž prováděno zahřívání reproduktoru generovaným růžovým šumem, aby byla simulována situace reálných provozních podmínek reproduktoru.

Krom fyzické konstrukce přípravku bylo požadováno i vyhotovení měřicí aplikace, která by uměla komunikovat s přípravkem pomocí měřicí karty a řídit jeho činnost.

Práce je rozdělena do několika kapitol podle bodů zadání. V první kapitole práce jsou na úvod podrobně popsány jednotlivé TS parametry, spolu s jejich významem.

Druhá kapitola se zabývá možnostmi měření TS parametrů. Rozebráno je několik metod a je vyvozeno, která metoda bude následně použita pro konstrukci přípravku. Text této kapitoly je také zaměřen na problematiku teplotní závislosti přípravku a způsob její případné korekce. Také jsou zde uvedeny vztahy pro výpočty parametrů, které jsou převzaty z uvedené literatury.

Další kapitoly této práce jsou zaměřeny na návrh a provedení přípravku a jeho programového vybavení.

Oproti zadání není přípravek realizován za pomoci analyzátoru BK Pulse, ale měřicí karty firmy National Instruments NI USB-6221. K tomuto kroku bylo přistoupeno po shodě s vedoucím práce. Výhodami tohoto provedení je nižší cena použité měřicí karty a velká flexibilita při vytváření měřicí sekvence v prostředí LabView, které je uzpůsobené pro snadné použití této měřicí karty.

1 TS parametry a jejich využití

Thiele-Small (dále TS) parametry jsou souborem veličin, které definují vlastnosti reproduktoru, jako elektroakustického měniče. S jejich využitím můžeme určit chování reproduktoru na nízkých frekvencích a podle toho zvolit například nejvhodnější typ ozvučnice pro daný reproduktor.

1.1 Historie

V 2. Polovině 20. Století se významným způsobem začali rozvíjet techniky návrhu reproduktorových soustav. K průkopníkům této doby patří A.N. Thiele a Richard H. Small. Oba jmenovaní navazovali převážně na práci L. L. Beranka, který svou publikaci Acoustics vydal již v roce 1954.

Texty v této diplomové práci jsou zpracovány zejména na základě článků, které přímo vychází z práce Direct Radiator Loudspeaker Analysis od R. H. Smalla.

1.2 Přehled TS parametrů

TS parametry je možné rozdělit do několika skupin. Následující text rozdělení parametrů a jejich popisu je převážně převzatý ze zdroje [1].

Základní mechanické parametry malých signálů

Toto jsou fyzické parametry reproduktoru měřené při malých signálech, použité v elektromechanické analogii modelující chování reproduktoru čistě elektrickým obvodem.

S_d [m ²]	– efektivní plocha membrány
M_{ms} [kg]	– hmotnost kmitacího systému včetně zátěže (vzduchu)
C_{ms} [mm/N]	– poddajnost kmitacího systému. Tuhost získáme, jako převrácenou hodnotu
R_{ms} [N.s/m]	– mechanické tlumení
R_{me} [N.s/m]	– elektrické tlumení
L_e [mH]	– elektrická indukčnost kmitací cívky měřená na 1kHz
R_e [Ω]	– stejnosměrný odpor kmitací cívky
Bl [T.m]	– součin velikosti magnetické indukce a délky drátu cívky v pracovní mezeře

Parametry malých signálů

Tyto parametry jsou odvozené od měření elektrické impedance měniče, a to konkrétně blízko rezonanční frekvence a při malých úrovních signálů, kdy se mechanické zavěšení membrány reproduktoru chová lineárně

f_s [Hz]	– rezonanční kmitočet měniče
Q_{es} [-]	– elektrický činitel jakosti
Q_{ms} [-]	– mechanický činitel jakosti
Q_{ts} [-]	– celkový činitel jakosti
V_{as} [m ³]	– ekvivalentní objem
C_{as} [m/N]	– akustická poddajnost měniče
M_{as} [kg/m]	– akustická zátěž měniče
η_0 [%]	– účinnost měniče
SPL [dB]	– citlivost reproduktoru (při vzdálenosti 1 m a 1 W výkonu)

Parametry velkých signálů

Tyto parametry určují chování reproduktorů při velkých hodnotách vstupního signálu.

X_{max} [mm]	– maximální lineární výchylka membrány reproduktoru. Za tuto hodnotu se reproduktorová membrána může vychýlit, ale její výchylka je poté nelineárně závislá na síle signálu, dochází tedy k amplitudovému zkreslení signálu.
X_{mech} [mm]	– maximální fyzická výchylka membrány reproduktoru, při níž nedojde k fyzickému poškození.
P_e [W]	– teplotní výkonová zatížitelnost.
V_d [m ³]	– objem určený špičkovou výchylkou membrány a jejím povrchem.

Popis některých parametrů

Za pomoci textu [1] nyní objasníme některé veličiny důležité pro popis chování reproduktoru.

f_s – rezonanční frekvence reproduktoru. Na její hodnotě je uložena energie v pohyblivé hmotě a poddajnost závěsu nejvyšší. To ústí v nejvyšší rychlost pohybu reproduktoru na této frekvenci. Méně poddajný závěs, nebo větší hmotnost membrány má za následek nižší rezonanční frekvenci. Obvykle je méně efektivní provozovat reproduktor na frekvencích nižších, než f_s . Provoz na frekvencích výrazně nižších, než f_s může způsobit velké výchylky

membrány, nebo dokonce mechanické poškození reproduktoru. Basové reproduktory mají f_s v pásmu 12-60Hz, středové reproduktory 60-500Hz a výškové až v řádu několika kHz.

Q_{ts} – celkový činitel jakosti je bezrozměrná veličina, charakterizována kombinací elektrického a mechanického tlumení. Je určena na rezonanční frekvenci f_s a je úměrná k množství energie přijaté děleno množstvím energie vyzářené. Většina reproduktorů má hodnotu tohoto činitele mezi 0,2 a 0,5.

Q_{ms} – mechanický činitel jakosti je bezrozměrná veličina, která je charakterizována mechanickým tlumením reproduktoru, tj. ztrátami v uchycení (závěs a středící prvek – tzv. pavouk). Jeho hodnota se pohybuje v širokém rozmezí od zhruba 0,5 do 10, kdy typická hodnota je kolem 3. Vyšší Q_{ms} indikuje nižší mechanické ztráty. Jeho hodnota nejvíce ovlivňuje impedanci reproduktoru. S vyšším Q_{ms} vzrůstá špička impedance na f_s .

Q_{es} – elektrický činitel jakosti vyjadřuje elektrické tlumení reproduktoru. Toto tlumení je způsobeno indukovaným proudem do cívky, který je vytvářen jejím pohybem magnetickým polem. Směr indukovaného proudu je opačný k proudu, který vstupuje do obvodu a stejně tak síla vyvolaná tímto proudem působí proti směru pohybu cívky. To má za následek zvýšení impedance v okolí rezonančního kmitočtu.

Bl – udává sílu, kterou je reproduktor schopen vytvořit pro pohyb membrány (po vynásobení hodnotou protékajícího proudu).

V_{as} – ekvivalentní objem měřený v litrech, nebo m^3 udává tuhost zavěšení membrány tak, že jí přirovnává k objemu vzduchu, který by naplňoval válec o stejné podstavě, jako účinná plocha reproduktoru a měl by stejný tlumicí účinek, jako závěs na reproduktoru, který je umístěn volně ve vzduchu. Větší hodnota znamená menší tuhost a obecně vyžaduje větší objem ozvučnice.

M_{ms} – udává hmotnost kmitajících částí reproduktoru, do níž je započítána zátěž tvořená odporem vzduchu, který je v kontaktu s membránou reproduktoru. Oproti tomu M_{md} je pouze hmotnost tvořená mechanickými, pohybujícími se částmi reproduktoru.

R_{ms} – je veličina určující ztráty, nebo tlumení v závěsu reproduktoru a pohyblivém systému. Je hlavním faktorem v určování Q_{ms} .

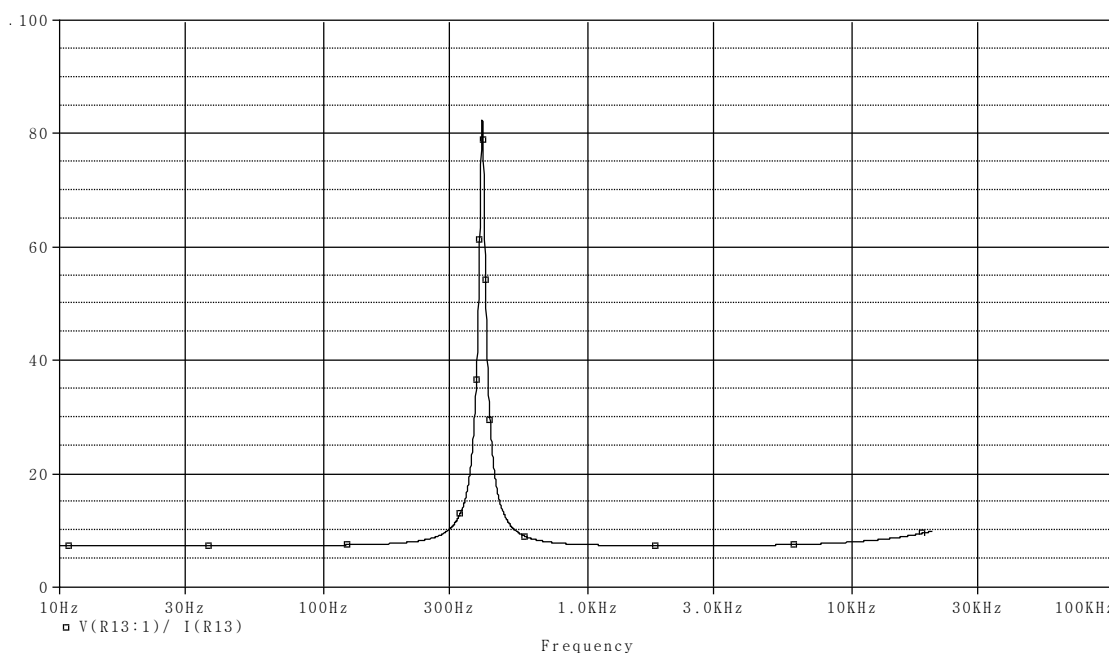
C_{ms} – udává poddajnost zavěšení, což je převrácená hodnota tuhosti. Hodnota C_{ms} je úměrná k V_{as} .

R_e – stejnosměrný odpor cívky. Jmenovitá impedance a stejnosměrný odpor by neměly být vzájemně zaměňovány. Jmenovitá impedance je totiž měřena nad rezonančním kmitočtem reproduktoru a udává nejnižší hodnotu impedance v této oblasti. Dle normy [2] musí být minimální hodnota modulu impedance v udávaném frekvenčním rozsahu minimálně 80%

jmenovité impedance, což platí i pro stejnosměrný odpor. V opačném případě musí být hodnota stejnosměrného odporu uvedena zvlášť.

2 Měření TS parametrů

Mluvíme-li o měření TS parametrů, nejčastěji máme na mysli určování některých parametrů reproduktorů za pomoci měření absolutní hodnoty impedance kmitací cívky. Ukázka nasimulovaného průběhu středo-tónového reproduktoru je uvedena na *Obr. 1*



Obr. 1: impedanční křivka reproduktoru

Z impedanční křivky můžeme vyčíst několik veličin, potřebných k dalším výpočtům. Především je to f_s , Z_{max} a dále také jmenovitá impedance. Jak bylo uvedeno dříve, Z_{max} je nejvyšší hodnota impedance, která se nachází na rezonančním kmitočtu f_s . Na uvedeném obrázku se tedy jedná o vrchol nad frekvencí 300 Hz. Jmenovitá impedance se naopak nachází v nejnižším poklesu impedanční křivky nad rezonanční frekvencí.

K tomu, abychom získali závislost absolutní hodnoty impedance na frekvenci, můžeme použít několik měřicích metod, které budou v následujícím textu blíže rozebrány.

2.1 Metody měření impedanční křivky

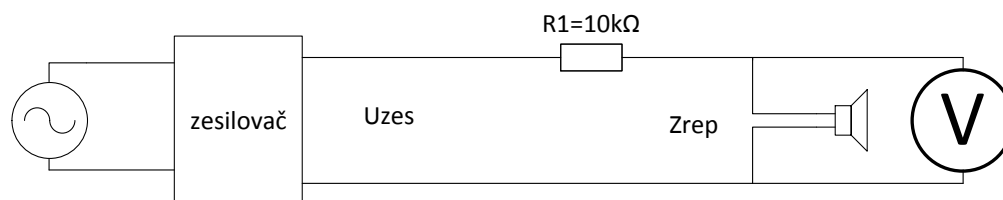
Pro přesné určení TS parametrů je potřeba velice přesným způsobem měřit impedanci reproduktorové cívky. Frekvenční rozlišení tohoto měření by mělo mít přesnost alespoň cca 0,5 Hz, z hlediska tolerance naměřené hodnoty impedance by se mělo jednat o odchylku

v řádech desetín, až setin ohmu. Metody měření této charakteristiky vychází z metod, které se běžně používají k měření odporu. Vzhledem k tomu, že jejich použití je určeno pro měření při stejnosměrných průbězích, tyto metody nám nedávají informaci o komplexní složce impedance. Absolutní hodnotu impedance reproduktoru můžeme z měření určit díky tomu, že do obvodu v ideálním případě nevnášíme krom reproduktoru žádné další komplexní impedance. Míra platnosti tohoto předpokladu bude také popsána v této kapitole v souvislosti s parametry reproduktorového kabelu. Kvůli správnosti formálního zápisu vzorců jsou z tohoto důvodu použity výpočty pro stejnosměrné hodnoty, tedy pro výpočet odporu reproduktoru, nikoliv jeho impedance.

Vzorce můžeme ovšem považovat za platné i pro měření absolutní hodnoty impedance reproduktoru při střídavých průbězích. Za hodnoty napětí poté budeme dosazovat amplitudy, nebo efektivní hodnoty měřených signálů na jednotlivých frekvencích.

Metoda konstantního proudu

U této metody zajistíme pro měřený reproduktor takové podmínky, že zdroj napětí, kterým je zesilovač, se bude jevit jako zdroj konstantního proudu. Toho dosáhneme zařazením odporu o velké hodnotě do obvodu mezi výstup zesilovače a reproduktor. Typicky použijeme odpor o hodnotě alespoň 1 k Ω . Na svorky reproduktoru poté umístíme voltmetr. Schéma tohoto zapojení můžeme vidět na *Obr. 2*



Obr. 2: metoda konstantního proudu

Výhodou tohoto zapojení je potřeba pouze jednoho měřicího přístroje a z toho vyplývající zjednodušení následného zpracování dat. To platí, pokud známe hodnotu napětí na výstupu zesilovače, v závislosti na zesilovači se tato hodnota může ovšem měnit. Další výhodou je přímá úměrnost mezi hodnotou měřeného napětí a impedancí reproduktoru.

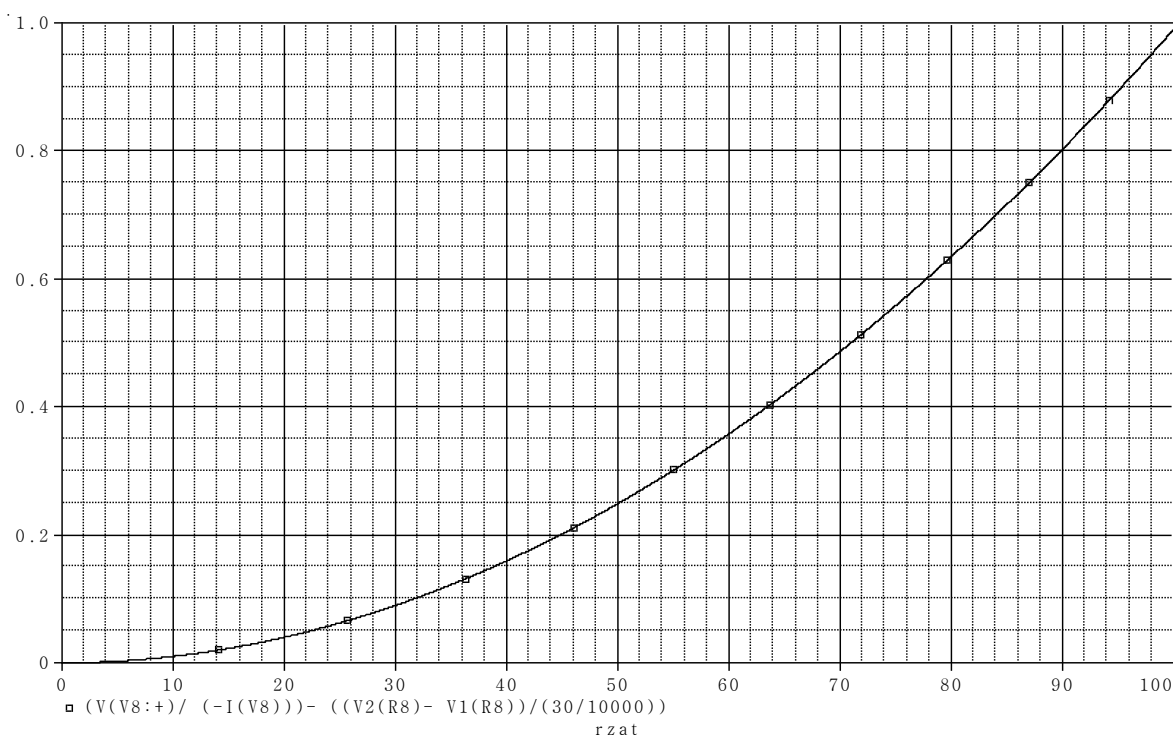
Postup výpočtu hodnoty odporu reproduktoru je uveden v rovnici (1):

$$R_{rep} = \frac{U_{R_{rep}}}{\frac{U_{zes}}{R_1}} \quad (1)$$

Nevýhodou této metody je malá přesnost měření. Ve vzorci pro výpočet odporu reproduktoru je ve jmenovateli výraz, který určuje velikost proudu, protékajícího obvodem. Není do něj započítána samozřejmě impedance reproduktoru, jehož impedance je neznámá a je zapojena sériově s předřadným odporem R_1 . Právě impedance reproduktoru ale zásadním způsobem ovlivňuje protékající proud. Přesnost je tedy dostačující pro hodnoty impedance v jednotkách ohmů, kdy změna proudu obvodem není příliš vysoká, měřený reproduktor může ovšem dosahovat absolutní hodnoty impedance až kolem 100Ω . Vzorec pro určení chyby způsobené tímto vlivem je uveden v rovnici (2).

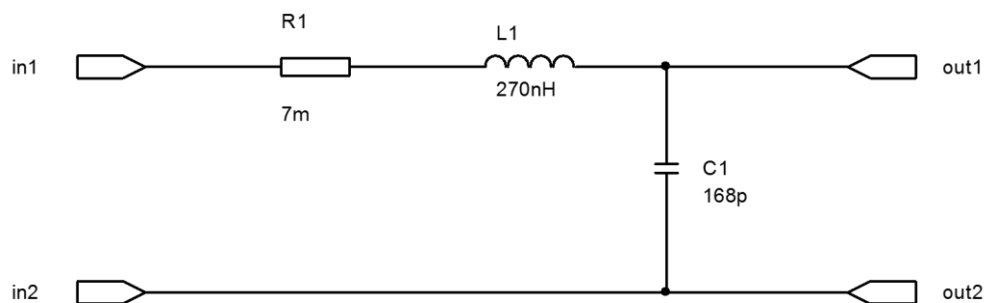
$$\Delta R_{rep} = \frac{R_{rep}^2}{R_1} \quad (2)$$

Jak můžeme vidět na *Obr. 3*, pro předřadný odpor $10 \text{ k}\Omega$ je chyba měření 100Ω zátěže 1Ω . Na ose X je vynesena skutečná hodnota odporu, na ose Y pak odchylka měřené hodnoty od skutečné.



Obr. 3: chyba metody konstantního proudu (pro $R_1=10 \text{ k}\Omega$). Osa y – chyba v Ω , osa x – velikost zatěžovacího odporu v Ω

Do měření se navíc započítávají impedance přírodních kabelů. Náhradní schéma kabelu je vidět na *Obr. 4*.



Obr. 4: Náhradní schéma kabelu

Hodnoty součástek v modelu byly převzaty z internetových stránek výrobce reproduktorových kabelů vysoké kvality [3] a jsou uvedeny na 1 metr délky kabelu, hodnoty námi používaných kabelů se mohou lišit.

Z náhradního schématu kabelu můžeme vypočítat jeho vstupní impedanci na prázdko a tím si utvořit představu o ovlivnění obvodu.

$$\overline{Z}_{in} = R_1 + \overline{Z}_L + \overline{Z}_C \quad (3)$$

$$\overline{Z}_{in} = R_1 + j \cdot \omega \cdot L + 1/(-j \cdot \omega \cdot C) \quad (4)$$

Reaktance kapacity a indukčnosti pro několik hodnot frekvence jsou uvedeny v tabulce Tabulka 1.

Tabulka 1: impedance prvků pro jednotlivé frekvence

F [Hz]	100	1000	20000
Z_c [Ω]	9,47M (-90°)	947k (-90°)	47,3k (-90°)
Z_l [Ω]	169 μ (90°)	1,7m (90°)	34m (90°)

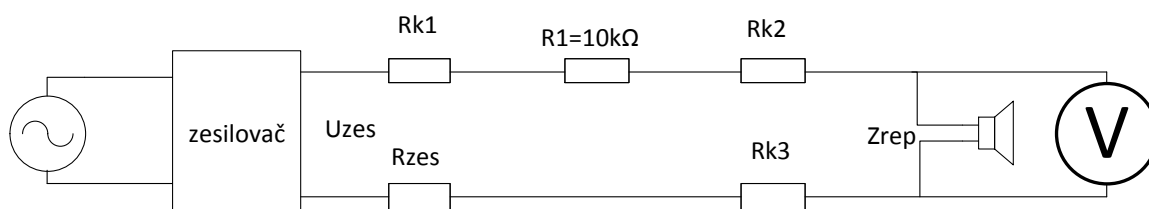
Z této tabulky vychází, že pro frekvence kolem 100 Hz je vliv impedancí prvků náhradního schématu zcela zanedbatelný, obzvlášť pokud při měření používáme velmi krátké kabely. Uvážíme-li, že rezonanční frekvence reproduktoru, kolem které měříme, se pohybuje většinou maximálně ve stovkách Hz, můžeme toto ovlivnění zanedbat. Mnohem větší vliv na měření bude mít odpor kabelu a přechodové odpory v zapojeném obvodu. Dalším ovlivňujícím činitelem je vnitřní impedance zesilovače, kterou můžeme změřit porovnáním napětí na svorkách zesilovači, který bude nezatížený a po zatížení známým odporem. Z Ohmova zákona poté dostaneme hodnotu impedance.

Pokud v této metodě započítáme chybu způsobenou odporem vedení a vnitřním odporem zesilovače, dostaneme vzorec pro výpočet celkové chyby měření při stejnosměrném výstupu.

Tento vzorec, jak bylo ukázáno výpočtem impedance kabelu, je použitelný s dostatečnou přesností i pro nízké kmitočty:

$$\Delta R_{rep} = \frac{R_{rep}(R_{k_{celk}} + R_{zes} + R_{rep})}{R_{k_{celk}} + R_1 + R_{zes}} \quad (5)$$

Schéma obvodu, v kterém jsou započítány všechny odpory kabelů (Rk1 – Rk3) a zesilovače (Rzes), je na Obr. 5.



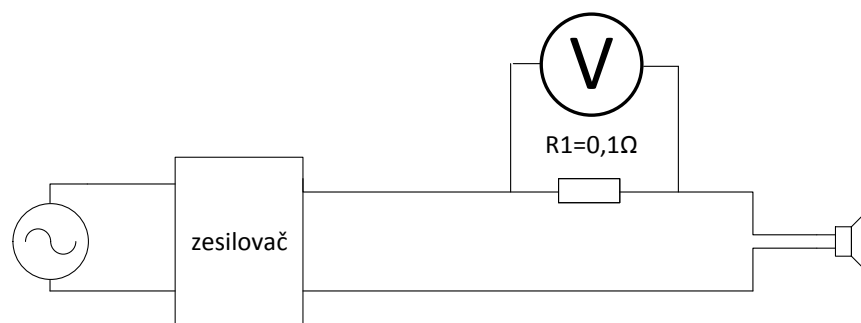
Obr. 5: metoda konst. I s odpory kabelů a zesilovače

Dále je nutné zmínit, že při použití odporu R_1 vysokých hodnot se sice snižuje chyba vlivem změny proudu, je ale potřeba použít zdroj (zesilovač) s dostatečně vysokým výstupním napětím, abychom dostali na svorkách reproduktoru takové napětí, které je ještě měřitelné s dostatečnou přesností námi použitým přístrojem. Dále, abychom dostali na reproduktoru stejnou hodnotu napětí při použití většího předřadného odporu, zvýší se i ztrátový výkon na odporu, který má za následek zvýšení jeho teploty, a tím změnu odporu a zvýšení chyby měření.

Z výše uvedených důvodů tato metoda nebyla použita v konečné realizaci přípravku.

Metoda konstantního napětí

V této metodě použijeme takové zapojení, které nám umožní předpokládat, že na svorkách reproduktoru je pro jakoukoliv hodnotu jeho impedance stejné napětí. Aby byla tato podmínka zajištěna, a zároveň jsme mohli zkoumat obvod pomocí voltmetru, zařadíme sériově k reproduktoru do obvodu odpor o velmi malé hodnotě. Schéma zapojení metody je na Obr. 6.



Obr. 6: Schéma metody konstantního napětí

Pomocí měření úbytku napětí na tomto odporu určíme proud obvodem, jak je zaznamenáno v rovnici (6). Pokud známe proud obvodem, můžeme z rovnice (7) určit odpor reproduktoru.

$$I = \frac{U_{R_1}}{R_1} \quad (6)$$

$$R_{rep} = \frac{U}{I} \quad (7)$$

Podobně jako u metody konstantního proudu zde vzniká chyba měření vlivem zjednodušení. Uvažujeme totiž v obvodu konstantní napětí, na odporu R_1 ale vzniká úbytek, který snižuje napětí na měřeném reproduktoru.

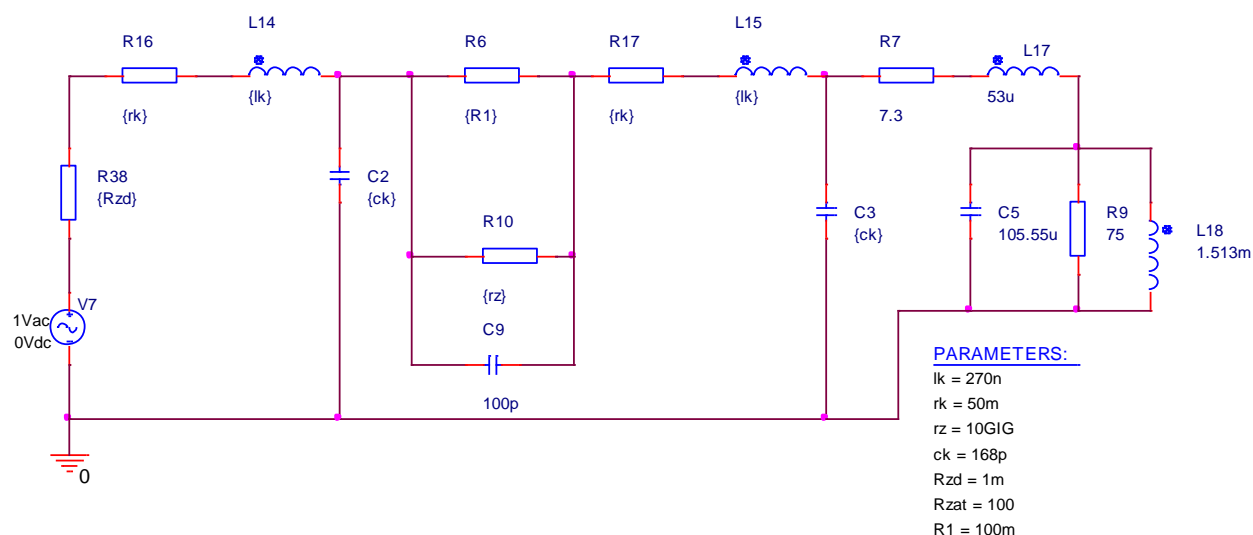
$$\Delta R_{rep} = R_1 \quad (8)$$

Budeme-li opět počítat s tím, že obvod není ideální a projevují se v něm vlivy odporu (impedance) kabelu, můžeme chybu při stejnosměrném napětí zapsat v rovnici (9). Umístění odporů kabelů a zesilovače je shodné s Obr. 1.

$$\Delta R_{rep} = R_1 + R_{k_{celk}} + R_{zes} \quad (9)$$

Přesnost této metody je vyšší a chyba při stejnosměrné analýze obvodu je velmi snadno korigovatelná. Pokud je hodnota předřadného odporu správně určena, můžeme obvod kalibrovat tak, že změříme odpor známého kalibračního odporu a skutečnou hodnotu odporu odečteme od naměřené. Získáme chybu měření, která je způsobena parazitními odpory v obvodu. Tuto zjištěnou chybu budeme poté odečítat od naměřených hodnot impedance reproduktoru.

V tomto případě je již relevantní zabývat se chybou měření, kterou způsobuje komplexní impedance kabelu. V programu PSpice byl namodelován obvod, pomocí kterého je na příkladu možno zjistit přesnou chybu měření při střídavé analýze, viz Obr. 7.

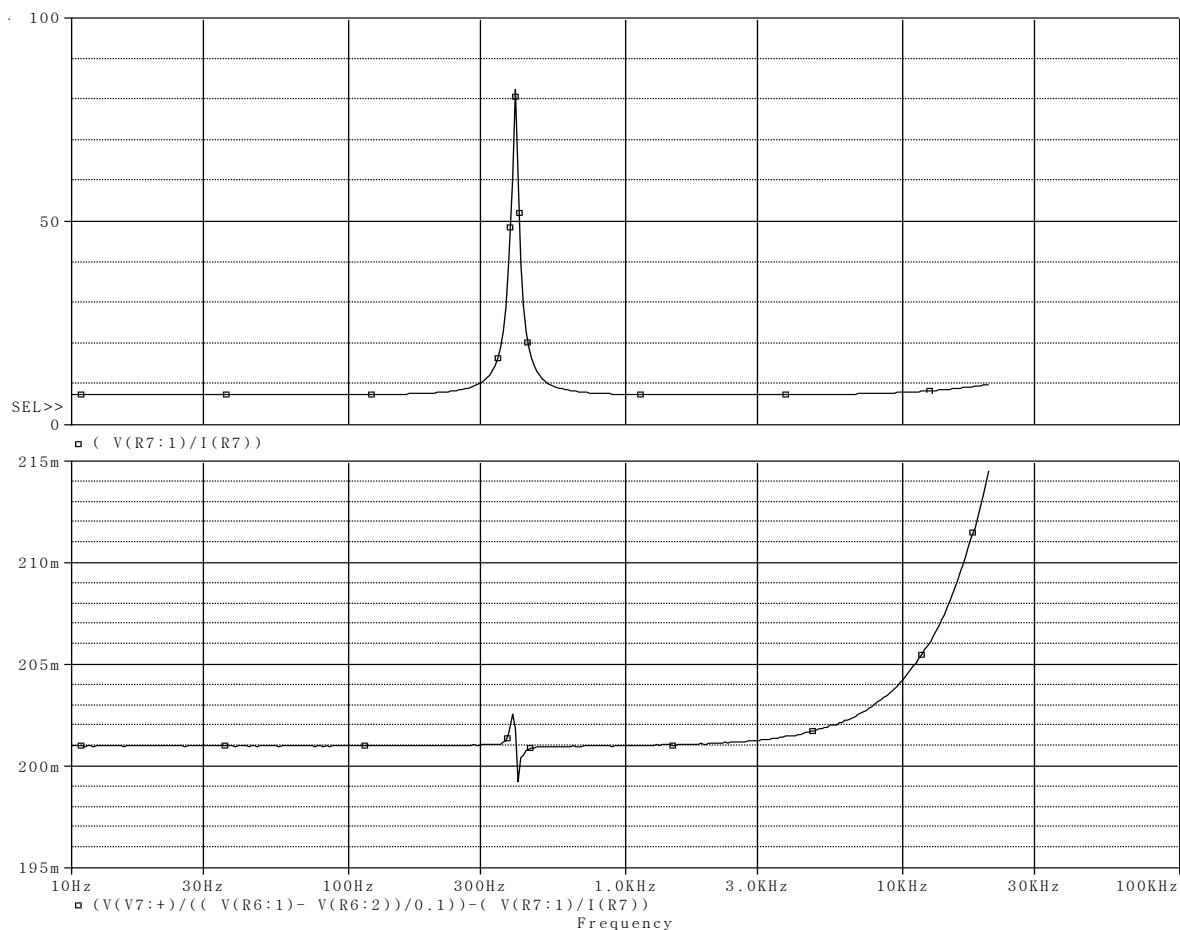


Obr. 7: měření konstant. U s modely reproduktoru a kabelů

Součástky s hodnotou $\{rk\}$, $\{lk\}$ a $\{ck\}$ tvoří model kabelu, odpor $R6$ představuje předřadný odpor o hodnotě 100 m Ω . K němu je paralelně připojen model měřicího přístroje, který má vnitřní impedanci tvořenou paralelní kombinací odporu 10 G Ω a kondenzátoru o kapacitě 100 pF. Hodnoty modelu přístroje vychází z konkrétních hodnot pro námi používaný měřicí přístroj, který bude popsán v dalších kapitolách. Součástky $R7$, $L17$, $C5$, $R9$ a $L18$ tvoří model reproduktoru. Součástky tohoto modelu byly vypočítány pro náhodně vybraný středotónový reproduktor z katalogu firmy Eminence [4]. Při výpočtu součástek bylo postupováno podle odborného článku na webu [5]. Odpor $R38$ reprezentuje v tomto schématu vnitřní odpor zdroje.

Chyba naměřené absolutní hodnoty impedance reproduktoru je vyjádřena na Obr. 8, kde v horní části obrázku je vynesena křivka skutečné absolutní hodnoty impedance reproduktoru a pod ní je vynesena chyba určení vyjádřená rozdílem skutečné hodnoty a hodnoty vypočtené podle rovnic (6) a (7).

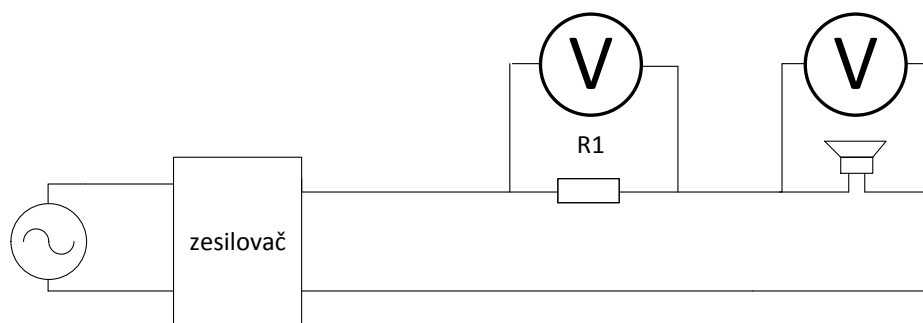
Tato metoda přináší znatelně lepší výsledky měření, než metoda konstantního proudu. Stále se v ní ovšem vyskytují chyby způsobené kabelem a předřadným odporem, které je možné alespoň částečně eliminovat, jak bude ukázáno v popisu následující měřicí metody.



Obr. 8: Skutečná hodnota impedance (nahore) a chyba měření metodou konstantního U (dole). Jednotkou osy y je Ω .

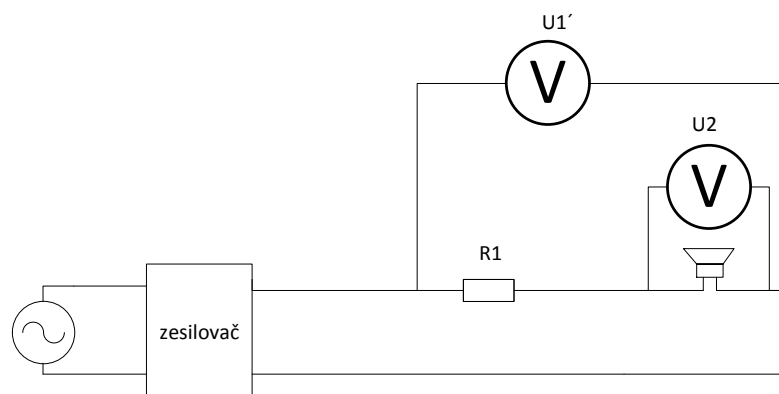
Srovnávací metoda

Určení odporu pomocí srovnávací metody je dosaženo sériovým zapojením předřadného odporu o známé hodnotě do obvodu s neznámým odporem a zdrojem napětí. Měříme potom úbytky napětí na těchto dvou odporech. V případě našeho měření nahradíme neznámý odpor reproduktorem. Schéma tohoto zapojení můžeme vidět na Obr. 9.



Obr. 9: srovnávací metoda

Tato metoda musela být pozměněna, protože přístroj, kterým mělo být měření realizováno, vyžaduje společné uzemnění, nebo společný vztažný bod, vůči kterému měříme rozdíl těchto dvou napětí. Z tohoto důvodu musel být metoda modifikována do podoby na Obr. 10.



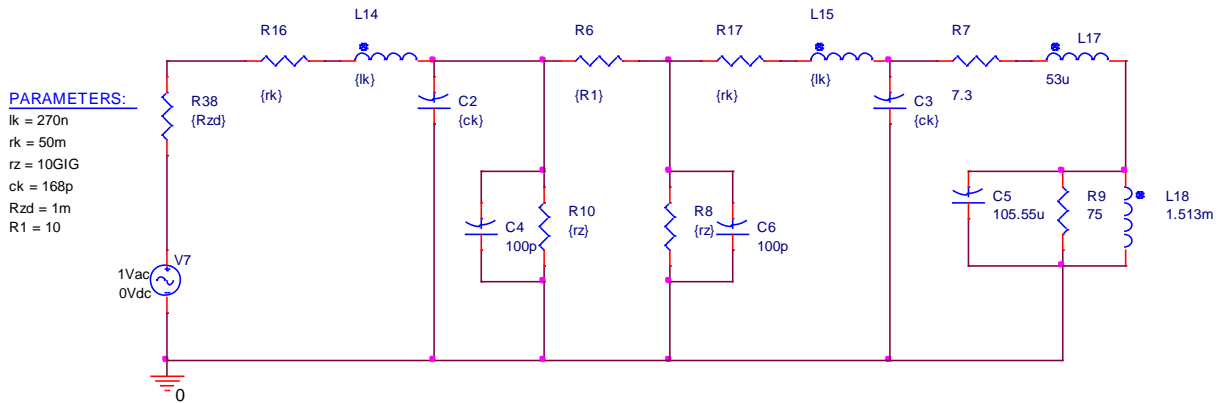
Obr. 10: modifikovaná srovnávací metoda

Podle tohoto schématu dostáváme postup výpočtu:

$$R_{rep} = \frac{R_1 U_2}{U_1' - U_2} \quad (10)$$

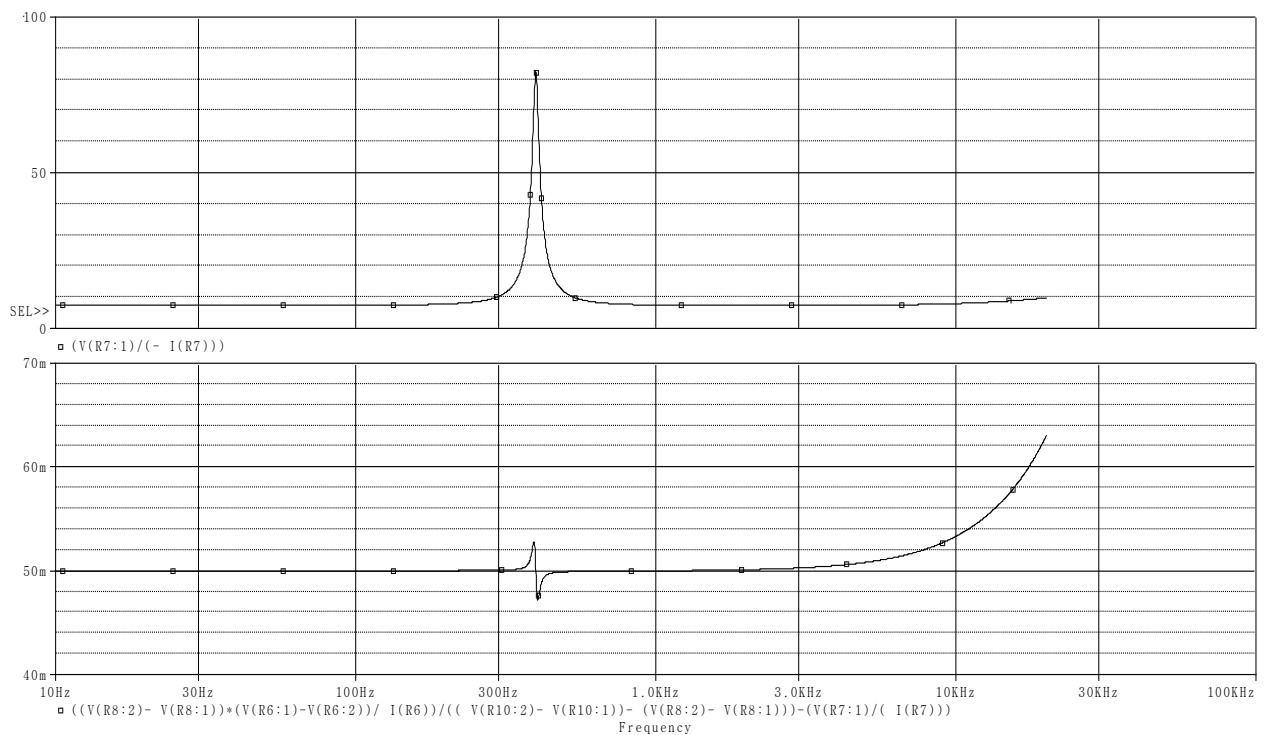
Výhodou této metody je, že odchylka měření teoreticky nezávisí na velikosti předřadného odporu.

Pokud budeme při simulování obvodu brát v potaz vliv impedance kabelu, chyba bude dána hodnotami prvků jeho náhradního schématu. Po nasimulování několika možných zapojení obvodu bylo zvoleno to, které je na Obr. 11. Obvod, který jsme zvolili, spočívá v připojení jednotlivých kanálů přístroje přímo na předřadný odpor tak, aby kolem předřadného odporu nevznikaly parazitní odpory, nebo impedance způsobené přítomností kabelu.



Obr. 11: Zapojení obvodu srovnávací metody s impedancemi kabelů a reproduktoru

Stejně jako u schématu předchozí metody jsou prvky o hodnotách {rk}, {lk} a {ck} reprezentací prvků náhradního schématu kabelu. Prvky {rz} spolu s paralelně zařazenou kapacitou 100 pF reprezentují vnitřní impedanci přístroje. Odpor o hodnotě {R1} je předřadný odpor a ostatní prvky jsou reprezentací reproduktoru.



Obr. 12: impedance reproduktoru (horní křivka), chyba určení impedance (spodní křivka). Jednotky osy y [Ω], osa x [Hz].

Z Obr. 12 je vidět, že chyba se pohybuje kolem 50 m Ω , což je odpor kabelu. Zdvih chyby nad frekvencí 3 kHz je dán indukčností a kapacitou kabelu. Na chybu má vliv pouze

kabel, kterým je propojen předřadný odpor s reproduktorem, čímž je tato metoda výhodnější, než ostatní metody, které byly dosud zmíněny. U nich totiž dochází ke vzniku chyby i vlivem kabelů, které vedou od zesilovače do přípravku a také vnitřní impedancí zesilovače.

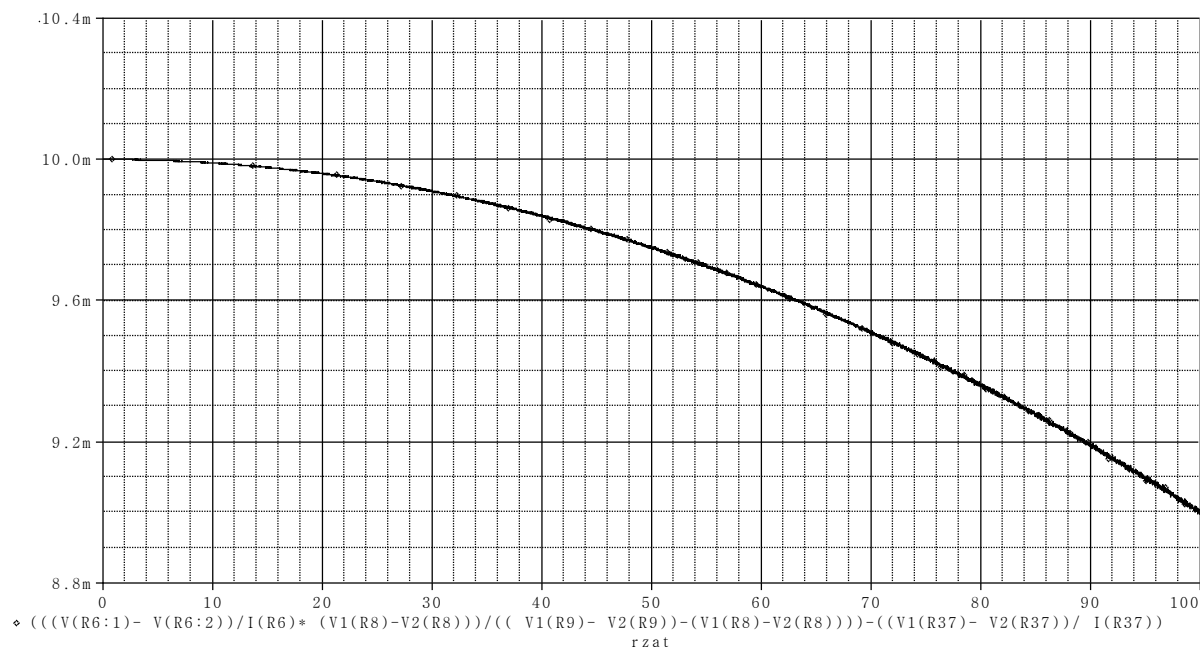
Ovlivnění impedancí kabelu je vyjádřeno v rovnici (11).

$$\Delta \bar{Z}_{rep} = R_k + \bar{Z}_{lk} + \frac{\bar{Z}_{rep} * \bar{Z}_{Ck}}{\bar{Z}_{Ck} + \bar{Z}_{rep}} - \bar{Z}_{rep} \quad (11)$$

Pokud bychom používali měřicí přístroj o vnitřní impedanci menší, než je uvedená na Obr. 11, například s odporem 1 MΩ, který má paralelně zařazenou kapacitu 100pF, do výsledků měření se výraznějším způsobem promítne také její vliv na měřenou hodnotu. Tento vliv je započítán v následující rovnici pro výpočet chyby měření. R_{in} je vnitřní odpor přístroje, C_{in} je vnitřní kapacita přístroje.

$$\Delta \bar{Z}_{rep} = \frac{\left(R_k + \bar{Z}_{lk} + \frac{\bar{Z}_{rep} * \bar{Z}_{Ck}}{\bar{Z}_{Ck} + \bar{Z}_{rep}} \right) * \frac{R_{in} * C_{in}}{R_{in} + C_{in}}}{\left(R_k + \bar{Z}_{lk} + \frac{\bar{Z}_{rep} * \bar{Z}_{Ck}}{\bar{Z}_{Ck} + \bar{Z}_{rep}} \right) + \frac{R_{in} * C_{in}}{R_{in} + C_{in}}} - \bar{Z}_{rep} \quad (12)$$

Závislost chyby na velikosti zatěžovacího odporu byla také nasimulována v programu PSpice a je vynesena na Obr. 13. Křivka chyby začíná na hodnotě 10 mΩ, což je způsobeno odporem kabelu. Pokud bychom vliv kabelu zanedbali, hodnota chyby by začínala v nule a rostla do záporných hodnot.



Obr. 13: závislost chyby na zatěžovacím odporu pro vnitřní odpor přístroje 1MΩ. na ose y je vynesena chyba v mΩ, na ose x velikost zatěž. odporu v Ω.

Vzhledem k tomu, že neměříme komplexní impedanci, ale pouze její absolutní hodnotu, není možné kompenzovat vliv indukčnosti a kapacity. Tyto vlivy ovšem výrazně nezasahují do výsledků měření. Vliv odporu je možné kompenzovat pomocí kalibrace měřicího přípravku.

Tato metoda je ze jmenovaných nejlepší možnou. Hlavními důvody je nezávislost přesnosti měření na zvolené velikosti předřadného odporu a ovlivnění chyby měření pouze částí kabelu, resp. pouze kabelem, který vede mezi přípravkem a reproduktorem. Proto byla tato metoda použita pro tvorbu přípravku.

2.2 Tepelná závislost a kalibrace přípravku pro srovnávací metodu

Výše byly uvedeny chyby měření, které nastávají při určování impedance reproduktoru. Výraznější chybu představuje odpor reproduktorového kabelu a také přechodové odpory ve spojích mezi kabelem a reproduktorem. Odpor kabelu je možné před měřením TS parametrů naměřit například 4 vodičovým ohmmetrem. Tento odpor je ale také teplotně závislý, což je vyjádřeno vzorcem (13)

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (13)$$

Symbol α zde značí teplotní koeficient elektrického odporu, který je udáván v jednotkách K^{-1} . Pro měď má hodnotu $4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$. Δt [K] udává změnu teploty a R_0 představuje počáteční odpor.

Tento jev se nejvíce projevuje na styku 2 vodičů, kde je přítomen přechodový odpor, tedy například na spoji mezi reproduktorovým kabelem a připojeným reproduktorem. Toto spojení budeme realizovat konektorem typu „banánek“. Přechodový odpor běžně dostupného konektoru tohoto typu je dle internetového obchodu [6] 5 m Ω . Jak bude popsáno v kapitole 3.1, součástí měření je i zahřívání reproduktoru výkonem rovným $\frac{1}{4}$ jmenovitého příkonu reproduktoru. Pokud například na 4 Ω zátěž budeme přivádět výkon 20 W, efektivní hodnota proudu obvodem bude přibližně 2,23 A. Tento proud vytvoří na přechodovém odporu konektoru ztrátový výkon 24 mW, který se vyzáří v podobě tepla. Z dostupných údajů nelze jednoduchým způsobem zjistit přesné oteplení vodiče, ale lze předpokládat, že se nebude jednat o rozdíl teplot větší, než 10 $^{\circ}C$. Pro extrémní případ, kdy přechodový odpor bude větší, nebo dojde ke změně okolní teploty, můžeme uvažovat oteplení o 30 $^{\circ}C$.

Při oteplení o 30 °C můžeme podle vzorce (20) určit změnu přechodového odporu. Z původní hodnoty 5 mΩ dostaneme po ohřátí velikost přechodového odporu 5,6 mΩ.

K mírnému oteplení může dojít i u reproduktorového kabelu. Pokud ale zvolíme dostatečnou tloušťku kabelu, oteplení vlivem protékajícího proudu bude minimální. Pro vyhotovení přípravku byl použit měděný kabel o průměru žíly 4 mm², délka kabelu mezi přípravkem a reproduktorem je 1 m. jeho odpor můžeme spočítat z následujícího vzorce:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (14)$$

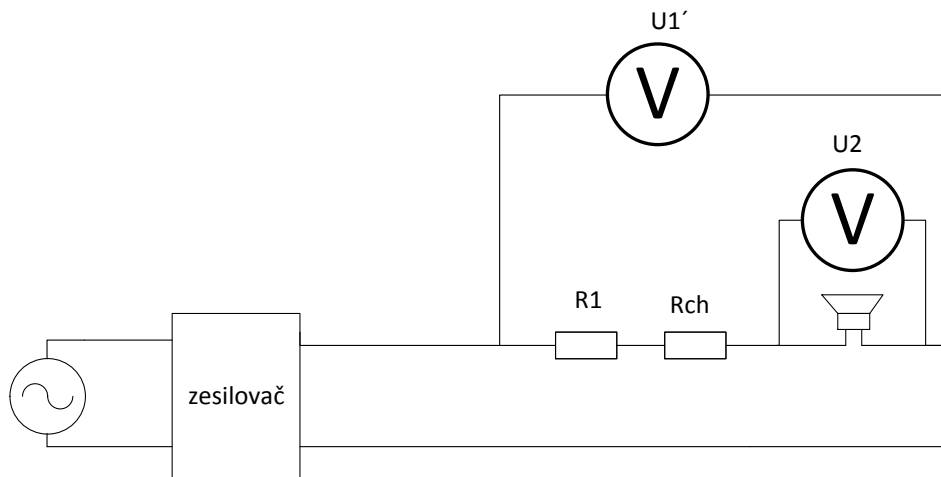
ρ [$\mu\Omega\text{cm}$] je značka měrného odporu, l [cm] je délka vodiče a S [cm²] je jeho průřez. Hodnota ρ pro měď je 1,75 $\mu\Omega\text{cm}$. Pro zvolený kabel dostáváme tedy hodnotu odporu 4,375 mΩ. pokud budeme počítat s oteplením kabelu 10 °C, zvedne se jeho hodnota na 4,55 mΩ.

Z hodnot změny odporu kabelu a přechodových odporů můžeme dojít k závěru, že tyto změny se nepodílejí výrazným způsobem na chybě měření. Jak bylo totiž ukázáno, celková chyba po oteplení 2 konektorů a kabelu bude dosahovat cca 1 mΩ, a to pro velice extrémní případ podmínek měření.

Mnohem větší vliv na měření ovšem má tepelná závislost velikosti předřadného odporu. V přípravku je umístěn 56Ω odpor, který má teplotní koeficient elektrického odporu α dle datového listu typicky 100 ppm/K, maximálně pak 300 ppm/K.

Abychom si udělali představu o ztrátovém výkonu, který bude tímto odporem vyzařován, budeme uvažovat, že na 4Ω zátěž přivádíme napětí o efektivní hodnotě 0,1 V. Efektivní hodnota napětí před předřadným odporem musí být tedy 1,5 V. Úbytek napětí na 56Ω odporu bude 1,4 V, výkonová ztráta na něm je tím pádem 0,035 W. Nejedná se o vysokou hodnotu, ale velikost ztrátového výkonu roste exponenciálně s napětím, tzn. při napětí 1 V na zátěži bude ztrátový výkon na odporu 3,5 W. Při takové hodnotě ztrátového výkonu se teplota odporu zvýší až o 120 °C, jak je ukázáno v datovém listu [7]. Takové zvýšení teploty by mělo za následek zvýšení odporu o 2,016 Ω, což vychází z hodnoty $\alpha = 300$ ppm/K a výpočtu ze vzorce (13). Tato změna odporu by měla za následek prudký vzrůst chyby měření. Nicméně i zvýšení teploty předřadného odporu o 10°C již přináší znatelnou chybu měření.

Při odvození chyby, způsobené změnou velikosti předřadného odporu, budeme vycházet z rovnice (10). Zvětšení hodnoty předřadného odporu, který v této rovnici figuruje jako R_1 , vyjádříme přičtením odporu R_{ch} k R_1 . Náhradní schéma výsledného zapojení je uvedeno na Obr. 14.



Obr. 14: náhradní schéma srovnávací metody s teplotním vlivem na velikost R_1

Výsledný vzorec pro výpočet R_{rep} je vyjádřen v následující rovnici

$$R_{rep} = \frac{(R_1 + R_{ch})U_2}{U_1' - U_2} \quad (15)$$

Vzhledem k tomu, že hodnotu R_{ch} neznáme, musíme ji zjistit kalibrační přípravku, aby bylo možné přesně určit hodnotu R_{rep} .

Postup kalibrace

Na konstrukci přípravku musíme ještě před započítím prvního měřicího procesu změřit 4 vodičovou metodou přesnou hodnotu předřadného odporu a odporu kabelu s přechodovými odpory za běžných podmínek. Dle rovnice (10) budeme díky znalosti velikosti předřadného odporu určovat hodnotu impedance připojeného reproduktoru. Naměřenou hodnotu odporu kabelu budeme odčítat od naměřené hodnoty, jak bylo uvedeno v rovnici (11). Toto měření není nutné provádět před každým měřením, jak bylo totiž dokázáno v této kapitole, teplotní závislost odporu vodičů výrazným způsobem neovlivňuje naměřené hodnoty. Důvodem pro opakování měření odporu kabelu může být ale například oxidace stykových ploch materiálu a tím zvýšení přechodového odporu. Poté správnost měření přípravku ověříme proměřením odporů se známou hodnotou a provedeme případné korekce měření.

Pokud chceme zjistit chybu způsobenou oteplením předřadného odporu, provedeme měření kalibračního odporu přípravkem. Ve výpočtu velikosti zátěže počítáme s velikostí předřadného odporu, kterou jsme naměřili před jeho ohřátím, což způsobí měřicí chybu o

velikosti ΔR_{rep} . Ta se rovná rozdílu skutečné hodnoty kalibračního odporu (R_{kal}) a naměřené hodnoty ($R_{měř}$). To vyjádříme rovnicí

$$\Delta R_{rep} = R_{kal} - R_{měř} \quad (16)$$

Chybu vyjádříme pomocí rovnice (17).

$$\Delta R_{rep} = \frac{(R_1 + R_{ch})U_2}{U_1' - U_2} - \frac{R_1 U_2}{U_1' - U_2} \quad (17)$$

Hodnota přidaného odporu R_{ch} je jediná neznáma veličina v této rovnici, proto ji vyjádříme.

$$R_{ch} = \frac{\Delta R_{rep}(U_1 - U_2)}{U_2} \quad (18)$$

Hodnotu tohoto odporu poté přičteme k odporu R_1 , s pomocí kterého vypočítáváme hodnotu impedance podle vzorce (10).

V reálných podmínkách je ale využití této kalibrace účelné pouze při dlouhodobé změně teploty přípravku, například vlivem klimatických podmínek. Nevhodnost použití při měření lze odůvodnit tím, že prováděná měření jsou velmi krátká (cca 30 vteřin) a jsou prováděna při velmi malých výstupních výkonech. Díky tomu nedochází vlivem tepelné setrvačnosti předřadného výkonového odporu k výraznějšímu zahřátí. K zahřátí navíc dochází pouze během měření, takže teplota se během měřicího cyklu mění a nemůžeme ji touto kalibrací korigovat pro celou dobu, po kterou měření probíhalo.

Závěrem lze vyslovit doporučení, že měření by mělo probíhat za stálých klimatických podmínek, za teploty, při které byla měřena hodnota předřadného odporu, tedy cca 21 °C.

2.3 Postup určení TS parametrů

V kapitole 2.1 byly popsány možné metody měření impedanční charakteristiky. Nyní se budeme zabývat možnostmi určení některých TS parametrů s využitím výsledků tohoto měření.

Postup měření a určování TS parametrů vychází z metody popsané v publikaci o měření TS parametrů bez použití reproboxu [8]. Tato metoda vychází z původních publikací A. N. Thieleho a R. H. Smalla.

Tito autoři ovšem popisovali způsob měření, při kterém se nejprve změří charakteristika pro reproduktor, který je volně položen na pevné podložce s membránou mířící vzhůru a poté je měřen v testovacím reproboxu, který má za úkol měnit C_{ms} , aby bylo možné dopočítat další parametry. Tato technika je přejatá i v normě [2], kde je použita pro určení V_{as} . Stejného efektu je ovšem možné dosáhnout pouhým zatížením membrány reproduktoru drobným závažím o známé hmotnosti. Technika přidané hmotnosti byla přejata i pro zpracování této diplomové práce.

Zátěž by na reproduktoru měla být uchycena, aby vlivem setrvačnosti při kmitech nenadskakovala. Tím by na membránu nepůsobila rovnoměrně a docházelo by ke zkreslení měření. Jako zátěž je tedy vhodné použít přilnavou hmotu, která nemůže poškodit membránu po jejím odejmutí. Její hmotnost by dle článku [8] měla být kolem 2 g. Velikost a místo, kam zátěž na membráně připevníme, také ovlivňuje výsledky měření, nicméně bylo autorem článku zjištěno, že použitím velmi malého předmětu jsou tyto vlivy minimalizovány.

Celkem tedy musí být provedeny 2 měření. Jedno měření ve volném prostoru bez závaží a poté s přidaným závažím. Tímto získáme 2 křivky vyjadřující závislost absolutní hodnoty impedance na frekvenci.

Také je potřebné změřit stejnosměrný odpor reproduktoru, to může být provedeno před připojením do měřicího aparátu pomocí ohmmetru.

Tímto měřením získáme pro reproduktor bez zátěže následující parametry: f_s , což je rezonanční kmitočet reproduktoru, R_e , což je stejnosměrný odpor, dále dostaneme poměr impedance na rezonančním kmitočtu k stejnosměrnému odporu r_0 .

$$r_0 = \frac{Z_{max}}{R_e} \quad (19)$$

Z tabulky závislosti impedance na frekvenci zjistíme frekvence f_{1s} a f_{2s} , pro které platí, že hodnota impedance na těchto frekvencích dosahuje hodnoty v rovnici (20).

$$|Z| = \sqrt{r_0} R_e \quad (20)$$

Potom můžeme určit metodou popsanou v článku [9] mechanický činitel jakosti Q_{ms} a elektrický činitel jakosti Q_{es} . Z nich pak určíme celkový činitel jakosti Q_{ts} .

$$Q_{ms} = \frac{f_s * \sqrt{r_0}}{f_{2s} - f_{1s}} \quad (21)$$

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1} \quad (22)$$

$$Q_{ts} = \frac{1}{\sqrt{r_0}} \left(\frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_2 - f_1} \right) \quad (23)$$

Proceduru poté zopakujeme s připevněnou zátěží a stejným způsobem získáme tyto veličiny a označíme je indexem m. Poté budeme postupovat podle článku [8] a postupně určíme ekvivalentní objem V_{as} .

$$T_s^2 = \left(\frac{1}{2\pi f_s} \right)^2 = C_{as} M_{as} \quad (24)$$

$$M_{as} = \frac{M_{ms}}{S_d^2} \quad (25)$$

Kde M_{ms} je hmotnost membrány včetně zátěže vzduchu. Když uchytíme malé závaží na membránu, o jeho hmotnost zvýšíme M_{ms} . Rezonanční frekvence bude poté dána:

$$T_{sm}^2 = \left(\frac{1}{2\pi f_{sm}} \right)^2 = \frac{C_{as}(M_{ms} + m)}{S_d^2} \quad (26)$$

Vydělením T_{sm}^2/T_s^2 můžeme dostat M_{ms} :

$$M_{ms} = \frac{m}{\left(\frac{f_s}{f_{sm}} \right)^2 - 1} \quad (27)$$

Substitucí M_{ms} v rovnici (25) a potom M_{as} v rovnici (24) můžeme dostat C_{as} :

$$C_{as} = \frac{S_d^2}{4\pi^2 m} \left(\frac{1}{f_{sm}^2} - \frac{1}{f_s^2} \right) \quad (28)$$

Potom z rovnice, kterou uvádí Small, dostaneme V_{as} :

$$V_{as} = \rho_0 c^2 C_{as} \quad (29)$$

Kde ρ_0 [g/cm³] je hustota vzduchu a c [cm/s] je rychlost zvuku ve vzduchu. Potom pro V_{as} platí:

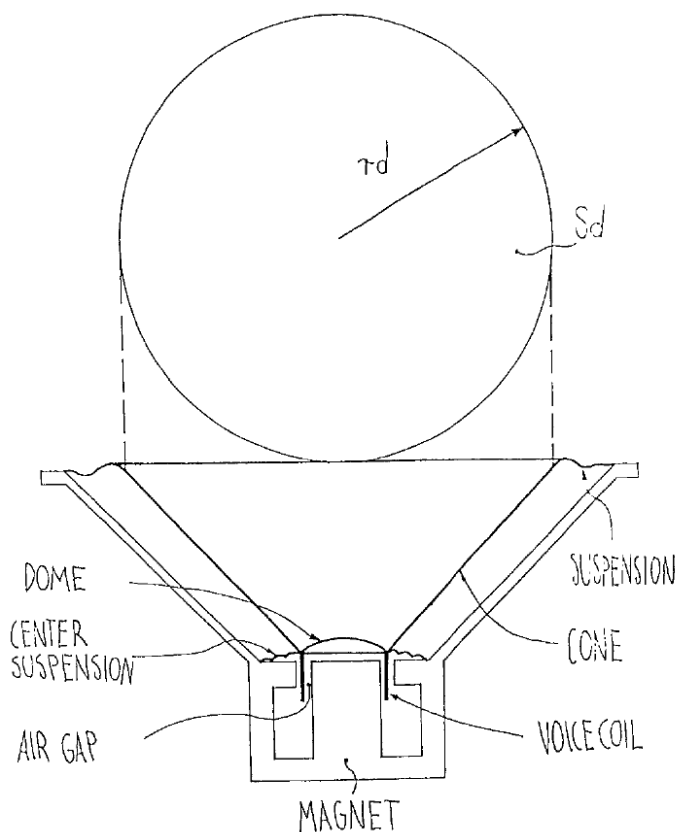
$$V_{as} = \frac{\rho_0 c^2 S_d^2}{4\pi^2 m} \left(\frac{1}{f_{sm}^2} - \frac{1}{f_s^2} \right) \quad (30)$$

Kde:

$$\rho_0 = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$c = 3,45 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$$

S_d [cm²] je efektivní plocha membrány reproduktoru. Tato oblast je vyznačena na Obr. 15, m [g] je hmotnost závaží na membráně.



Obr. 15: určení aktivní plochy reproduktoru (převzato z [8])

Pokud je reproduktor kruhového tvaru, platí pro V_{as} :

$$V_{as} = 351123,75 \frac{r_d^4}{m} \left(\frac{1}{f_{sm}^2} - \frac{1}{f_s^2} \right) \quad (31)$$

r_d [cm] je efektivní poloměr reproduktoru.

Z článku [8] vyplývá, že zátěž, která musí být nemagnetická, by měla být umístěna co nejbliž k cívice reproduktoru. Zátěž musí být malá vůči hmotnosti membrány, což je zde definováno tak, že změna rezonanční frekvence po jejím umístění na reproduktor musí být menší, než 10 %.

Dále je možné dle článku [10] určit účinnost η_0 [%] a citlivost SPL [dB] reproduktoru.

$$\eta_0 = \left(\frac{f_s^3 V_{as}}{Q_{es}} \right) 2,7 * 10^{-6} \quad (32)$$

$$SPL = 10 \log_{10} (\eta_0 1,64 * 10^9) \quad (33)$$

3 Konstrukce přípravku pro měření TS parametrů

3.1 Cíle návrhu

Účelem této diplomové práce je vytvořit spolehlivou metodu pro měření TS parametrů reproduktorů. Zároveň bylo požadováno, aby měření bylo co možná nejvíce automatizováno, tzn. aby bylo proveditelné bez větších zásahů obsluhy během měřicího procesu.

Vlastností přípravku mělo být také to, aby byl schopen po dobu 10 minut před samotným měřením impedanční charakteristiky dodávat do reproduktoru růžový šum o výkonu $\frac{1}{4}$ jmenovitého výkonu reproduktoru. Důvodem tohoto požadavku je existence termální výkonové komprese, což je jev, který nastává vlivem ohřátí reproduktoru ztrátovým výkonem. To má pak za následek změnu chování jeho magnetického obvodu a tím i změnu elektricko-akustických vlastností. Zahřátím reproduktoru simulujeme podmínky běžného provozu reproduktoru. Při tomto způsobu měření je také kritickým faktorem čas, za který proběhne měření impedance, už po minutě je totiž velmi znatelný vliv chladnutí magnetického obvodu a tím změna rezonančního kmitočtu a impedance měniče.

Původně měl být k měření na přípravku použit přístroj BK Pulse, po konzultaci s vedoucím práce ale bylo přistoupeno k použití měřicí karty USB-6221BNC od firmy National Instruments. Důvodem je nižší cena tohoto zařízení vůči ceně analyzátoru Pulse. Použitím této karty se softwarem Labview získáme navíc výhodu snadné konfigurovatelnosti měřicího procesu. Karta disponuje 2 analogovými výstupy, až 8 analogovými vstupy a také digitálními výstupy.

V softwaru Labview můžeme za pomoci této karty navrhnout měření, které od obsluhy nebude vyžadovat zásahy v podobě přepojování kabelů mezi procesy zahřívání a samotného měření. Funkcemi zabudovanými v tomto softwaru je dále možné generovat analogové průběhy pro měření, získávat data z měření a dále je zpracovávat.

3.2 Vlastnosti měřicí karty NI USB-6221BNC

V tabulce jsou rozepsány vlastnosti této karty relevantní pro návrh přípravku (zdroj [11]):

Tabulka 2: Vlastnosti měřicí karty NI USB-6221BNC

Rozlišení analog. vstupů AI a výstupů AO	16 bitů
Vlastnosti analogových vstupů:	
Vzorkovací frekvence AI	250 kS/s
Vazba vstupů	DC
Maximální pracovní napětí (signál + souhlasné rušení)	±11 V vůči AI GND
CMRR	92 dB
Vstupní impedance v zapnutém stavu	>10 GΩ paralelně s 100 pF
Přeslech na 100kHz na sousedních kanálech	-75 dB
Přeslech na 100kHz na nesousedních kanálech	-90 dB
Přepět'ová ochrana v zapnutém stavu	±25 V až pro 2 AI piny
Přepět'ová ochrana ve vypnutém stavu	±15 V až pro 2 AI piny
Vstupní rozsahy	±10 V, ±5 V, ±1 V, ±0,2 V
Vlastnosti analogových výstupů	
Počet analogových výstupů	2
Vzorkovací frekvence výstupů AO	833 kS/s
Výstupní rozsah	±10 V
Výstupní proud	±5 mA
Výstupní impedance	0,2 Ω
Vazba výstupů	DC
Vlastnosti digitálních vstupů a výstupů	
Počet digitálních výstupů/ vstupů	24 (8 BNC, 8 časovaných)
Reference (zem)	D GND
Pull-down resistor	50 kΩ typicky, 20kΩ minimum
Ochrana vstupního napětí	±20 V až na 2 pinech zároveň

Ze stránek výrobce [11] byly také zjištěny údaje o přesnosti měření pro jednotlivé rozsahy analogových vstupů.

Tabulka 3: nepřesnosti měření

Rozsah	Náhodný šum, σ (μVrms)	Absolutní přesnost na plném rozsahu (μV)	Citlivost (μV)
$\pm 10\text{ V}$	244	3100	97,6
$\pm 5\text{ V}$	122	1620	48,8
$\pm 1\text{ V}$	30	360	12
$\pm 0,2\text{ V}$	13	112	5,2

3.3 Návrh přípravku

Návrh fyzické podoby přípravku vychází ze zvoleného způsobu měření impedanční křivky. Tím je srovnávací metoda (viz kapitola 1.2).

Aby byla přesnost metody co nejvyšší, jsou kanály měřicího přístroje připojeny přímo na vývody předřadného odporu, jak je uvedeno na *Obr. 11*. Jeho hodnota byla stanovena na $56\ \Omega$. Při jeho určování jsme vycházeli z faktu, že jeho velikost sice neovlivňuje přímo přesnost metody, ale impedanci reproduktoru určujeme z rozdílu napětí na vývodech tohoto odporu. Zvýšením jeho hodnoty tedy zvýšíme i úbytek na odporu a při správné volbě vstupních rozsahů na jednotlivých kanálech měřicího přístroje zvýšíme odstup signálu od šumu a tím částečně eliminujeme náhodné chyby v měření.

Oba kanály přístroje jsou vztaženy k hodnotě napětí na záporném vývodu reproduktoru, tím je částečně eliminován vliv kabelu, který propojuje přípravek s reproduktorem. Vliv kabelu spojujícího zesilovač a přípravek na výsledky měření je zcela eliminován, jeho vlastnosti ovlivňují pouze zatížení zesilovače.

Požadavek na schopnost provádět s připojeným přípravkem zahřívání reproduktoru, jak bylo popsáno v kapitole 3.1, byl vyřešen zkratováním předřadného odporu pomocí relé K2, jak je označené ve schématu zapojení na *Obr. 16*. Tím je umožněno přivádět do reproduktoru vyšší výkon, než by bylo možné s připojeným předřadným odporem. Pomocí relé K2 je zároveň zajištěno připnutí k měřicímu přístroji, když nedochází k zahřívání.

Z důvodu, že maximum vstupního napětí měřicí karty je 10 V , bylo potřeba řešit situaci, kdy budeme muset například pro zahřívání reproduktoru použít vyšší výstupní napětí zesilovače. K omezení vstupního napětí na měřicím přístroji byl použit odporový dělič tvořený odpory R7 a R8, jehož jeden vývod je zapojen na předřadný odpor na straně zesilovače, druhý vývod je zapojen na reproduktorový kabel, který vede mezi záporným

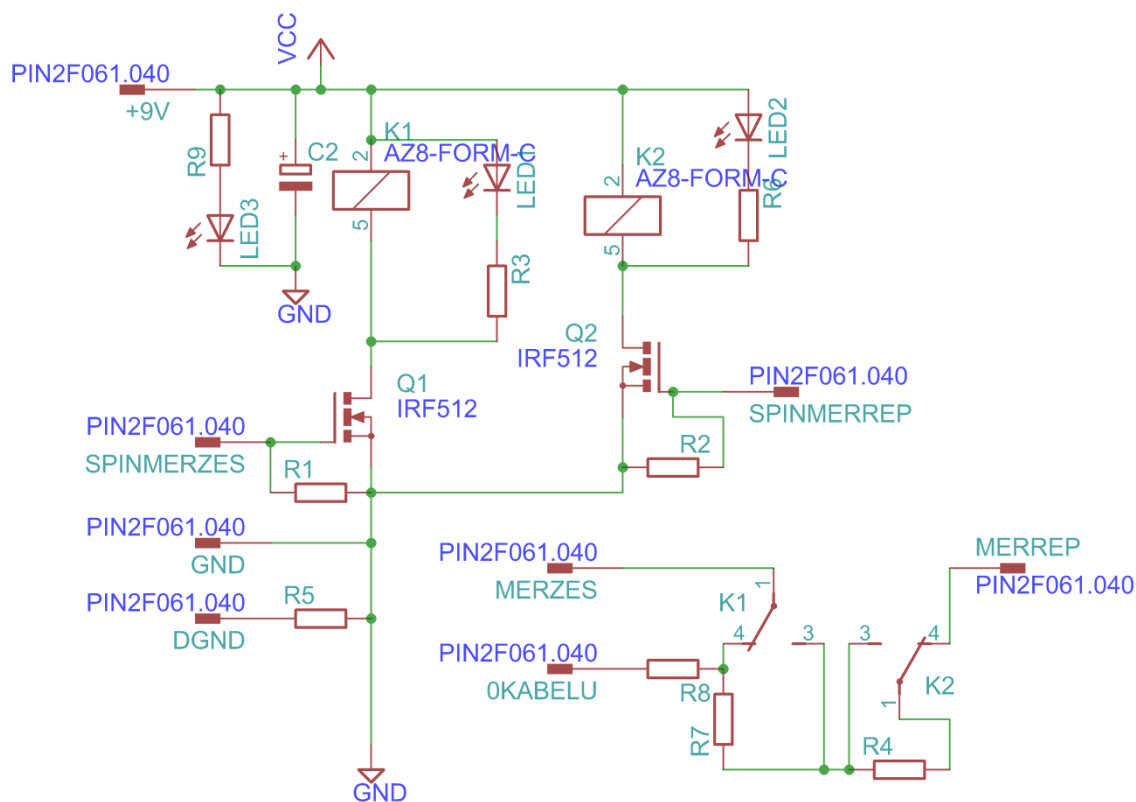
vývodem zesilovače a reproduktorem. Hodnoty odporů jsou: $R_7=100\ \Omega$, $R_8=560\ \Omega$, dělicí poměr je tedy 1:6,6. Jeho přesná hodnota ovšem musí být kalibrována například porovnáním hodnoty získané měřením plným rozsahem a rozsahem regulovaným děličem. Hodnoty odporů v děliči byly zvoleny záměrně s relativně malými hodnotami, protože v manuálu k přístroji je uvedeno, že pro vyšší hodnoty impedance, na kterou připojujeme přístroj, dochází k ovlivnění měřené hodnoty vlivem vlastností vstupního multiplexeru přístroje. Doporučená maximální hodnota impedance je $1\text{k}\Omega$. Tento požadavek je tedy splněn.

Obě relé jsou napájena přes porty +9V a GND, které jsou zakresleny ve schématu. Jejich spínání je zajištěno porty SPINMERZES a SPINMERREP, které jsou připojeny na spínací NMOS tranzistory Q1 a Q2, které při připojení napětí na gate přes vstupní porty přepnou relé. Vzhledem k tomu, že tyto tranzistory mají vysokou vstupní impedanci, k zabránění samovolného přepínání relé, například při odpojení přípravku od karty, jsou použity pull-down odpory R1 a R2 o hodnotách $1\ \text{M}\Omega$. Pro indikaci přepnutí relé jsou použity LED diody LED1 a LED2 s předřadnými odpory R3 a R6.

K indikaci přítomnosti napájecího napětí slouží LED dioda, označená ve schématu jako LED3 s předřadným odporem R9. K zajištění blokování napájecího napětí je použit kondenzátor C2.

Napájení by mělo být zajištěno pomocí napájecího adaptéru se stejnosměrným napětím 9-12 V, který se připojuje pomocí konektoru 2,1mm s kladným pólem uprostřed.

Přípravek je umístěn v konstrukční krabičce, na které se nacházejí konektory pro propojení s měřicí kartou a připojení napájení.

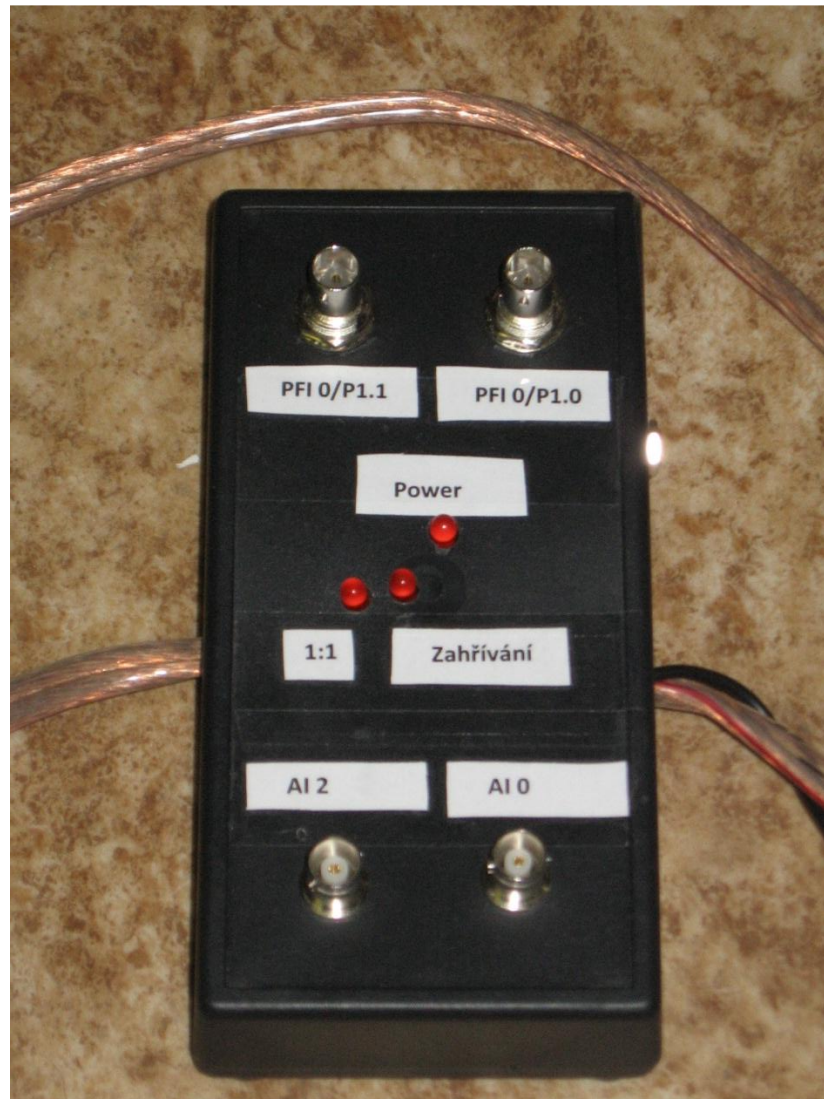


Obr. 16: Schéma přípravku

3.4 Propojení přípravku a měřicí karty

Přípravek má na sobě umístěny 2 analogové výstupy, které jsou v provedení konektoru BNC na panelu přípravku. Ty jsou připojeny na analogové vstupy 0 a 2 měřicí karty. Jsou použity nesousedící vstupy, protože mají menší hodnotu přeslechů, jak je uvedeno v Tabulka 2.

Dále jsou na přípravku 2 digitální vstupy, které zajišťují spínání relé. Připojují se k digitálním portům 0 a 1 taktéž pomocí konektorů BNC.



Obr. 17: zhotovený přípravek

4 Tvorba měřicí aplikace

Jak bylo popsáno, přípravek je navržen pro použití s aplikací Labview a měřicí kartou od firmy National instruments. Prostředí Labview umožňuje vývojáři grafické programování, včetně virtuálního ovládání přístrojů. Tímto způsobem je možné simulovat přední panel běžných měřicích přístrojů. V prostředí Labview je možné libovolně vytvářet měřicí sekvence a provádět operace se signály a proměnnými, včetně pokročilých funkcí, jako frekvenční analýza, nebo filtrace. Výhoda tohoto způsobu měření je ve velké flexibilitě měřicí konfigurace a snadnosti tvorby specializovaných měřicích úloh.

4.1 Návrh měřicí sekvence

Sekvence navrhované aplikace má několik po sobě jdoucích částí. Nejprve je nutné provádět zahřívání reproduktoru po dobu 10 minut $\frac{1}{4}$ jeho jmenovitého příkonu. Poté se provádí měření impedanční charakteristiky reproduktoru bez mechanické zátěže na membráně reproduktoru. Výstupem tohoto měření pro určení TS parametrů je f_s , Z_{\max} , f_1 a f_2 . Z nich je dále možné vypočítat Q_{ms} a Q_{es} .

Další parametry zjistíme následným měřením reproduktoru po připevnění drobného mechanického závaží na membránu reproduktoru. Před tímto měřením je vhodné opět provést zahřívání, abychom zajistili stejnou teplotu cívky reproduktoru, jako při prvním měření. Měřením se závažím zjistíme rezonanční frekvenci, která vykazuje změnu oproti původní hodnotě. Ze známé hmotnosti závaží a znalosti rezonančních frekvencí je možné dopočítat parametry C_{as} , M_{as} , M_{ms} , V_{as} .

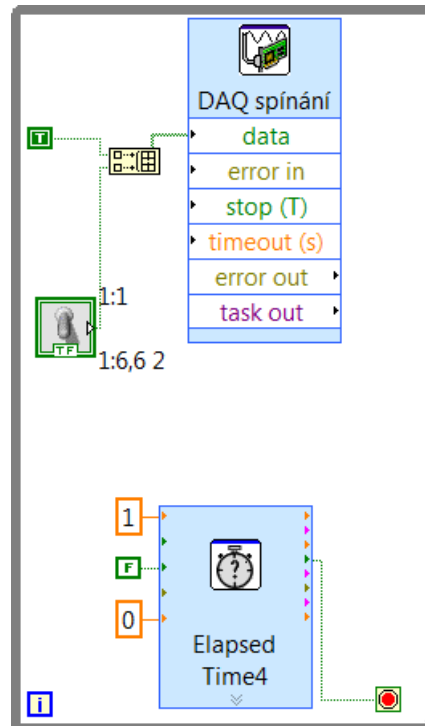
Vzhledem k tomu, že během celé sekvence budeme využívat široký rozsah hodnot napětí, je nutné zajistit bezpečnost měření pro měřicí kartu z hlediska ochrany před připojením napětí vyššího, než je maximální měřicí rozsah, na vstup karty. K vytvoření přepětí by mohlo dojít například opožděným sepnutím relé po zvýšení napětí. Proto byly do měřicího cyklu přidány časované bloky o délce 1 vteřina, v kterých dochází k přepnutí relé. Tyto bloky jsou časově umístěny před zahřívání reproduktoru a také před spuštění měření.

K přechodům mezi jednotlivými bloky dochází díky prvku „flat sequence structure“, umístěném v blokovém diagramu Labview.

Na předním panelu jsou potom bloky rozmístěny do záložek, mezi kterými je možné přepínat. Záložky jsou seřazeny za sebou podle času. Blok v první záložce zleva je tedy vykonáván jako první.

4.2 Blok zahřívání reproduktoru

Při zahřívání reproduktoru relé K2 (číslování součástek je převzato ze schématu na *Obr. 16*) zkratuje předřadný odpor. Jeho sepnutí je řízeno členem „DAQ spínání“. Ten také spíná relé K1, které při sepnutí spínače na předním panelu virtuálního přístroje zvýší vstupní rozsah přístroje díky zařazení napěťového děliče do měřicího obvodu. Člen DAQ spínání je zařazen ještě před zahájení zahřívání do zvláštního bloku, aby bylo zajištěno včasné sepnutí. Blok inicializace stavů relé je na *Obr. 18*.

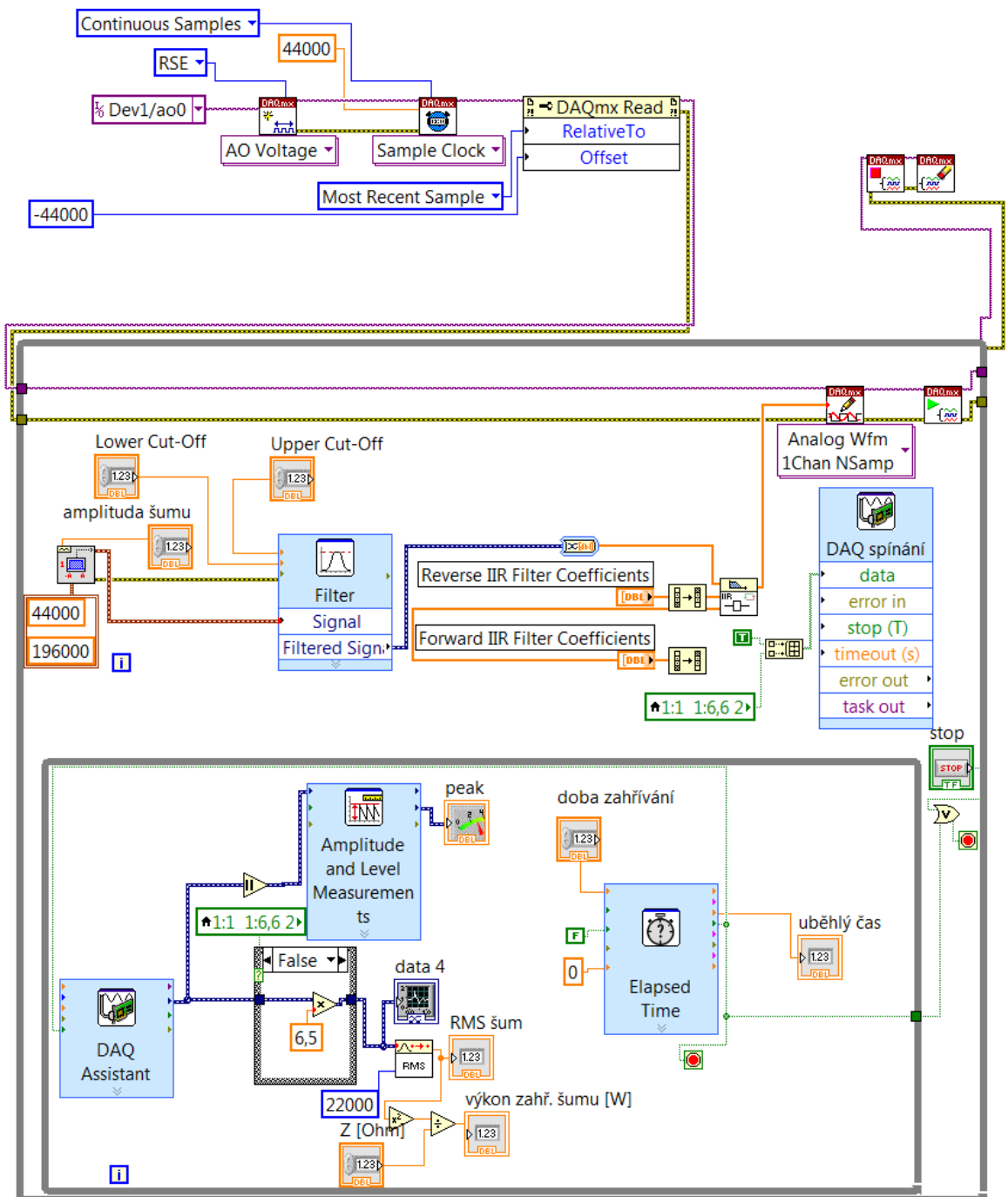


Obr. 18: inicializace stavů relé

Po uplynutí 1 vteřiny dojde díky nástroji Elapsed Time4 k ukončení while cyklu a přechodu na další blok struktury flat sequence. Tím je vlastní zahřívání reproduktoru.

V aplikaci je generován růžový šum, který je poté filtrován pásmovou propustí. Ta je nastavitelná z čelního panelu tak, aby reproduktor nebyl zatěžován v částech frekvenčního spektra, kde je jeho použití kvůli jeho vlastnostem nevhodné a provozováním na daných kmitočtech by došlo k jeho nadměrnému zahřívání, případně fyzickému poškození membrány, nebo elektrického obvodu.

Schéma bloku zahřívání je vidět na Obr. 19.

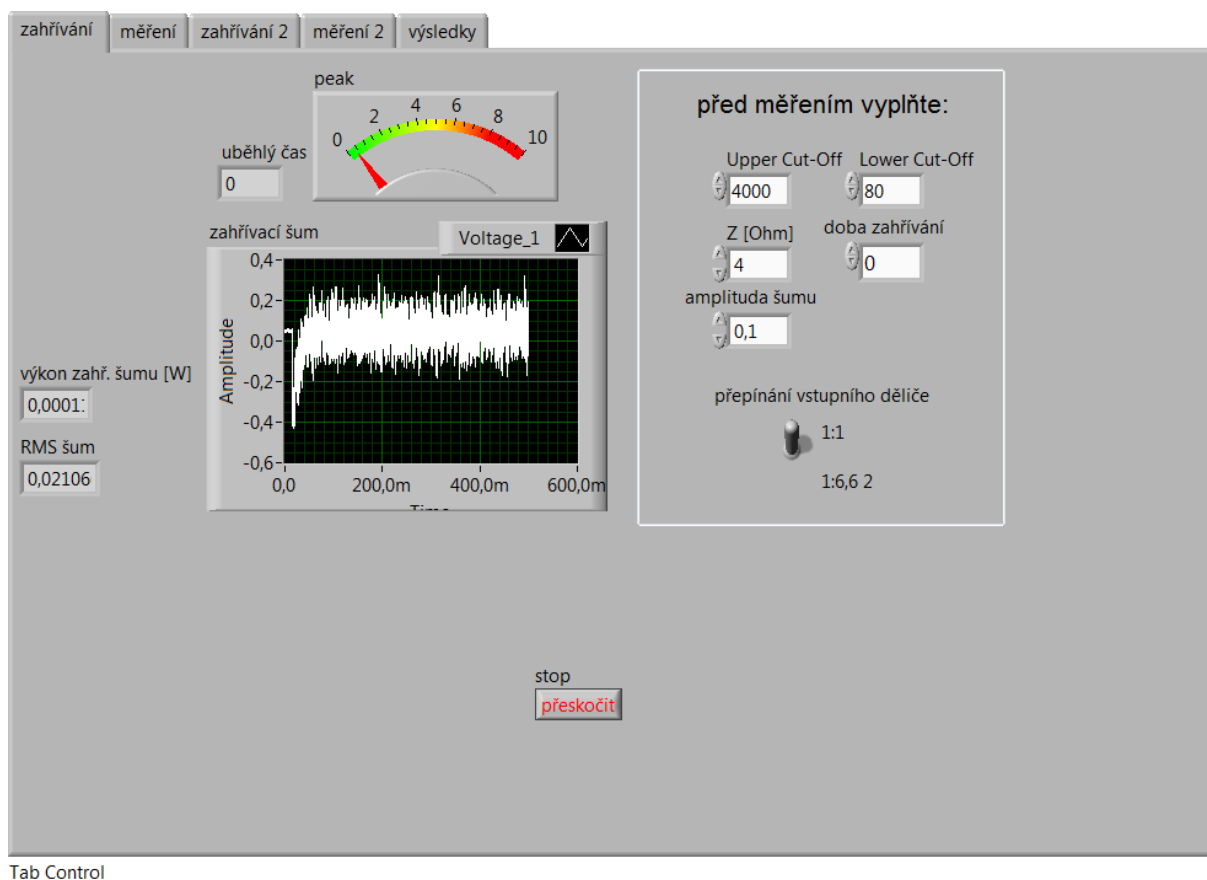


Obr. 19: sekvence zahřívání reproduktoru

Ve spodní části obrázku je umístěno měření amplitudy a efektivní hodnoty růžového šumu na vstupu měřicí karty. Nastavení vstupů, včetně vzorkovací frekvence, počtu načtených vzorků v 1 iteraci cyklu a měřicího rozsahu je prováděno po poklepaní na virtuální nástroj DAQ Assistant, který je ve schématu ve spodní části. Z hodnoty amplitudy je zjišťováno možné přebuzení vstupů karty, z efektivní hodnoty je pak zjišťován výkon šumu na reproduktoru. Jak je vidět v pravém dolním rohu, nastavení doby trvání zahřívání je prováděno změnou vstupních hodnot nástroje Elapsed Time. Ten ukončuje cyklus zahřívání.

Přední panel zahřívací sekvence můžeme vidět na *Obr. 20*. Číselné ovládání Upper Cut-Off a Lower Cut-Off mění horní a spodní mezní frekvenci pásmové propusti. Prvek peak ukazuje špičkovou hodnotu napětí na vstupu karty. Přepínání vstupního rozsahu, které brání přebuzení vstupů karty, je provedeno páčkovým přepínačem a ovládání amplitudy šumu je umístěno napravo od grafického zobrazení časového průběhu šumu. Důležitý je zde indikátor výkonu šumu na reproduktoru, který je nalevo od časového průběhu.

Tlačítko v dolní části okna nám umožňuje přeskočit zahřívací sekvenci a přejít na další krok.



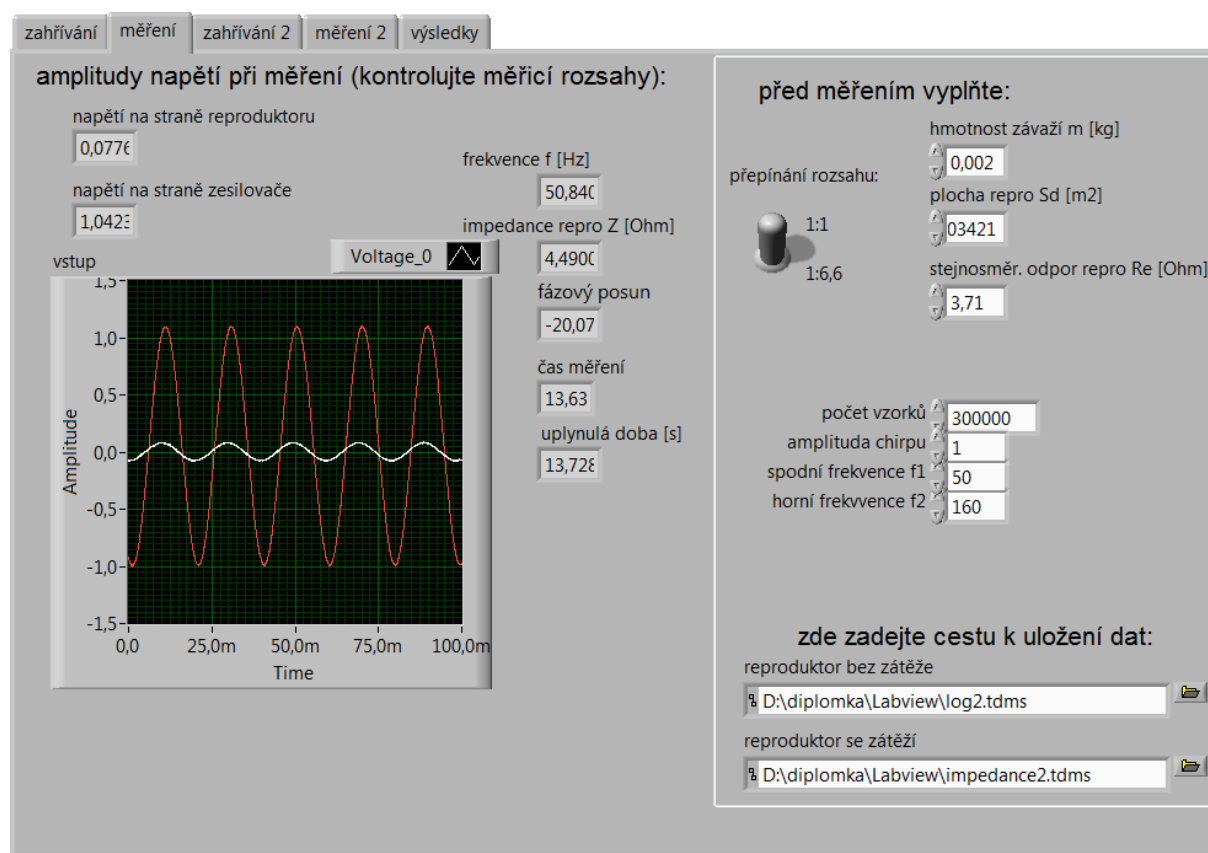
Obr. 20: přední panel zahřívací sekvence

4.3 Blok měření

Sekvence měření je opět uvedena blokem inicializujícím sepnutí relé. Dojde v něm k odepnutí K2, a tím k zařazení předřadného odporu do obvodu. K ukončení inicializace dojde opět po 1 vteřině a začne měření podle předem zadaných hodnot pro měření. Měření je prováděno generovaným signálem chirp. Jeho parametry zadáváme na čelním panelu

v záložce „měření“. Vzorovací frekvence výstupu je 22 kHz. To musíme uvažovat při zadávání počtu generovaných vzorků. Žádný z ovladačů, který se nachází na čelním panelu, není možné nastavovat během měření, proto musejí být nastaveny hodnoty předem. To se týká i nastavení amplitudy zahřívacího šumu a měřicího chirpu. Je tedy nutné ke správným hodnotám dojít iterativním procesem, nebo je vypočítat, pokud známe přesnou hodnotu zisku zesilovače.

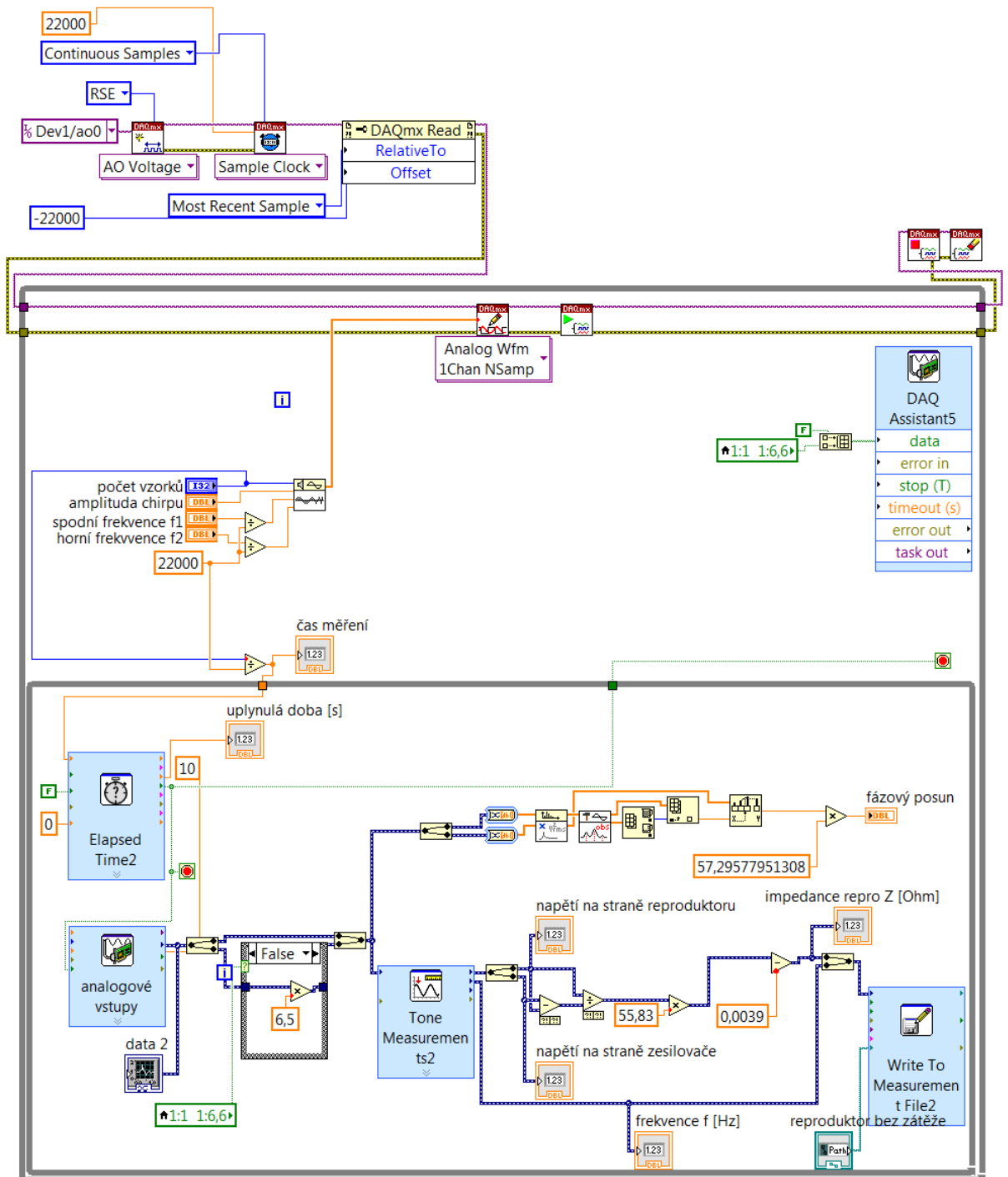
Na předním panelu bloku měření se také nacházejí číselné ovladače pro zadání hmotnosti závaží, které připevňujeme na membránu reproduktoru, plochy membrány a stejnosměrného odporu cívky reproduktoru. Ty je také nutné vyplnit před měřením.



Tab Control

Obr. 21: čelní panel měření

V blokovém schématu na Obr. 22, je pomocí DAQmx a funkce Chirp, generován měřicí signál, který je odeslán na analogový výstup měřicí karty AO.0. Tento výstup je zapojen do zesilovače.



Obr. 22: měřicí sekvence

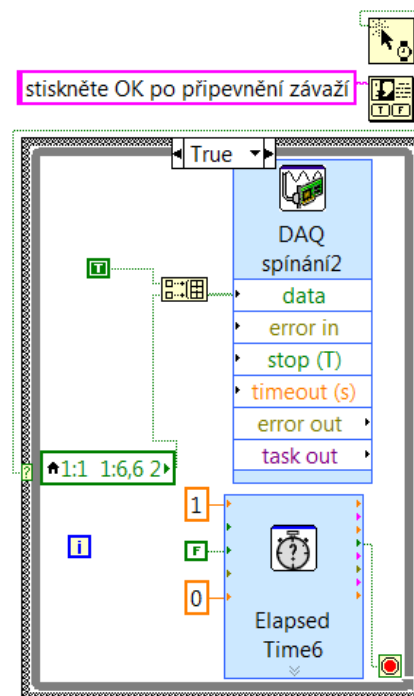
Ve spodní části schématu je v cyklu while umístěno nastavení analogového vstupu a zpracování signálu. V každé iteraci cyklu je načteno 2200 vzorků při vzorkovací frekvenci 22 kHz z každého vstupu. Tato hodnota může být změněna po poklepnání na nástroj „analogové vstupy“. Nástroj Tone Measurements poté měří amplitudu a frekvenci vstupu pro každou sadu vzorků. Dostáváme tedy 10 hodnot měření za sekundu. Můžeme tedy měřit signály s minimální frekvencí 10 Hz. Minimální měřitelnou frekvenci můžeme snížit zvýšením počtu

načítaných vzorků, klesne tím ale časová rozlišovací schopnost měření a pro její zvýšení bude nutné zvýšit počet vzorků signálu chirp, a tím prodloužit celkovou dobu měření.

Ze získaných amplitud napětí a frekvencí můžeme přistoupit k výpočtu impedance reproduktoru. Dle vzorce (10) program provede se signály matematické operace a získanou hodnotu impedance, od které je odečten naměřený odpor reproduktorového kabelu, zapíše do souboru, jehož název a cestu k souboru jsme zadali na čelním panelu.

4.4 Opakování měření po zatížení reproduktoru

Po bloku měření nezatíženého reproduktoru je na něj připevněna zátěž a následně je opět zahříván. Před zahříváním je uživatel vyzván, aby připevnil zátěž a potvrdil její upevnění stisknutím tlačítka OK.



Obr. 23: blok inicializace relé pro zahřívání s uživatelským dialogem

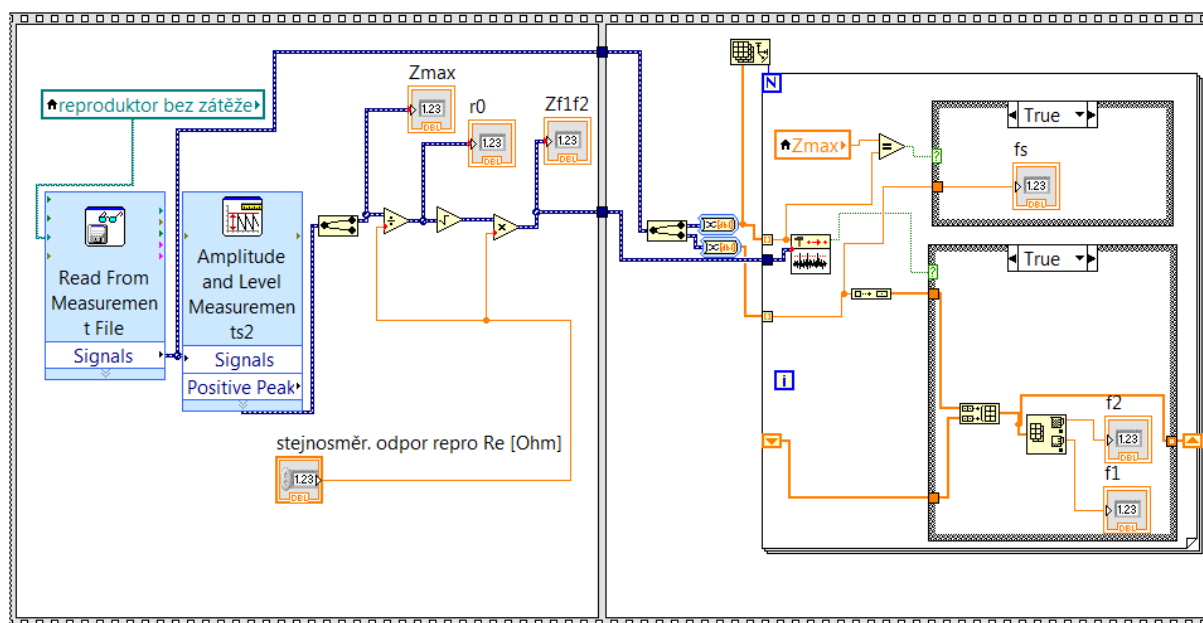
Zahřívání zatíženého reproduktoru probíhá stejným signálem, jako u reproduktoru nezatíženého. Změnit můžeme dobu trvání tohoto procesu na čelním panelu v záložce zahřívání 2.

Poté opět proběhne přepojení relé a zahájení měření. Blok měření je shodný s předešlým v kapitole 4.3.

4.5 Výpočty TS parametrů

Po dokončení měření jsou načteny soubory s naměřenými závislostmi impedance reproduktoru na frekvenci. Pomocí nástroje Amplitude and Level Measurements je nalezena maximální hodnota impedance Z_{max} a z ní, ze znalosti stejnosměrného odporu, jsou vypočítány hodnoty r_0 a $|Z|$, což je hodnota impedance na frekvencích f_1 a f_2 .

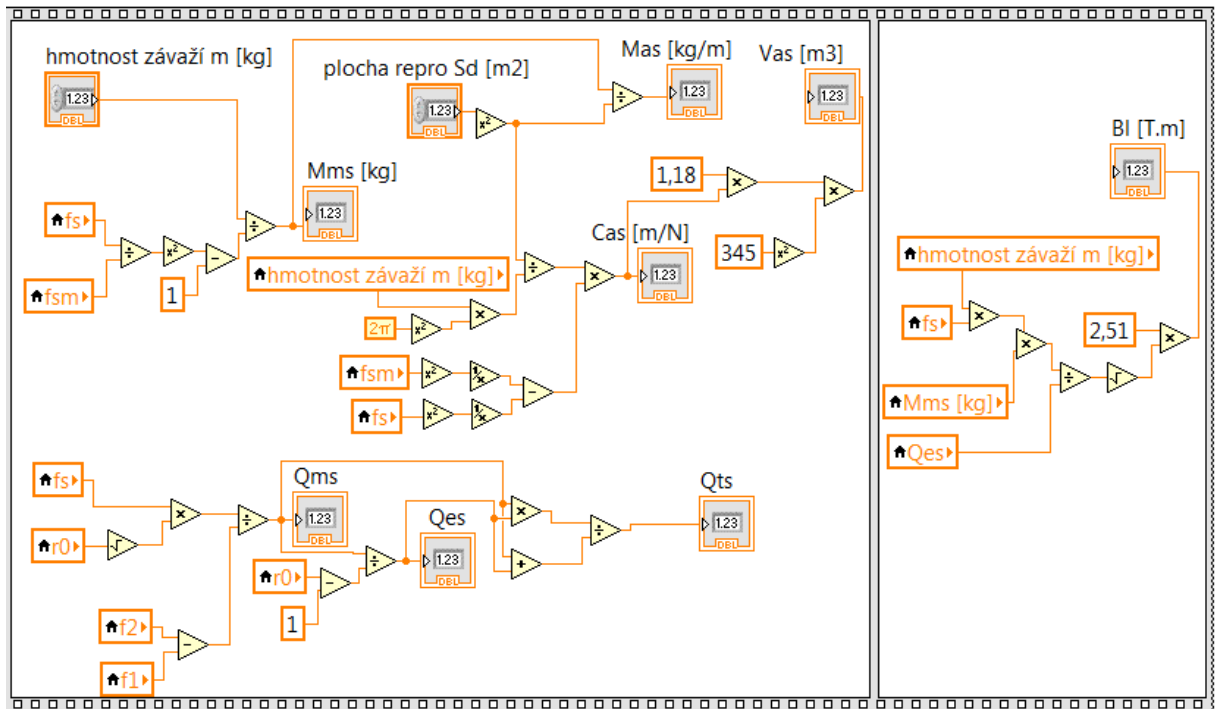
Za pomoci nástroje Threshold Measurement je v cyklu for zjištěna rezonanční frekvence a frekvence f_1 a f_2 .



Obr. 24: určení pomocných veličin pro výpočet TS parametrů

Na Obr. 24 je vidět výpočet pro nezatížený reproduktor. Stejným způsobem je proveden výpočet z naměřených hodnot pro zatížený reproduktor. Jeho hodnoty jsou uloženy do proměnných s přidáním indexem m.

Na Obr. 25 je uveden výpočet TS parametrů ze známých veličin. Vzorce pro tyto výpočty jsou uvedeny v kapitole 2.3.



Obr. 25: Výpočet TS parametrů

5 Zkušební Měření

Pomocí přípravku byl pokusně změřen reproduktor Visaton BF 30 NG 8 Ohm. Reproduktor je dlouhodobě používán v pódiovém odposlechu, lze tedy předpokládat jistou změnu parametrů vlivem jeho stáří a opotřebení. Jeho parametry pro srovnání s naměřenými hodnotami byly získány z internetových stránek výrobce [12].

Zde uvedeme parametry zjištěné z datového listu reproduktoru:

f_s	50 Hz
R_e	6,5 Ω
Q_{ms}	3,13
Q_{es}	0,7
Q_{ts}	0,58
V_{as}	89 l
BL	10,8 T.m

Na následujícím obrázku jsou údaje naměřené přípravkem. Dále byl naměřen stejnosměrný odpor reproduktoru, který je 7,3 Ω . Námi zjištěné hodnoty se od uvedených

tedy poněkud liší. To může být ovšem krom chyb měření způsobeno výrobní tolerancí, nebo opotřebením reproduktoru. Také bylo prováděno pouze kratší zahřívání reproduktoru.

zahřívání	měření	zahřívání 2	měření 2
údaje repro bez zátěže			
Zmax			
32,4356			
Zf1f2	f1	f2	fs
15,387	30,765	62,685	45,0325
r0			
4,44324			
údaje repro se zátěží			
Zmaxm			
32,7063			
Zf1f2m	f1m	f2m	fsm
15,451	28,945	56,091	41,3783
vypočítané parametry			
Mms [kg]	Cas [m/N]	Mas [kg/m]	Vas [m3]
0,0455	7,1184	17,545	0,0995
Qms	Qes	Qts	Bl [T.m] 2
2,9735	0,8635	0,6692	10,468

Tab Control

Obr. 26: naměřené hodnoty

Pro ověření správnosti měření byly přípravkem měřeny kalibrační odpory o hodnotách 3,32 Ω a 47 Ω . Přesnost měření obou odporů dosahovala 0,01 Ω .

Kalibrace přípravku byla provedena naměřením předřadného odporu a odporu kabelu. Odpor kabelu (který byl naměřen jednorázově po sestavení přípravku) byl poté odečten od hodnoty naměřené přípravkem. Toto odečtení je již implementováno v měřicí aplikaci v Labview (viz kapitola 4.3). Výsledkem je udávaná přesnost 0,01 Ω .

Tím byl potvrzen teoretický předpoklad, že chyba měření je tvořena pouze odporem, resp. impedancí kabelu, pokud je přesně změřena velikost předřadného odporu, jak je uvedeno ve vzorci (11).

Závěr

Výsledkem práce je zhotovený přípravek pro měření TS parametrů reproduktorů. Ten svými vlastnosti splňuje nároky kladené na měření. Přípravek je vyhotoven na desce plošného spoje, umístěn v konstrukční krabičce a je opatřen BNC konektory pro snadné propojení s měřicí kartou. Opatřen je také stavovými LED diodami, které indikují přítomnost napájení a sepnutí relé. Součástí práce je také vytvořená aplikace v prostředí Labview, pomocí které je kromě ovládání přípravku také prováděno měření a zpracování jeho výsledků, takže konečným výstupem jsou plně určené TS parametry.

Výhodou přípravku je implementace zahřívání reproduktoru do měřicího procesu a také přesnost měření, která byla dosažena po zvolení vhodné měřicí metody. Tou je srovnávací metoda s úpravami zapojení, jak je uvedeno v kapitole 2.1.

V práci jsou popsány nepřesnosti měření a rozebrány jsou způsoby jejich kompenzace. V měřicí aplikaci k přípravku je implementována jednoduchá kompenzace odporu reproduktorového kabelu. Z důvodů popsaných v závěru kapitoly 2.2. nebyla implementována do měřicí aplikace kompenzace teplotní závislosti.

Použitá literatura

1. [online]. [cit. 2012-4-16]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small>
2. IEC 60268-5:2003. *Sound system equipment - part 5: Loudspeakers*. Geneva, Switzerland: Commission Electrotechnique Internationale, 2003.
3. *KrautWire - reprokabel Reference HT II* [online]. Dostupné z: <http://www.krautwire.cz/produkty/reprokabely/?p=reference-ht-ii>
4. *Eminence speakers* [online]. Dostupné z: <http://www.eminence.com/>
5. *hw.cz: náhradní schéma reproduktoru* [online]. [cit. 2012-4-4]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/nahradni-schema-reproduktoru.html>
6. *GM elektro: popis produktu: konektor "banánek"* [online]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/bananky-na-kabel/bananek-cervený-dci-p811-004/>
7. *GM elektro: datový list výkonového odporu* [online]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/114/114-040/dsh.114-040.1.pdf>
8. GOMEZ-MEDA, R. *Measurement of the Thiele-Small parameters for a given loudspeaker, without using a box*. Journal of Audio Engineering Society, 1991
9. C.J. STRUCK, BRUEL AND KJAER INSTRUMENTS INC. *Determination of Thiele-Small parameters using two-channel FFT analysis*. Journal of Audio Engineering Society, 1987
10. DREW DANIELS, TEAC CORPORATION OF AMERICA. *Thiele-small nuts and bolts with painless math*. Journal of Audio Engineering Society, 1981
11. *National Instruments: NI USB 6221 BNC* [online]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-13/lang/en>
12. *Reproduktory Visaton* [online]. Dostupné z: http://www.visaton.cz/czech/clanky/clanek_136.htm

Přílohy

Příloha A: seznam součástek:

<u>Součástka</u>	<u>počet kusů</u>
Relé NT72-2C-S10	2x
Tranzistor N-MOS IRF 630	2x
Odpor 1M	2x
Odpor 560R	1x
Odpor 100R	1x
Odpor 56R 5W	1x
Odpor 5k6	3x
Kondenzátor 100 μ F/16V	1x
LED dioda červená 5mm	3x
Konektor napájecí 2,1 mm	1x
Konektor BNC	4x
Konstrukční krabička	1x

Elektronické přílohy:

- Stažené internetové zdroje (adresář literatura z webu)
- Layout desky (ze strany spojů)
- Měřicí aplikace v Labview (verze 2011, nebo novější)