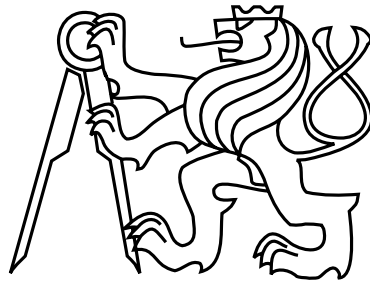


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra měření



Bakalářská práce

Měření elektromechanických parametrů reproduktorů

Dalibor Štys

Vedoucí práce: Ing. Milan Červenka, Ph.D.

Studijní program: Kybernetika a robotika, Bakalářský

Obor: Senzory a přístrojová technika

23. května 2016

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanu Červenkovi Ph.D. za vedení práce, ohromnou trpělivost, rady a připomínky při vedení mé bakalářské práce. Rád bych také poděkoval přítelkyni a otci za podporu během celého studia. Závěrem děkuji katedře měření za téměř neomezený přístup k přístrojům.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 23. 5. 2016

.....

Abstract

The aim of bachelor thesis is to design and create user interface for measurement of impedance characteristic of loudspeaker using LabView and Data Acquisition System (NI-USB 6211). Part of the thesis is also creation of script and algorithm for calculation of electromechanical parameters of loudspeakers using Matlab and Curve Fitting Toolbox. The final part of this work is measurement of parameters using different loudspeakers.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je navrhnout a vytvořit prostředí pro měření impedančních charakteristik elektrodynamických měničů pomocí LabView a měřící karty NI-USB 6211. Následně je třeba s využitím Matlabu a Curve Fitting Toolboxu navrhnout skript a algoritmus pro výpočet elektromechanických obvodových parametrů. Vytvořené programové prostředky je následně potřeba vyzkoušet na několika vybraných reproduktorech.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Dalibor Štys**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Měření elektromechanických parametrů reproduktorů**

Název tématu anglicky: **Measurement of Electromechanical Parameters of Loudspeakers**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s lineárním obvodovým modelem elektrodynamického měniče (reproduktoru). S využitím systému LabView navrhnete a sestavte prostředí pro měření impedančních charakteristik elektrodynamických měničů a následný výpočet jejich elektromechanických obvodových parametrů. U vybraných reproduktorů určete jejich elektromechanické obvodové parametry.

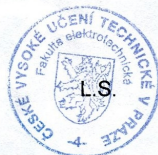
Seznam odborné literatury:

- [1] Škvor, Z.: Akustika a elektroakustika, Academia, 2001.
- [2] Beranek, L., Mellow, T.: Acoustics: Sound Fields and Transducers, Academic Press, 2012.
- [3] Klippel, W., Seidel, U.: Fast and Accurate Measurement of Linear Transducer Parameters, www.klippel.de, (pp.1–7).
- [4] Vlach, J., Havlíček, J., Vlach, M.: Začínáme s LabView, BEN, 2008.
- [5] Bitter, R., Mohiuddin, T., Nawrocki, M.: LabView – Advanced Programming Techniques, CRC Press, 2007.
- [6] DAQ M Series – M Series User Manual, National Instruments, ni.com/manuals, 2008.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Červenka, Ph.D. (K 13102)

Datum zadání bakalářské práce: 19. listopadu 2014

Platnost zadání do¹: 31. srpna 2016



Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 11. 2014

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Obsah

1	Úvod	1
2	Elektrodynamický měnič	3
2.1	Konstrukce elektrodynamického měniče	3
2.2	Matematický model elektrodynamického měniče	4
2.3	Vstupní impedance elektrodynamického měniče	9
2.4	Určení parametrů modelu elektrodynamického měniče	9
3	Měřicí obvod	11
3.1	Měřicí karta NI USB-6211	12
3.1.1	Zapojení měřicí karty	13
3.2	Svorkovnice	16
3.3	Výkonový zesilovač Akiyama AMD-400	17
4	Program pro měření impedanční charakteristiky	19
4.1	Struktura programu	19
4.2	Grafické rozhraní	21
4.3	Měření impedanční charakteristiky	25
4.3.1	Zjišťování rozsahu měřících kanálů	27
4.3.2	Udržování konstantního napětí na reproduktoru	28
4.4	Testování programu	30
5	Algoritmus pro výpočet obvodových parametrů	33
5.1	Metoda nejmenších čtverců	34
5.2	Program pro výpočet obvodových parametrů	36
6	Měření elektromechanických parametrů měničů	39
6.1	Měření elektromechanických parametrů měniče 6MD38	39
6.2	Měření elektromechanických parametrů měniče 5FG44	42
7	Závěr	45
	Literatura	47
A	Zapojení vstupních svorek	49

Seznam obrázků

2.1	Konstrukce elektrodynamického měniče – převzato z [13]	4
2.2	Schéma náhradního obvodu pro reproduktor	8
3.1	Schéma měřicího obvodu	11
3.2	Měřicí karta NI USB-6211 s BNC konektory	13
3.3	Měření plovoucího zdroje napětí v diferenciálním režimu – převzato z [14]	14
3.4	Měření plovoucího zdroje napětí v NRSE režimu – převzato z [14]	14
3.5	Měření plovoucího zdroje napětí v režimu RSE – převzato z [14]	15
3.6	Schéma obvodu se zapojením svorkovnice	16
3.7	Výkonový zesilovač Akiyama AMD-400 – převzato z [4]	17
4.1	Struktura programu pro měření impedanční charakteristiky	20
4.2	Datový typ sloužící ke konfiguraci měření	20
4.3	SubVI umožňující uživateli uložit data do předem zvoleného souboru	21
4.4	Uživatelské prostředí programu	21
4.5	Panel pro nastavení generátoru	22
4.6	Panel pro nastavení měření impedanční charakteristiky	23
4.7	Záložka Grafy Z/f	23
4.8	Záložka Tabulky naměřených hodnot	24
4.9	Generování harmonického signálu	25
4.10	Zpracování naměřených dat	26
4.11	Výpočet impedance podle vzorce 4.2	26
4.12	Ukládání dat do tabulky a jednotlivých grafů	27
4.13	Ukládání dat po ukončení měření frekvenční charakteristiky	27
4.14	Zjišťování rozsahu měřících kanálů	28
4.15	Udržování stálého napětí na reproduktoru	29
4.16	Obvod se dvěma sériově zapojenými rezistory	30
4.17	Obvod s kapacitorem sériově zapojeným k rezistoru	31
5.1	Ilustrace metody nejmenších čtverců při aproximaci bodů přímkou - převzato z [19]	35
5.2	Program pro výpočet obvodových parametrů	36
5.3	Program pro výpočet obvodových parametrů po využití fitovacího algoritmu	38
6.1	Grafy průběhů impedančních charakteristik pro elektrodynamický měnič 6MD38 bez přidané hmotnosti po zpracování dat programem	41

6.2	Graf naměřených dat pro elektrodynamický měnič 6MD38	41
6.3	Grafy průběhů impedančních charakteristik pro elektrodynamický měnič 5FG44 bez přidané hmotností po zpracování dat programem	42
6.4	Graf průběhů impedančních charakteristik pro elektrodynamický měnič 5FG44 bez přidané hmotností po zpracování dat programem v oblasti rezonance	43
A.1	Zapojení vstupních svorek měřící karty v závislosti na zvoleném zdroji napětí – převzato z [14]	49

Seznam tabulek

3.1	Specifikace měřicí karty NI USB-6211 – převzato z [2]	12
3.2	Specifikace výkonového zesilovače Akiyama AMD-400 – převzato z [3]	17
4.1	Tabulka naměřených hodnot pro hodnoty impedance měřeného rezistoru	30
4.2	Tabulka chyb měření pro naměřené hodnoty impedance měřeného rezistoru	31
4.3	Tabulka naměřených hodnot pro impedanci měřeného kondenzátoru	31
4.4	Tabulka chyb měření pro naměřené hodnoty impedance kondenzátoru	32
6.1	Porovnání naměřených hodnot a hodnot uvedených v datasheetu (viz. [22]) pro elektrodynamický měnič 6MD38	40
6.2	Porovnání naměřených hodnot a hodnot uvedených v datasheetu (viz. [23]) pro elektrodynamický měnič 5FG44	42

Kapitola 1

Úvod

Cílem této bakalářské práce je navrzení algoritmu pro určování elektromechanických parametrů elektrodynamických měničů s využitím MATLABu, resp. Curve Fitting Toolboxu. Pro tyto účely byl také navržen program pro měření impedanční charakteristiky pomocí LabView a měřicí karty NI-USB 6211 a následně grafické uživatelské rozhraní pro zjednodušení práce s algoritmem. V práci je uvažován nízkofrekvenční model elektrodynamického měniče využívající popisu pomocí soustředěných obvodových parametrů. Proměřované elektrodynamické měniče jsou umístěny do exsikátoru, z něhož je vzduch odsáván vývěvou, aby bylo možné eliminovat vliv vyzařovací impedance na reproduktor.

V první části práce je popsána konstrukce a odvozen model elektrodynamického měniče. Výsledný model elektrodynamického měniče je poté přímo využit pro proložení naměřených dat a tudíž pro zjištění elektromechanických parametrů reproduktoru.

V další kapitole je popsán měřicí obvod včetně podrobného popisu jednotlivých součástí. Je zde také vysvětleno, proč byl obvod takto zkonstruován a proč a v jakém režimu je využita měřicí karta.

Následující část práce se zabývá podrobným popisem programu pro měření impedančních charakteristik elektrodynamického měniče. Je zde podrobně popsáno uživatelské rozhraní, použití programu, způsob nastavení měřicích rozsahů a udržování konstantního napětí na elektrodynamickém měniči. Program je zde také otestován s využitím několika jednoduchých elektrických obvodů.

Další kapitola se zabývá popisem algoritmu pro určování elektromechanických parametrů elektrodynamických měničů. Je zde také popsán samotný program, usnadňující zjišťování elektromechanických parametrů a využívající daný algoritmus.

V poslední části jsou programy otestovány přímo na dvou elektrodynamických měničích a uvedeny zjištěné elektromechanické parametry.

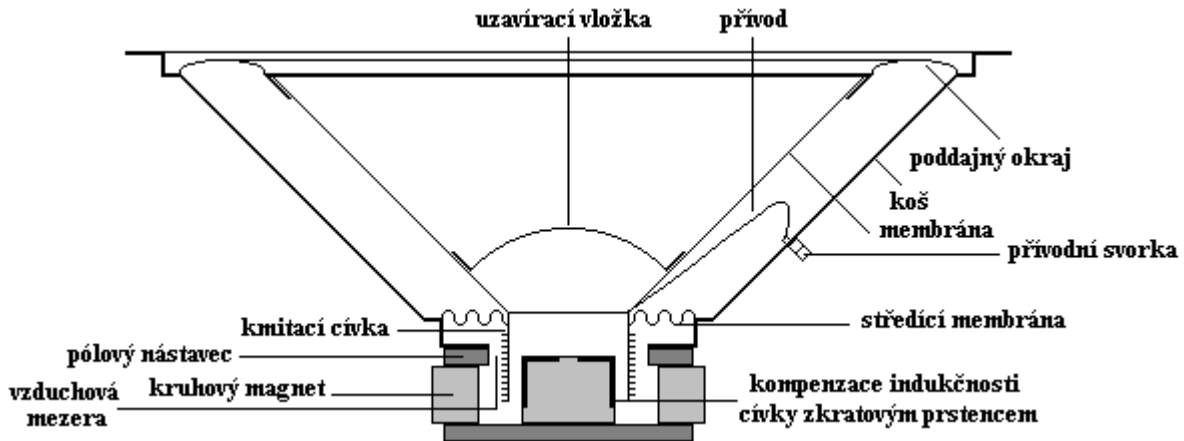
Kapitola 2

Elektrodynamický měnič

Elektrodynamický měnič je elektroakustický převodník energie, který slouží k přeměně elektrického signálu na zvuk. V současné době je to nejrozšířenější typ reproduktoru. Existují dva základní typy reproduktorů – ty, ve kterých je membrána přímo navázána na prostředí, do kterého je akustická energie vyzařovaná, tedy přímovyzařující reproduktory a ty, ve kterých je mezi membránou a prostředím vložen zvukovod, případně další akustické obvody, tedy nepřímovyzařující. Přímovyzařující reproduktory se využívají v domácnostech, v automobilech nebo mobilních zařízeních. Ve zvukových systémech pro velká divadla, kina nebo posluchárny se využívají nepřímovyzařující reproduktory. Výhody přímovyzařujících reproduktorů jsou malá velikost, nízká cena a dobrá odezva v relativně širokém frekvenčním rozsahu. Nevýhodami jsou naopak nízké frekvence a úzká směrová charakteristika při vysokých frekvencích.

2.1 Konstrukce elektrodynamického měniče

Důležitým prvkem každého elektrodynamického měniče je membrána. Membrána je kužel vyroben z lehkého a pevného materiálu, aby se omezil vznik nežádoucích kmitů. Je vyrobena zejména z papíru, vyrábí se ale i membrány z plastu nebo kovu. To, že je membrána pevná vyplývá zejména z faktu, že membrána je zakřivená. Ve středu membrány je uzavírací vložka, která chrání vzduchovou mezeru před pronikáním metalického prachu. K vrcholu kužele je připojena kostra cívky, na níž je samotná kmitací cívka navinuta. Cívka je umístěna ve vzduchové mezeře, mezi pólovým nástavcem a kruhovým magnetem (viz. obrázek 2.1). Zde se vytváří magnetický tok permanentního magnetu, který je upevněn ke koši reproduktoru. Aby se membrána mohla pohybovat pouze v směru jedné osy (resp. pohybovat se pístovým pohybem), je po obvodu opatřena poddajným okrajem a poblíž kmitací cívky středící membránou. Magnety se dnes vyrábí zejména feritové, hlavně ze slitiny AlNiCo (hliník – kobalt – nikl), v dražších systémech se prosazují i neodymové magnety (směs neodymu, železa a boru). Po připojení reproduktoru ke zdroji elektrického proudu, proud tekoucí kmitací cívkou vytvoří magnetomotorickou sílu, zároveň je ve vzduchové mezeře vytvářen magnetický tok, který vytváří permanentní magnet. To způsobuje translační pohyb kmitací cívky, a tím pádem i membrány, ke které je cívka připojena. Cívka a membrána jsou tak vychylovány ze své rovnovážné polohy, tento pohyb se přenáší na částice vzduchu a membrána tak produkuje zvukové vlny (viz. např. [7], [13]).



Obrázek 2.1: Konstrukce elektrodynamickeho měniče – převzato z [13]

2.2 Matematický model elektrodynamickeho měniče

Elektrodynamickeý měnič je charakteristický tím, že mechanická část je spojena s vodičem proudu, který je umístěn ve stejnosměrném magnetickém poli s indukcí B . Aktivní část vodiče je svinuta do cívky. Ta je umístěna ve vzduchové mezeře. Pokud protéká proudovodičem o délce dl proud i , na proudovodič působí síla dF kolmo na rovinu danou siločárou, která prochází proudovodičem a tečnou k vodiči v příslušném bodě. Velikost působící síly je pak dána rovnicí

$$dF = [B \times idl] = Bidl \sin \alpha, \quad (2.1)$$

kdy α značí úhel mezi tečnou k vodiči proudu a směrem magnetického pole. V našem případě je proudovodič kolmý na směr siločar, proto $\sin \alpha = 1$. Na proudovodič tak působí síla daná rovnicí

$$F = \int_0^l Bidl \quad (2.2)$$

Pro homogenní magnetické pole pak platí

$$F = Bil \quad (2.3)$$

Síla F má axiální směr. Kmitací cívka má indukčnost L_e . Protéká-li cívkou proud i , indukuje se v ní napětí

$$u_L = L_e \frac{di}{dt}. \quad (2.4)$$

Cívka kmitá výchylkou η , resp. rychlostí

$$v = \frac{d\eta}{dt} \quad (2.5)$$

Proudovodič kmitací cívky protíná siločáry magnetického pole o magnetické indukci B . Tím se v cívce indukuje elektromotorické napětí

$$u_e = \frac{d\phi}{dt}. \quad (2.6)$$

ϕ je celkový magnetický tok. Celkové indukované napětí je pak dané superpozicí (rovnice (2.4) a rovnice (2.6))

$$u = L_e \frac{di}{dt} + \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

Tok ϕ v záběru vodiče je pak

$$\phi = Bl\eta \quad (2.8)$$

a dosazením do rovnice (2.4) pak dostáváme

$$u_e = \frac{d\phi}{dt} = Bl \frac{d\eta}{dt} = Blv, \quad (2.9)$$

viz. např. [8], [6], [9]. Do rovnice (2.9) celkového napětí pro elektrodynamický měnič, které značíme u , pak musíme ještě započítat napětí způsobené tokem proudu samotným odporem vinutí R_e . Tato rovnice je rovnice pro elektrickou část obvodu a je to první ze dvou rovnic, pomocí kterých můžeme popsat reproduktor.

$$u = u_r + u_l + u_e = R_e i + L_0 \frac{di}{dt} + Blv \quad (2.10)$$

Další rovnicí, kterou popisujeme reproduktor je rovnice, která vychází z druhého newtonova pohybového zákona - zákona síly. Popisuje mechanickou část obvodu reproduktoru. Rovnice (2.11) popisuje velikost síly, kterou působí reproduktor na membránu a od ní odečtené vlivy reproduktoru a prostředí.

$$M_m \frac{dv}{dt} = Bl i - R_m v - F_v - S_D p'(v), \quad (2.11)$$

kdy M_m je celková mechanická hmotnost, v je rychlost kmitání cívky, R_m je mechanický odpor, F_v je vratná síla, S_D je efektivní plocha membrány a $p'(v)$ je akustický tlak. Vratnou sílu můžeme rozepsat jako

$$F_v = -k\eta, \quad (2.12)$$

kdy k je tuhost membrány. V akustice se zavádí veličina C_m zvaná mechanická poddajnost jako převrácená hodnota tuhosti membrány – viz. rovnice (2.13).

$$C_m = \frac{1}{k} \quad (2.13)$$

Rovnici (2.13) dosadíme do rovnice (2.12) a dostaneme tak

$$F_v = \frac{-1}{C_m}\eta. \quad (2.14)$$

Vztah mezi výchylkou a rychlostí popisujeme jako

$$v = \frac{d\eta}{dt} \quad (2.15)$$

a rovnici (2.15) pak upravíme do tvaru

$$\eta = \int_{-\infty}^t v dt. \quad (2.16)$$

Rovnice (2.16) dosadíme do rovnice (2.14) a dostáváme

$$F_v = \frac{-1}{C_m} \int_{-\infty}^t v dt \quad (2.17)$$

Rovnici (2.17) dosadíme do rovnice (2.11).

$$M_m \frac{dv}{dt} = Bli - R_m v - \frac{1}{C_m} \int_{-\infty}^t v dt - S_D p'(v) \quad (2.18)$$

Reproduktor budeme pro naše měření využívat ve vakuu (resp. umístíme reproduktor do nádoby, z níž je vývěvou vyčerpán vzduch), proto můžeme zanedbat člen, který započítává sílu působení akustického tlaku na efektivní plochu membrány. Dostáváme pak rovnici (2.19), kterou budeme dále využívat (viz. např. [11], [10]).

$$M_m \frac{dv}{dt} + R_m v + \frac{1}{C_m} \int_{-\infty}^t v dt = Bli \quad (2.19)$$

Reproduktor budeme uvažovat v harmonickém ustáleném stavu, proto signál zdroje napětí dodávaný obvodu můžeme psát jako

$$u = u_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.20)$$

Rovnici (2.20) můžeme přepsat jako

$$u = \Re(u_0 e^{j(\omega t + \varphi)}), \quad (2.21)$$

přičemž výraz $\omega t + \phi$ nazýváme fáze. Rovnici (2.21) dále upravujeme a dostaneme

$$u = \Re(u_0 e^{j\varphi} e^{j\omega t}). \quad (2.22)$$

Výraz $u_0 e^{j\varphi}$ nazýváme komplexor a dále v textu ho budeme značit \hat{u} . Proto rovnici (2.22) upravujeme do finální podoby.

$$u = \Re(\hat{u} e^{j\omega t}) \quad (2.23)$$

Protože reproduktor uvažujeme v harmonickém ustáleném stavu, předpokládáme, že i elektrický proud a rychlost budou veličiny, které mají harmonický průběh. Proto můžeme psát rovnici (2.24), resp. rovnici (2.25).

$$i \rightarrow \hat{i} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.24)$$

$$v \rightarrow \hat{v} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.25)$$

Rovnici (2.24) následně zderivujeme podle času a rovnici (2.25) zintegrujeme.

$$\frac{di}{dt} \rightarrow j\omega \hat{i} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.26)$$

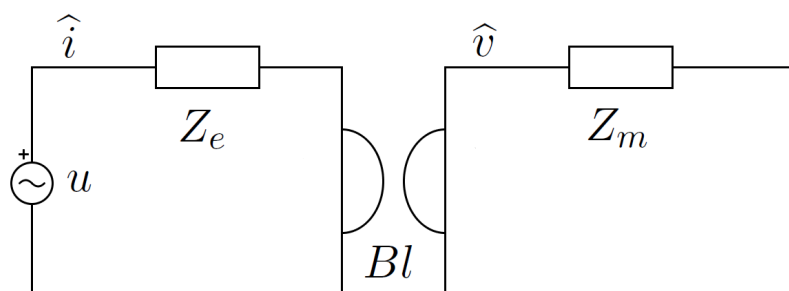
$$\int v dt \rightarrow \frac{\hat{v}}{j\omega} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.27)$$

Rovnice (2.26) a (2.27) následně dosadíme do rovnic (2.10) a (2.19) popisující model elektrodynamického měniče.

$$Re \cdot \hat{i} + j\omega L_e \hat{i} + Bl \hat{v} = \hat{u} \quad (2.28)$$

$$j\omega M_m \hat{v} + R_m \hat{v} + \frac{1}{j\omega C_m} \hat{v} = Bl \hat{i} \quad (2.29)$$

Nyní už můžeme nakreslit náhradní obvod elektrodynamického měniče. Přeměnu elektrické energie na mechanickou zde znázorňuje myšlená součástka – tzv. gyrátor.



Obrázek 2.2: Schéma náhradního obvodu pro reproduktor

Elektrickou impedanci Z_e popisujeme rovnicí (2.30).

$$Z_e = R_e + j\omega L_e \quad (2.30)$$

Mechanickou impedanci Z_m pak popisujeme jako

$$Z_m = j\omega M_m + R_m + \frac{1}{j\omega C_m}. \quad (2.31)$$

Rovnice (2.30) a (2.31) dosadíme do rovnic (2.28) a (2.29) a dostaneme

$$Z_e \hat{i} + Bl \hat{v} = \hat{u} \quad (2.32)$$

$$Z_m \hat{v} = Bl \hat{i} \quad (2.33)$$

Z rovnice (2.33) vyjádříme fázor rychlosti.

$$\hat{v} = \frac{Bl \hat{i}}{Z_m} \quad (2.34)$$

Fázor rychlosti dosadíme do rovnice (2.32) a dostaneme

$$Z_e \hat{i} + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \hat{i} = \hat{u}. \quad (2.35)$$

Následně z rovnice (2.35) vytkneme fázor proudu.

$$\hat{i} \left(Z_e + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \right) = \hat{u} \quad (2.36)$$

2.3 Vstupní impedance elektrodynamického měniče

Vstupní impedance Z_{VST} je dána rovnicí (2.37).

$$Z_{VST} = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} \quad (2.37)$$

Rovnici (2.36) proto vydělíme fázorem elektrického proudu a dostáváme rovnici pro vstupní impedanci reproduktoru.

$$Z_{VST} = Z_e + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \quad (2.38)$$

Následně je třeba opět dosadit vztahy (2.30) a (2.31) do rovnice (2.38)

$$Z_{VST} = R_e + j\omega L_e + \frac{(Bl)^2}{R_m + j\omega M_m + 1/j\omega C_m} \quad (2.39)$$

Vstupní impedance jakožto funkce kmitočtu ω je tak funkcí šesti parametrů (viz. např. [7], [11]).

$$Z_{VST} = (R_e, L_e, R_m, M_m, C_m, Bl, \omega) \quad (2.40)$$

2.4 Určení parametrů modelu elektrodynamického měniče

Pro určování parametrů modelu elektrodynamického měniče (resp. parametrů, na kterých je vstupní impedance závislá) byla vybrána metoda, kdy se provádí dvojí měření a z toho se poté vypočtou dané parametry. První měření se provádí s elektrodynamickým měničem bez přidané hmotnosti na membráně, další se provádí s přidanou hmotností na membráně (viz. [17]). Výpočet parametrů modelu se provádí pomocí programu na měření impedančních charakteristik elektrodynamického měniče (viz. kapitola 4) a následně pomocí algoritmu na zjišťování těchto parametrů, který je napsaný v MATLABu a využívá Curve Fitting Toolbox (viz. kapitola 5). Před měřením zjistíme odpor vinutí R_e pomocí ohmmetru na svorkách reproduktoru, úhlovou frekvenci ω zjistíme pro každou naměřenou frekvenci pomocí vzorce

$$\omega = 2\pi f. \quad (2.41)$$

Zbývá nám tak zjistit parametry L_e , R_m , Bl , M_m a C_m . První měření provádíme s reproduktorem, který na membráně nemá žádnou přidanou hmotnost. Data naměřená při prvním měření pak pomocí algoritmu fitujeme na rovnici

$$Z_{mer1} = R_e + j\omega L_e + \frac{1}{R'_m + j\omega M'_m + \frac{1}{j\omega C'_m}}, \quad (2.42)$$

kdy sdružené parametry jsou popsány následovně

$$R'_m = \frac{R_m}{(Bl)^2} \quad (2.43)$$

$$M'_m = \frac{M_m}{(Bl)^2} \quad (2.44)$$

$$C'_m = C_m(Bl)^2 \quad (2.45)$$

Při druhém měření přidáme na membránu přidanou zátěž o hmotnosti m . Velikost přidané hmotnosti pak různé zdroje určují různě. Přidaná zátěž má být velká jako jedna desetiina hmotnosti membrány, aby námi odvozený model správně fungoval (viz. [7]). Jiný zdroj uvádí, že pro reproduktory o velikosti menší než 200 milimetrů by se měla používat přidaná hmotnost okolo 5g, pro reproduktory, které mají 200 milimetrů by se měla používat přidaná hmotnost o velikosti 10g, pro větší pak 20g. Pokud se rezonance nezmenší alespoň o 10 %, potom se postupně hmotnost dále přidává (viz. např. [12], [16]). V dalším článku je uvedeno, že se přidává taková hmotnost, aby se rezonance změnila o 20 % – 50 %. Proto se na membránu přidává ta samá hmotnost, jakou má membrána – v tom případě se totiž změní rezonance o cca. 30 % (viz. [15]). Všechny tyto postupy jsou porovnány v kapitole 6 a je zvolen ten nejvhodnější. Hmotnost by měla být vážena velmi přesně, proto využíváme analytické váhy s přesností $\pm 0,001$ miligramu. Impedance pro samotný fit dat z druhého měření je pak uvedena jako rovnice (2.46).

$$Z_{mer2} = R_e + j\omega L_e + \frac{1}{R'_m + j\omega M''_m + \frac{1}{j\omega C'_m}}, \quad (2.46)$$

kdy sdružená hodnota M''_m je definována jako

$$M''_m = \frac{M_m + m}{(Bl)^2}. \quad (2.47)$$

Po zpracování naměřených dat algoritmem dostáváme soustavu rovnic (2.45) a (2.48) o dvou neznámých. Vyřešením této soustavy dostáváme rovnice (2.48), resp. (2.49) a dopočítáváme parametry M_m a Bl . Další parametry dopočítáme pomocí vzorců (2.43) a (2.45) a indukčnost L_e dostaneme přímo využitím algoritmu (viz. kapitola 5).

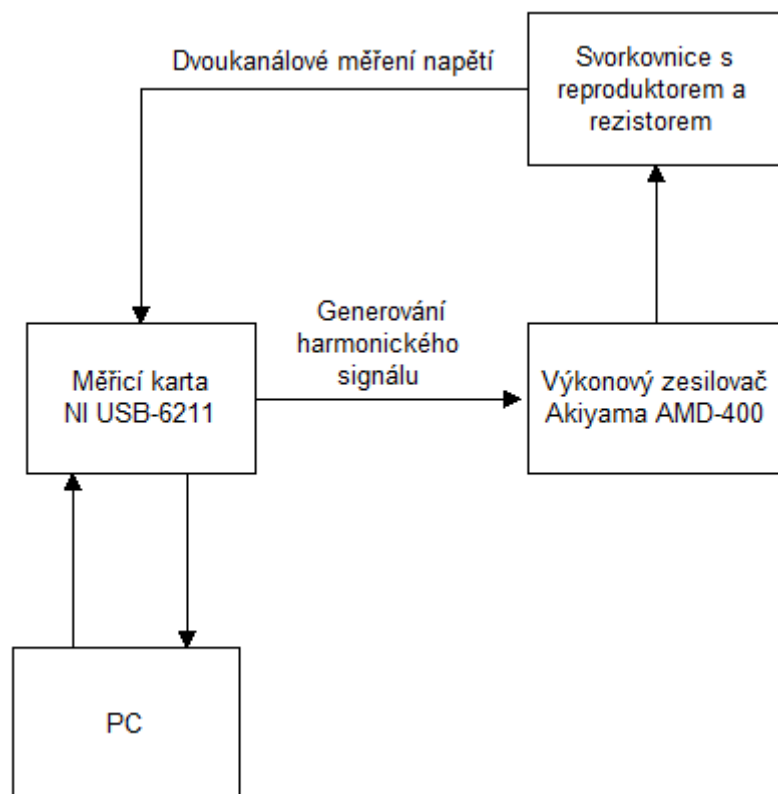
$$Bl = \sqrt{\frac{m}{M''_m - M'_m}} \quad (2.48)$$

$$M_m = Bl^2 \cdot M'_m \quad (2.49)$$

Kapitola 3

Měřicí obvod

Měřicí obvod se skládá z měřicí karty NI USB-6211, která generuje harmonický signál a měří napětí. Měření probíhá na reproduktoru a na sériové kombinaci reproduktoru a rezistoru. Signál generovaný kartou je zesílen výkonovým zesilovačem Akiyama AMD-400. Zesilovač je připojen k obvodu – sériové kombinaci reproduktoru a rezistoru. Generování dat a jejich zpracování je řízeno programem napsaným v LabView. K propojení jednotlivých prvků obvodu jsou využity BNC konektory, respektive sběrnice USB 2.0 v případě propojení měřicí karty a počítače.



Obrázek 3.1: Schéma měřicího obvodu

3.1 Měřicí karta NI USB-6211

Měřicí karta NI USB-6211 je profesionální zařízení DAQ (Systém pro sběr dat) od firmy National Instruments především pro využití v prostředích LabView a LabWindows. Karta je vybavena 16 analogovými vstupy s vstupním rozsahem až $\pm 10\text{V}$, 2 analogovými výstupy s výstupním rozsahem až $\pm 10\text{V}$, 4 digitálními vstupy a výstupy a 32-bitovými čítači. Maximální vzorkovací frekvence je 250kS/s , tzn. maximální počet vzorků za jednu vteřinu je 250 000. Pro komunikaci s počítačem používá karta rozhraní USB 2.0. Zařízení je doplněno o čtyřici BNC konektorů, které jsou zobrazeny na obrázku 3.2.

Analogové vstupy	
Počet	16 nesymetrických nebo 8 diferenciálních
Rozlišení A/D převodníku	16 bitů
Vzorkovací frekvence	maximálně 250kS/s
Vstupní rozsahy	$\pm 10\text{V}$, $\pm 5\text{V}$, $\pm 1\text{V}$, $\pm 0,2\text{V}$
Maximální pracovní hodnota napětí	$\pm 10,4\text{V}$
Analogové výstupy	
Počet	2
Rozlišení D/A převodníku	16 bitů
Vzorkovací frekvence	maximálně 250kS/s
Vstupní rozsah	$\pm 10\text{V}$
Digitální vstupy	
Počet	4
Digitální výstupy	
Počet	4
Čítače	
Počet	2
Rozlišení	32 bitů
Rozhraní USB	
Verze	USB 2.0 High Speed (480Mbit/s) nebo Full Speed (12Mbit/s)

Tabulka 3.1: Specifikace měřicí karty NI USB-6211 – převzato z [2]

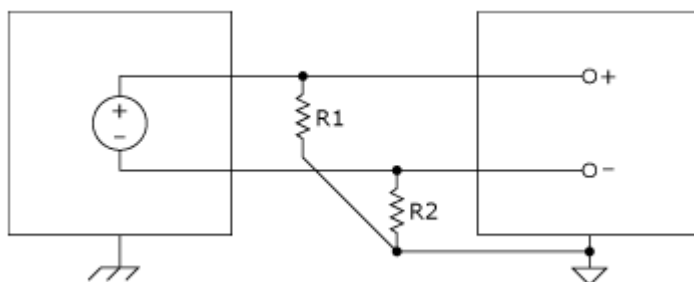


Obrázek 3.2: Měřicí karta NI USB-6211 s BNC konektory

3.1.1 Zapojení měřicí karty

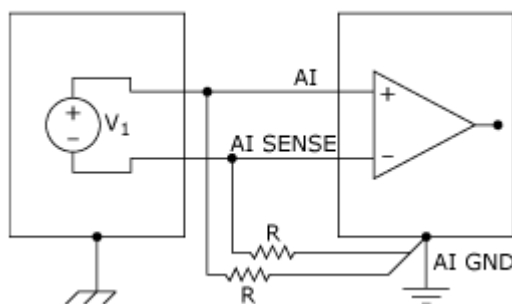
Zapojení měřicí karty se odvíjí od zdroje signálu, ten může být uzemněný nebo neuzemněný (resp. plovoucí). Karta NI-USB 6211, která se v tomto případě využívá jako zdroj signálu, je využívána jako zdroj neuzemněný. Plovoucí zdroj využívá jako zem referenční napětí karty na určité svorce – v našem případě AI GND. Pro plovoucí zdroj je možné kartu nastavit ve všech dostupných režimech – v obou nesymetrických (RSE i NRSE), tak i v režimu diferencíálním (viz obrázek A.1).

Diferenciální režim (na obrázku 3.3) potřebuje ke správnému zapojení dvě vstupní svorky. Pokud tedy použijete tento režim, na kartě bude dostupných dvakrát méně dostupných měřicích kanálů než při režimu asymetrickém. První vstupní svorka je připojena ke kladně orientovanému pólu operačního zesilovače, druhá je připojena k zápornému pólu operačního zesilovače (viz. obrázek 3.3). Ideální diferencíální zapojení tak měří rozdíl napětí mezi první a druhou vstupní svorkou. Na obou vstupních svorkách operačního zesilovače se však objevuje další napětí (tzv. Common-mode voltage). Ideální diferencíální zapojení toto napětí kompletně odfiltruje a napětí tak nezpůsobí chybu ve výsledku. V praxi existují konstanty CMRR (Common-mode rejection ratio) a Common-mode voltage range, které udávají, nakolik tlumí toto napětí, resp. v jaké oblasti jsme schopni pracovat s daným zapojením. Operační zesilovač přístroje v tomto případě také produkuje parazitní proudy, které nabíjejí parazitní kapacity na zdroji napětí. Tento jev je třeba potlačit zapojením dvou rezistorů, od kladného pólu svorky k zemi přístrojového zesilovače a od záporného pólu svorky k zemi přístrojového zesilovače. Rezistory musejí mít stejnou velikost, jejich hodnota musí být v řádu $10\text{k}\Omega$ až $100\text{k}\Omega$, aby se potlačily parazitní proudy operačního zesilovače, zároveň ale aby se nezměnila velikost generovaného napětí zdroje.



Obrázek 3.3: Měření plovoucího zdroje napětí v diferenciálním režimu – převzato z [14]

Režim **NRSE** (Nonreferenced Single-Ended) má vstupní svorku připojenou ke kladně orientovanému pólu operačního zesilovače, záporně orientovaný pól operačního zesilovače je připojen ke svorce AI SENSE (viz. obrázek 3.4). Na svorce AI SENSE je referenční napětí pro dané zapojení. Výsledné naměřené napětí je pak rozdíl mezi napětím na vstupní svorce připojené ke kladnému pólu operačního zesilovače a napětím na svorce AI SENSE. Pokud měříme plovoucí zdroj napětí, je třeba opět využít, tak jako u předchozího zapojení, dvou stejně velkých rezistorů o hodnotách mezi $10\text{k}\Omega$ a $100\text{k}\Omega$, které potlačí parazitní proudy operačního zesilovače.



Obrázek 3.4: Měření plovoucího zdroje napětí v NRSE režimu – převzato z [14]

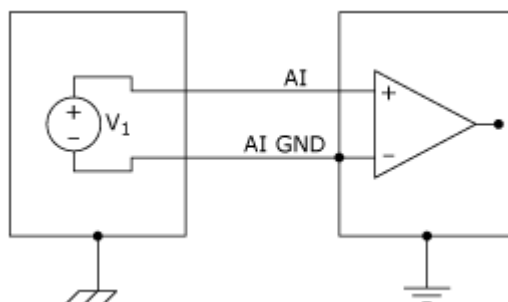
V režim **RSE** (Referenced Single-Ended), obdobně jako v režimu NRSE, je kladně orientovaný pól operačního zesilovače připojen ke vstupní svorce napěťového zdroje, záporně orientovaný pól operačního zesilovače je ale připojen ke svorce AI GND – zemi měřicí karty (viz. obrázek 3.5).

Nesymetrické režimy – tedy RSE a NRSE – se používají při relativně vysokých napětích (v řádech jednotek voltů a výše), když nepotřebujeme signál přenášet na dlouhé vzdálenosti, vše je důkladně odstíněno vůči vnějším vlivům a pokud je naše přesnost taková, že velikost chyby způsobena tímto zapojením bude zanedbatelná. NRSE oproti RSE o něco lépe filtruje šum, pokud ale špatně zapojíme rezistory bránící parazitním proudům, riskujeme velké chyby v měřicím systému.

Obecně tedy můžeme říci, že diferenciální režim se hodí na všechny aplikace, které nesplňují výše uvedená kritéria. Hodí se zejména tam, kde potřebujeme přenášet signál na velké vzdálenosti v nestabilním prostředí, také v aplikacích, kde je potřeba vysoká přesnost

a velmi dobrá filtrace šumu. Nevýhodou je zejména $2\times$ menší počet kanálů než v případě nesymetrických režimů.

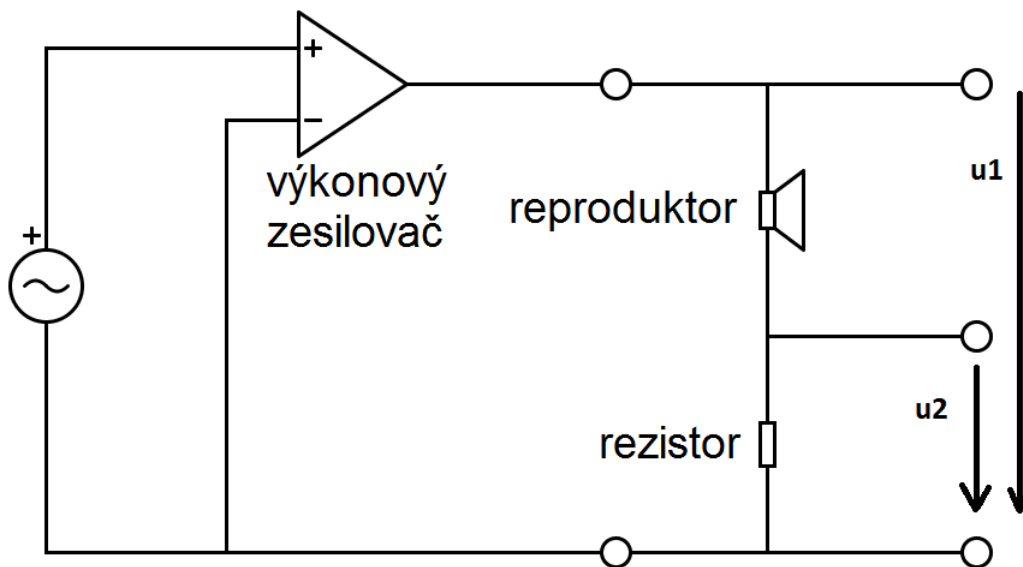
V případě dané práce jsem zvolil režim RSE – Reference Single-Ended. Zde hrálo roli zejména jednoduché zapojení, kdy přenos signálu probíhá na krátké vzdálenosti a není potřeba velmi vysoké přesnosti. [14]



Obrázek 3.5: Měření plovoucího zdroje napětí v režimu RSE – převzato z [14]

3.2 Svorkovnice

Svorkovnice se skládá ze sériové kombinace reproduktoru a rezistoru. Zapojení obvodu je zobrazeno na schématu 3.6. Do měřicího obvodu je zapojen výkonový zesilovač, který zesiluje generovaný signál. Výstupy u_1 a u_2 jsou pomocí BNC konektorů zapojeny do měřicí karty, která je schopna měřit pouze napětí. Z toho důvodu bylo nutné použít rezistor, pak je možné z měřených napětí vypočítat elektrický proud. Pro daný případ se využívá rezistor s nízkou hodnotou odporu, v našem případě o hodnotě $0,991 \Omega \pm 0,0015$.



Obrázek 3.6: Schéma obvodu se zapojením svorkovnice

3.3 Výkonový zesilovač Akiyama AMD-400

Akiyama AMD-400 je profesionální stereo zesilovač s výkonem až 400W. V měřícím obvodu je využit jako výkonový zesilovač generovaného signálu z měřicí karty (viz. obrázek 3.6). Specifikace přístroje jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Provozní zátěž	4 nebo 8Ω
Výkon při stereo využití a zátěži 8Ω	2× 150W
Výkon při stereo využití a zátěži 4Ω	2× 200W
Výkon při můstkovém využití a zátěži 8Ω	400W
Frekvenční odezva	20kHz–200kHz ($\pm 0.5\text{dB}$)
Celkové harmonické zkreslení	20kHz–200kHz ($\leq 0.1\text{dB}$)
Tlumení	$\leq 200:1$
Rychlost přeběhu	$\leq 25\text{V}/\mu\text{S}$
Vstupní citlivost	0.75V/1V/1.44V
Vstupní konektory	XLR (2×)
Výstupní konektory	Speakon (2×), Binding post (2×)
Napětí	230V/50Hz nebo 115V/60Hz
Velikost	482mm×405mm×44mm
Váha	10,6kg

Tabulka 3.2: Specifikace výkonového zesilovače Akiyama AMD-400 – převzato z [3]



Obrázek 3.7: Výkonový zesilovač Akiyama AMD-400 – převzato z [4]

Kapitola 4

Program pro měření impedanční charakteristiky

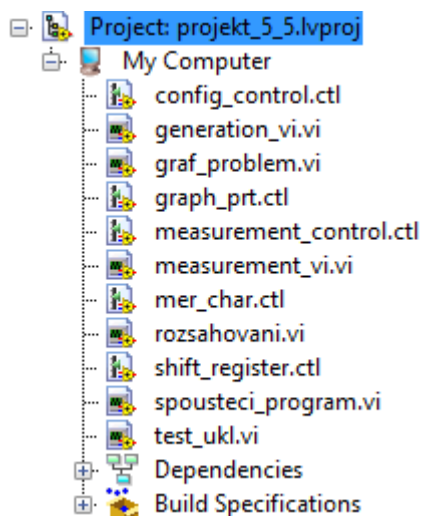
Program pro měření impedanční charakteristiky reproduktorů byl vytvořen v grafickém prostředí LabView od firmy National Instruments. Prostředí bylo zvoleno především proto, že využíváme měřicí kartu od stejné firmy – prostředí poskytuje široké možnosti pro sběr a následné zpracování dat.

4.1 Struktura programu

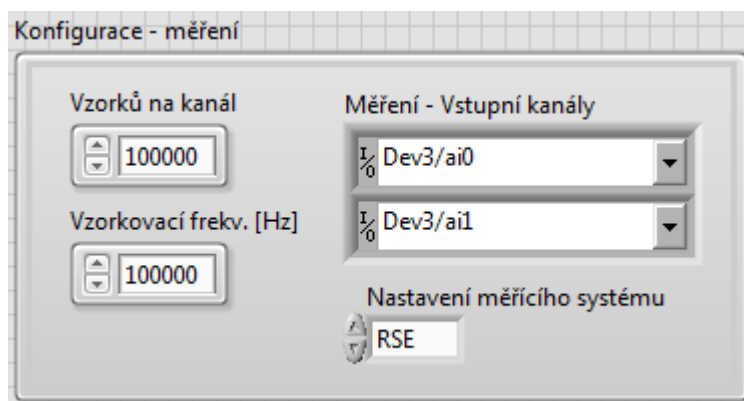
Struktura programu je přizpůsobena programovacímu jazyku LabView. Specifickým znakem tohoto jazyka je, že uživatel nemůže vytvářet funkce. Tuto skutečnost ale částečně nahrazuje možnost vytváření tzv. SubVI, kdy do hlavního programu (označujeme jej jako VI – odvozeno z označení Virtual Instrument) zanořujeme tzv. podprogramy.

Struktura programu je tvořena jednotlivými VI a SubVI, tedy hlavním funkčním programem a dalšími podprogramy. Najdeme zde také soubory formátu .ctl, které obsahují uživatelsky vytvořené datové typy, následně využité v hlavním programu. Strukturu je možné vidět na obrázku 4.1.

První uživatelsky vytvořený typ je **config_control**. Slouží k propojení vstupních prvků, které slouží k nastavení konfigurace generátoru, popsané v kapitole 4.2. Podobnou funkci má i soubor **measurement_control**, slouží k nastavení konfigurace měřících kanálů. Datový typ je zobrazen na obrázku 4.2. Datový typ **graph_prt** slouží k počátečnímu nastavení grafu v záložce Grafy Z/f, který zobrazuje průběh reálné a imaginární složky na jednom grafu. Soubor **mer_char** slouží k základní konfiguraci pro měření impedanční charakteristiky. Datový typ **shift_register** slouží pro uložení stavů, které jsou využity ve stavovém automatu. Stavů určují posloupnost jednotlivých částí programu při měření impedanční charakteristiky.

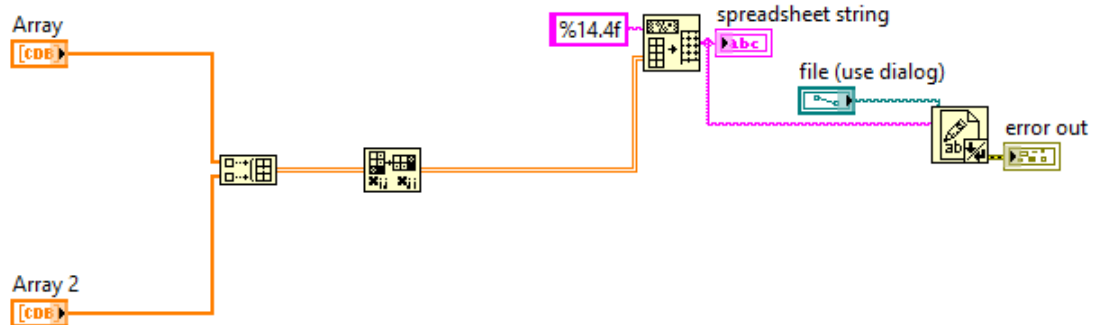


Obrázek 4.1: Struktura programu pro měření impedanční charakteristiky



Obrázek 4.2: Datový typ sloužící ke konfiguraci měření

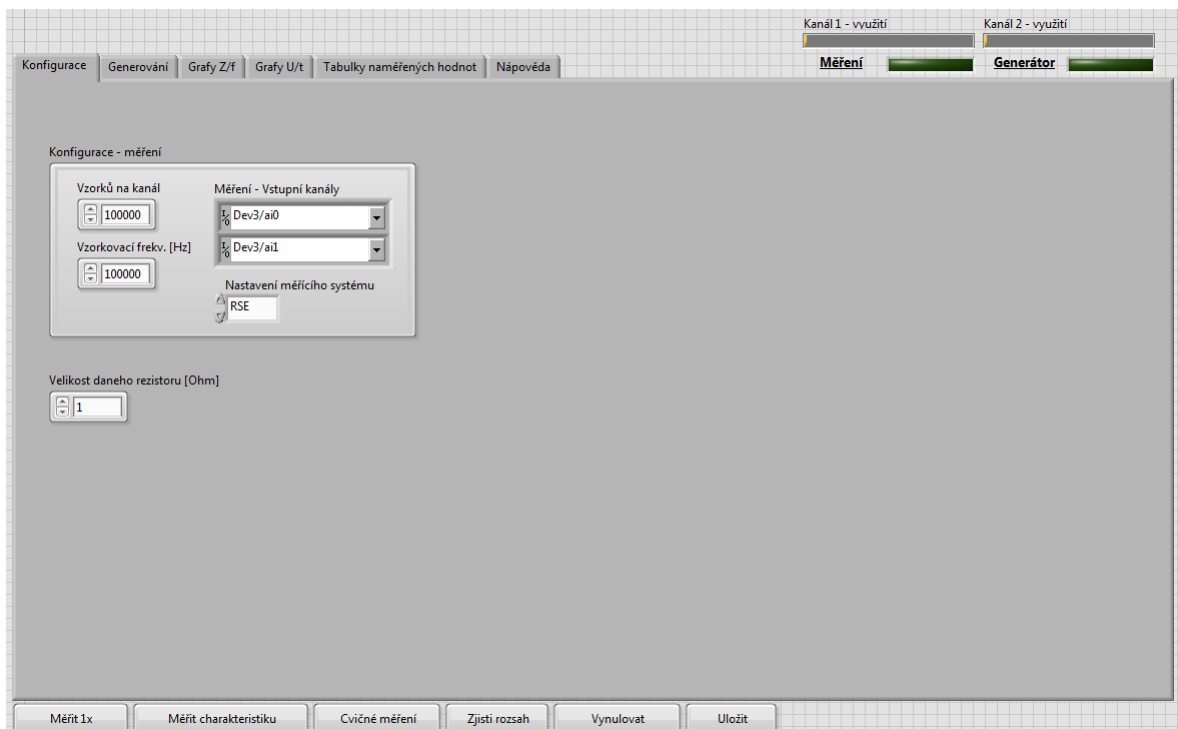
Celá funkční logika programu a smyčka umožňující uživatelské ovládání programu je obsažena ve VI **spousteci_program**. Podprogramy **generation_vi** a **measurement_vi** obsahují v hlavním programu několikrát se opakující generování harmonického signálu, resp. dvoukanálové měření dat z měřicího obvodu. Podprogram **rozsahovani** umožňuje měření dat rozšířené o nastavování nejvhodnějšího rozsahu jednotlivých kanálů. Vytváření grafu, který zobrazuje dva průběhy naměřených dat v jednom grafu provádí **graf_problem**. SubVI, zobrazené na obrázku 4.3, ukládá naměřená data do předem zvoleného souboru.



Obrázek 4.3: SubVI umožňující uživateli uložit data do předem zvoleného souboru

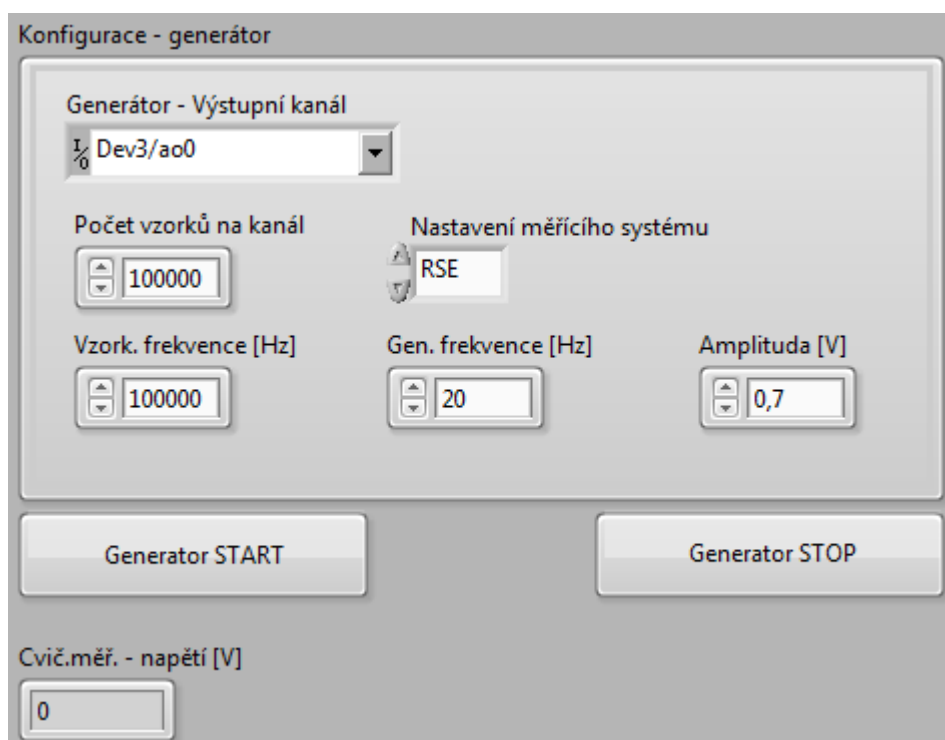
4.2 Grafické rozhraní

Grafické rozhraní je rozděleno do několika záložek, každá záložka reprezentuje jinou funkci programu. V pravém horním rohu se nacházejí indikátory měření a generování, nad nimi jsou umístěny prvky, na nichž se zobrazuje procentuální využití rozsahů vstupních kanálů. V dolní části programu jsou umístěna tlačítka, kterými se spouští jednotlivá měření, nulují jednotlivé prvky grafického rozhraní a ukládají naměřená data.



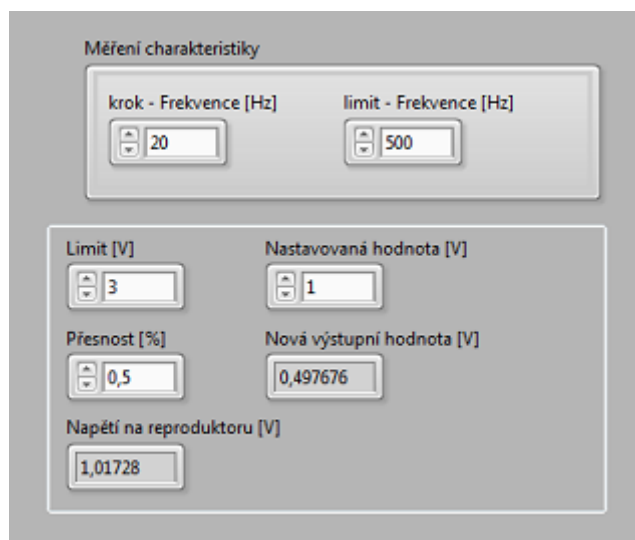
Obrázek 4.4: Uživatelské prostředí programu

Na obrázku 4.4 je zobrazena první záložka – **Konfigurace**. Tato záložka především slouží k nastavení konfigurace měřících kanálů, tedy k nastavení vstupních kanálů na měřící kartě, vzorkovací frekvence, počtu vzorků na jednotlivé kanály a nastavení měřícího systému (viz. kapitola 3.1.1). Velikost rezistoru využitým v zapojení na obrázku 3.6 je třeba také zadat na této záložce. Další záložka slouží k nastavení konfigurace generátoru, ale také k nastavení měření impedanční charakteristiky elektrodynamického měniče. Nastavení generátoru obsahuje výstupní kanál, vzorkovací frekvence, nastavení měřícího systému, frekvenci a amplitudu generovaného signálu. Pod panelem pro nastavení generátoru se nachází tlačítka pro vypnutí a zapnutí generátoru.



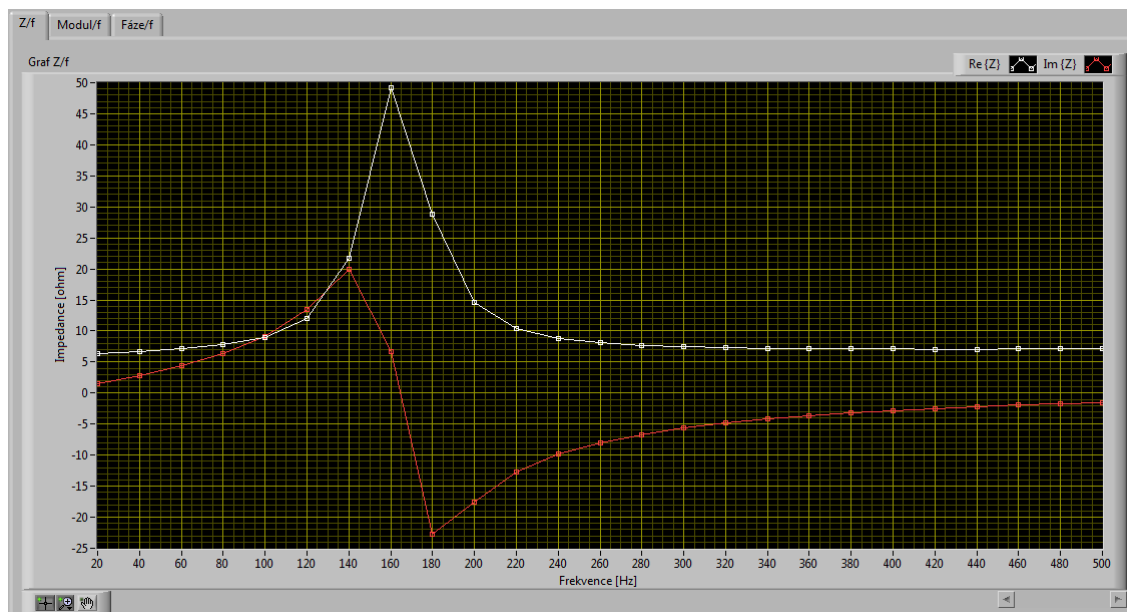
Obrázek 4.5: Panel pro nastavení generátoru

Na opačné straně záložky se nachází panel sloužící k nastavení frekvenční charakteristiky, krok, s jakým má program postupovat při měření frekvenční charakteristiky a hodnotu, ve které má přestat generovat a měřit. Další panel slouží k nastavení pro udržování konstantního napětí na reproduktoru. Jsou zde tři prvky, které je nutné nastavit – maximální hodnotu napětí, kterou nesmí generátor na reproduktoru překročit, hodnotu napětí, kterou chceme na reproduktoru udržovat a přesnost této hodnoty v procentech. Dva indikátory ukazují hodnotu, která se bude na reproduktoru generovat a právě naměřené napětí na reproduktoru.



Obrázek 4.6: Panel pro nastavení měření impedanční charakteristiky

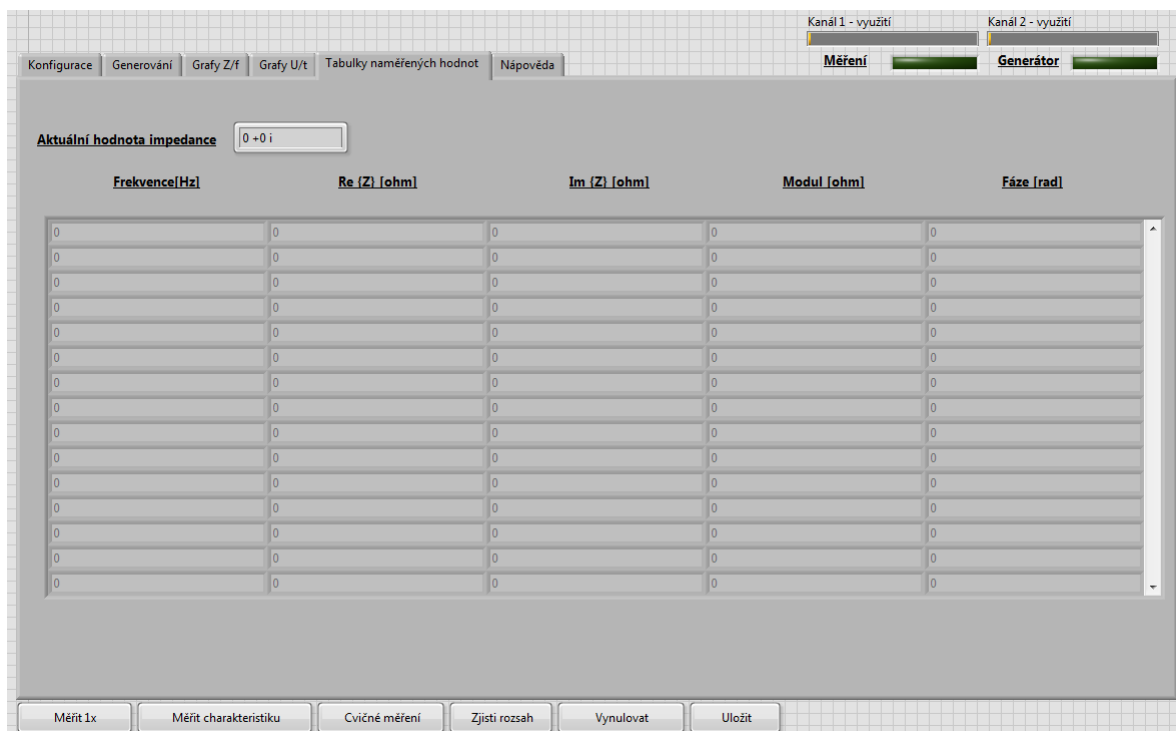
Třetí záložka slouží k zobrazení samotné impedanční charakteristiky, tvoří jí tři další panely. Na panelu **Z/f** je současně zobrazena reálná a imaginární složka impedanční charakteristiky elektrodynamického měniče. Na panelech **Modul/f** a **Fáze/f** jsou umístěny grafy zobrazující modul, resp. fázi impedance vůči frekvenci. Pod každým grafem se nachází malý panel, který umožňuje zoom nebo posun po grafu.



Obrázek 4.7: Záložka Grafy Z/f

Záložka **Grafy U/t** slouží ke kontrole, zda jsou na jednotlivých vstupech měřicích karty naměřeny očekávané hodnoty. Záložka **Tabulky naměřených hodnot** obsahuje indikátor s

aktuální hodnotou impedance a tabulku s naměřenými hodnotami. V tabulce se nachází pět hodnot – frekvence, reálná a imaginární složka impedance, modul a fáze impedance. Poslední záložka (**Nápověda**) slouží k rychlé orientaci v programu.

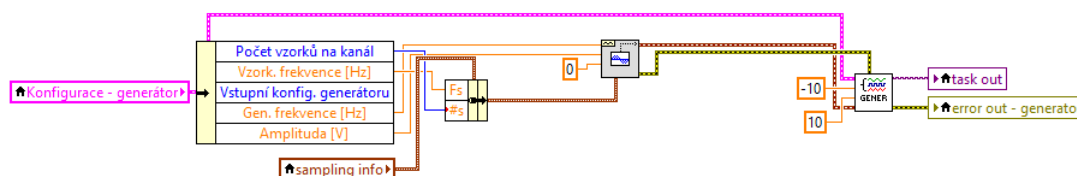


Obrázek 4.8: Záložka Tabulky naměřených hodnot

4.3 Měření impedanční charakteristiky

Měření impedanční charakteristiky začíná konfigurací měřících kanálů, generátoru a panelu pro měření impedanční charakteristiky. Po nastavení programu je vhodné zapnout generátor a provést cvičné měření stiskem tlačítek **Zjistí rozsah** a **Cvičné měření**. Uživatel tak má možnost upravit generátor, aby se co nejvíce přiblížil k napětí, které chce nastavit na reproduktoru.

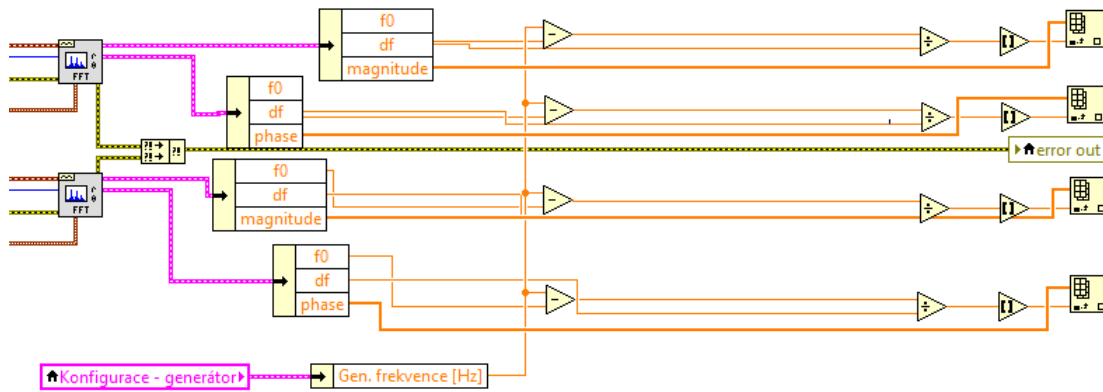
Automatické měření impedanční charakteristiky následně začíná stiskem tlačítka **Měřit charakteristiku**. Automatické měření je opakující se smyčka, uvnitř které se nachází stavový automat. Stav se mění automaticky s počátkem měření nebo s uživatelským zásahem do programu. Začínáme opětovným nastavením generátoru. Zde se nejprve kontroluje, zda frekvence, kterou chceme generovat není větší než limit, který je nastaven uživatelem. Pokud ano, v programu se před začátkem generování signálu zobrazí dialogové okno s varováním a program nepokračuje dalším krokem. Další podmínka, která následuje v této části programu, se týká zásahu uživatele. Pokud uživatel opět klikne na tlačítko **Měřit charakteristiku**, měření impedanční charakteristiky se zastaví. Pokud jsou obě podmínky splněny, program opětovně nastaví a spustí generátor.



Obrázek 4.9: Generování harmonického signálu

Po nastavení generátoru následuje další stav stavového automatu – měření. Zde se nakonfiguruje a následně provede dvoukanálové měření napětí. Poté je zkontrolováno, zda se nezměnil vstupní rozsah měřicí karty a tato informace se následně využije v dalším měření (viz. kapitola 4.3.1). V tomto bodě se také provádí zpracování signálu. Nejprve jsou hodnoty napětí přepočteny pomocí Rychlé Fourierovy transformace. Po přepočtu jsme díky nástrojům LabView schopni zjistit hodnotu daného napětí při požadované frekvenci. Dostaneme hodnoty pole hodnot po Fourierově transformaci, počáteční hodnotu pole – f_0 a krok, po kterém po sobě frekvence v poli následují. Pořadí n požadovaného prvku v poli je určen pomocí vzorce 4.1, generovanou frekvenci označujeme ve vzorci jako f .

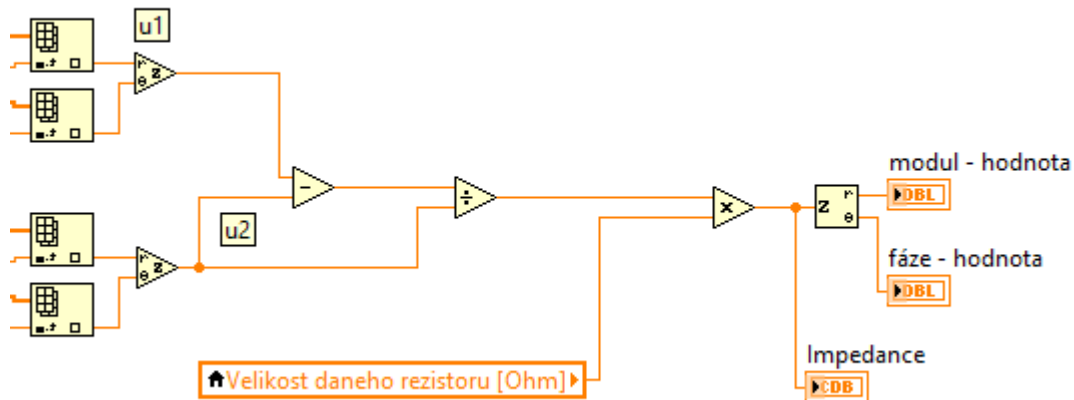
$$n = \frac{f - f_0}{df} \quad (4.1)$$



Obrázek 4.10: Zpracování naměřených dat

Všechny parametry jsou tak nastaveny, aby kmitočet odpovídal hledanému prvku v poli. Tento výpočet opakujeme čtyřikrát, každému ze dvou napětí je potřeba zjistit fázi a modul, které následně převedeme do komplexního tvaru. Pokračujeme dalším výpočtem podle vzorce 4.2, kde R je velikost použitého rezistoru, u_1 a u_2 jsou komplexní složky spektra napětí daného kmitočtu na prvním, resp. druhém kanálu. Protože u_1 je napětí na sériové kombinaci reproduktoru a rezistoru (viz. kapitola 3.2), musíme nejprve odečíst napětí u_2 od napětí u_1 . Díky němu už zjistíme konečnou impedanci pro danou frekvenci.

$$Z = \frac{\widehat{u}_1 - \widehat{u}_2}{\widehat{u}_2} \cdot R \quad (4.2)$$

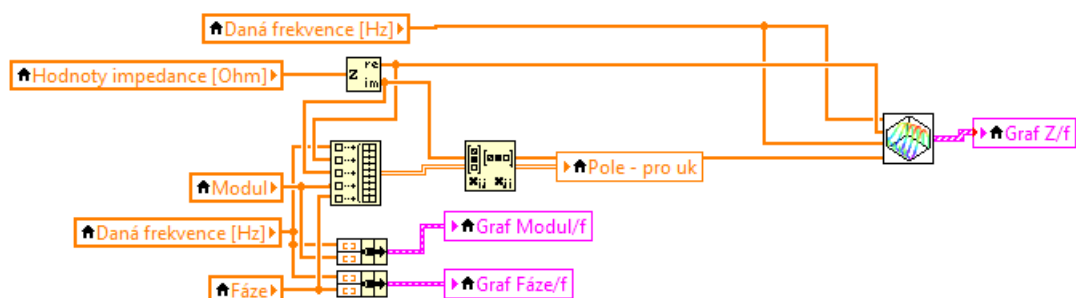


Obrázek 4.11: Výpočet impedance podle vzorce 4.2

Další fáze měření ještě zahrnuje ošetření zjištěného rozsahu. V této fázi by se mohlo stát, že program by rozsah nemusel zjišťovat správně a mohl by neočekávaně skončit chybou. Za

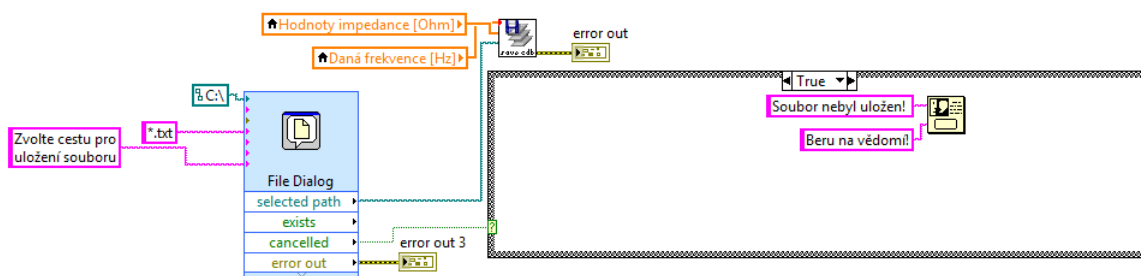
určitých podmínek se proto nastaví největší rozsah měřících kanálů, tedy (-10V až 10V).

Měřenou impedanci je vhodné měřit při stálém napětí, proto další krok stavového automatu začíná kontrolou a případným přenastavením výstupního napětí generátoru. To je podrobněji popsáno v kapitole 4.3.2. Po tomto kroku se zvýší generovaná frekvence o nastavený krok, který má program měřit. Data se uloží do tabulek a aktualizují se grafy. Pokud je aktuální generovaná frekvence rovna limitu frekvence, do které chceme charakteristiku měřit, program přejde do posledního stavu – ukládání. Pokud ne, program pokračuje v generování dál.



Obrázek 4.12: Ukládání dat do tabulky a jednotlivých grafů

V posledním kroku je potřeba uložit data. Nejprve se vypne generátor a následně se zobrazí dialogové okno, kde si uživatel vybere umístění a název souboru s daty. Pokud se rozhodne data neuložit, objeví se dialogové okno oznamující, že data nebudou uložena, data lze ale uložit i poté pomocí tlačítka **Uložit**. Ukládání je zobrazeno na obrázku 4.13.

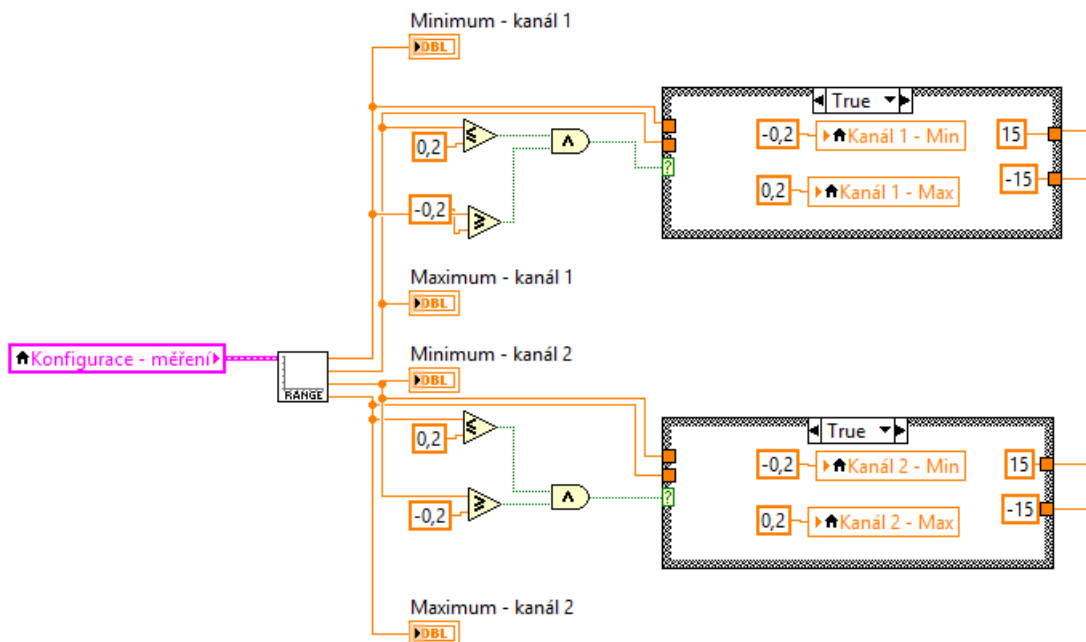


Obrázek 4.13: Ukládání dat po ukončení měření frekvenční charakteristiky

4.3.1 Zjišťování rozsahu měřících kanálů

Původní myšlenka, že rozsah jednotlivých kanálů půjde nastavit pouze na začátku měření, se neosvědčila. Problémem je rozsah měřícího kanálu, který měří napětí na rezistoru zapojeném sériově s reproduktorem, pokud se dostaneme do rezonance při měření frekvenční charakteristiky. V tomto případě je na rezistoru velmi malé napětí a pokud je špatně nastavený rozsah, na rezistoru se naměří šum. Proto kromě počátečního zjištění rozsahu bylo třeba přidat ještě zjišťování rozsahu před každým krokem měření. Po uvážení několika možností se jako správné řešení jevílo vzít maximum a minimum naměřené v předchozím kroku a to

vždy přednásobit koeficientem. Po několika testech byl stanoven koeficient roven 1,1. Koeficientem přenásobené minimum se následně porovná s danými rozsahy karty a je přiřazeno do správného rozsahu.



Obrázek 4.14: Zjišťování rozsahu měřicích kanálů

4.3.2 Udržování konstantního napětí na reproduktoru

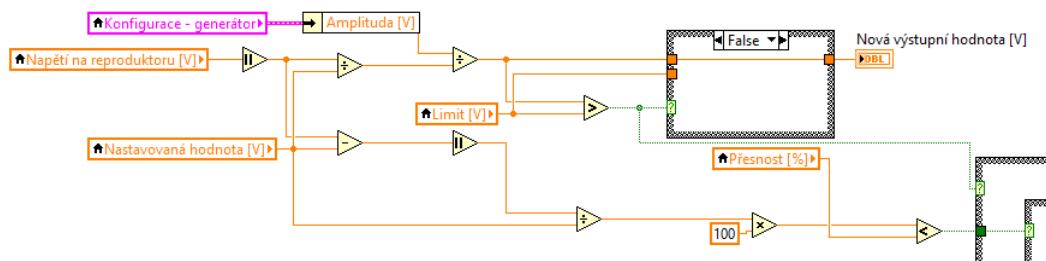
Udržování konstantního napětí na reproduktoru se řídí několika podmínkami. Nejprve podělíme absolutní hodnotu napětí U , které chceme na reproduktoru generovat, hodnotou napětí U_r , které jsme na reproduktoru právě naměřili. Následně amplitudu generovaného napětí U_m vydělíme získaným podílem (podle vzorce 4.3) a získáme hodnotu U_{x1} . Pokud je U_{x1} menší než nastavený limit (resp. maximální hodnota napětí, kterou dovolujeme na reproduktoru naměřit), nastaví se jako nově generovaná amplituda právě hodnota U_{x1} a pokračujeme dalším krokem. Pokud tuto podmínku nesplníme, program zobrazí dialogové okno s chybovým hlášením a měření končí.

$$U_{x1} = \frac{U_m}{\frac{|U|}{U_r}} \quad (4.3)$$

Další krok začíná odečtením hodnoty napětí U_r , právě naměřené na reproduktoru, od hodnoty napětí U , kterou chceme na reproduktoru udržovat v absolutní hodnotě. Tento rozdíl v absolutní hodnotě se pak opět vydělí hodnotou napětí U a následně je vynásoben konstantou 100 (viz. vzorec 4.3). Dostaneme tak hodnotu x v procentech, kterou porovnáme s přesností danou uživatelem. Pokud je hodnota x větší než přesnost daná uživatelem,

generátor začne generovat znovu se stejnou frekvencí a s amplitudou U_{x1} zjištěnou v předchozím kroku. Pokud je přesnost menší než přesnost požadovaná uživatelem (a tím pádem hodnota napětí generovaná na reproduktoru se od požadované neliší o více než je dáno přesností), daná hodnota impedance se pro danou frekvenci uloží a program pokračuje v měření s frekvencí zvětšnou o krok nastavený uživatelem.

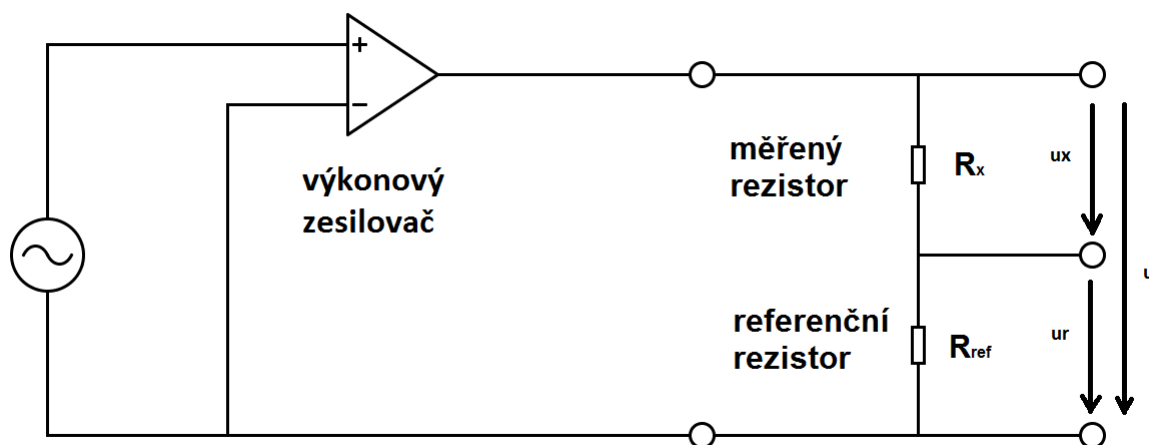
$$x = \frac{||U_m| - U|}{U} \cdot 100 \quad (4.4)$$



Obrázek 4.15: Udržování stálého napětí na reproduktoru

4.4 Testování programu

Testování programu probíhalo pomocí dvou obvodů. Aritmetický průměr deseti naměřených hodnot impedance pomocí programu pro měření impedanční charakteristiky je porovnáván s hodnotou impedance součástky zjištěné na RLC měřiči Hewlett Packard 4284A. Testování probíhá stejně jako měření impedanční charakteristiky, rezistor zapojený do série se zjišťovanou součástí považujeme jako referenční, kdy přesně známe jeho velikost, kterou do programu zadáváme. Velikost referenčního rezistoru byla vždy změřena pomocí RLC měřiče Hewlett Packard 4284A s přesností $\pm 0.05\%$. Velikost impedance referenčního rezistoru pro dané frekvence jsou přiloženy na naměřeném CD. Dále byla zjišťována procentuální relativní chyba všech měření (kromě fáze měření se dvěma sériově zapojenými rezistory, kde chyba měření, z důvodu hodnot blížících se nule, nelze vypočítat), ta je uvedena vždy v tabulkách pod tabulkami s naměřenými hodnotami.



Obrázek 4.16: Obvod se dvěma sériově zapojenými rezistory

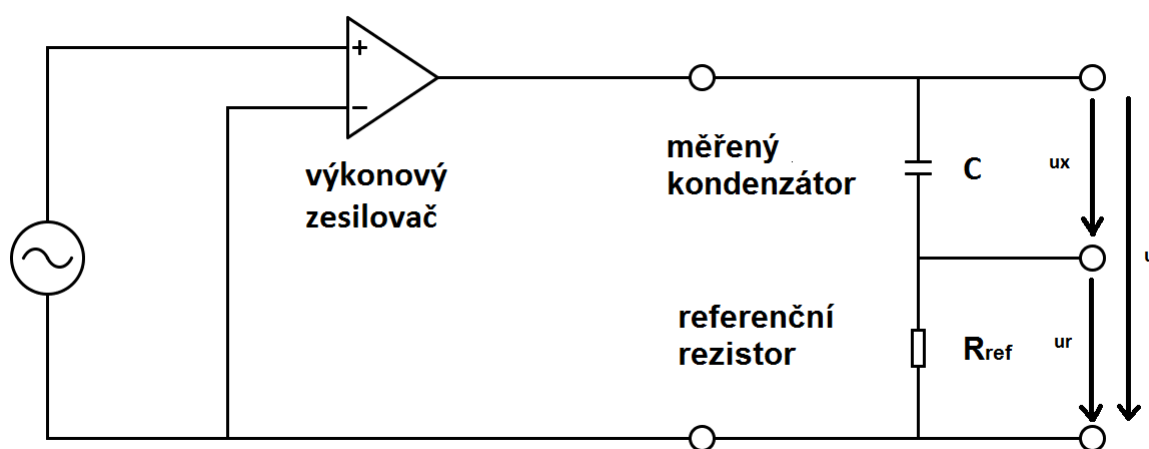
V prvním případě byl použit obvod, jehož schéma je na obrázku 4.16. Byly použity rezistor R_x , sériově k němu byl zapojen referenční rezistor R_{ref} . Impedance měřeného rezistoru byla zjištěna pro každou měřenou frekvenci pomocí RLC měřiče Hewlett Packard 4284A s přesností $\pm 0.05\%$. V tabulce 4.1 je uvedena naměřená impedance zjištěná programem pro měření impedanční charakteristiky a impedance zjištěná na RLC měřiči HP 4284A. Naměřené hodnoty použité pro výpočet aritmetického průměru jsou uvedeny na přiloženém CD.

Frekvence [Hz]	Naměřená impedance		Impedance součástky zjištěná na RLC měřiči	
	Modul [Ω]	Fáze [rad]	Modul [Ω]	Fáze [rad]
40	99,937	-0,003	100,097	-0,001
60	99,940	-0,003	100,092	0,000
80	99,936	-0,005	100,091	0,000
100	99,943	-0,006	100,090	0,000
200	99,948	-0,014	100,098	0,000

Tabulka 4.1: Tabulka naměřených hodnot pro hodnoty impedance měřeného rezistoru

Frekvence [Hz]	Chyba měření
	Modul [Ω]
40	0,160 (0,160%)
60	0,152 (0,152%)
80	0,155 (0,155%)
100	0,147 (0,147%)
200	0,150 (0,150%)

Tabulka 4.2: Tabulka chyb měření pro naměřené hodnoty impedance měřeného rezistoru



Obrázek 4.17: Obvod s kapacitorem sériově zapojeným k rezistoru

Pro druhé měření bylo využito obvodu, který je zobrazen na obrázku 4.17. Zde je zapojen kondenzátor C sériově s referenčním rezistorem R_{ref} . Velikost impedance kondenzátoru byla zjištěna na RLC měřiči HP 4282A s přesností $\pm 0.05\%$ pro každou měřenou frekvenci. V tabulce 4.3 je pak uvedena naměřená impedance zjištěná programem pro měření impedanční charakteristiky a impedance zjištěná pomocí RLC měřiče. Naměřené hodnoty použité pro výpočet aritmetického průměru jsou uvedeny na příloženém CD.

Frekvence [Hz]	Naměřená impedance		Impedance součástky zjištěná na RLC měřiči	
	Modul [Ω]	Fáze [rad]	Modul [Ω]	Fáze [rad]
40	417,264	-1,546	418,870	-1,547
60	279,849	-1,540	280,580	-1,541
80	210,834	-1,536	211,314	-1,535
100	169,460	-1,532	169,727	-1,530
200	86,747	-1,514	86,438	-1,510

Tabulka 4.3: Tabulka naměřených hodnot pro impedanci měřeného kondenzátoru

Frekvence [Hz]	Chyba měření	
	Modul [Ω]	Fáze [rad]
40	1,606 (0,383%)	0,001 (0,065%)
60	0,731 (0,261%)	0,001 (0,065%)
80	0,48 (0,227%)	0,001 (0,065%)
100	0,267 (0,157%)	0,002 (0,131%)
200	0,309 (0,357%)	0,004 (0,265%)

Tabulka 4.4: Tabulka chyb měření pro naměřené hodnoty impedance kondenzátoru

Všechna tato měření jsou samozřejmě zatížena určitou nejistotou měření. Nejistotu v tomto případě tvoří zejména přesnost zadávané hodnoty referenčního rezistoru ($\pm 0.05\%$), dále šum měřicí karty, použitá kabeláž obvodu, mírně rozdílná teplota při měření součástek pomocí RLC měřiče a při měření programem pro měření impedanční charakteristiky, v případě měřicí karty pak výrobce udává i chybu měřicího rozsahu, která se se zvětšujícím se měřícím rozsahem zvyšuje. V měření je dále vidět chyba fáze, tu způsobuje multiplexovaný vstup měřicí karty, kdy v případě vícekanálového měření existuje určitá doba mezi sejmutím hodnoty napětí prvního a druhého kanálu. V našem případě je tato doba 0,00014 sekundy. Tato hodnota byla zjištěna pomocí LabView, kdy tato hodnota je převrácenou hodnotou tzv. Conversion Rate, což je doba, kterou trvá přeměna analogových (naměřených) dat do digitální podoby (viz. [25]).

V případě měření rezistoru a kondenzátoru jsou chyby menší než 0,5%, zde jsou výsledky pro potřeby této práce uspokojivé.

Kapitola 5

Algoritmus pro výpočet obvodových parametrů

Algoritmus pro výpočet elektromechanických obvodových parametrů elektrodynamického měniče je vytvořen pomocí MATLABu, resp. Curve Fitting Toolboxu, který umožňuje prokládat křivky nebo plochy naměřenými daty. Algoritmus využívá funkce `fit`, která nafituje naměřená data na námi zvolený model a zjistí elektromechanické obvodové parametry. Funkce umožňuje pomocí parametru `fitoptions` nastavit rozšiřující parametry, jako např. jakou metodu bude používat, kolikrát fitování opakovat nebo nastavit hodnoty, které omezí rozsah hledání správných hodnot.

Na úplném počátku algoritmu je třeba nastavit vstupní (resp. naměřená) data, v našem případě tedy modul impedance naměřený programem pro měření impedanční charakteristiky elektrodynamického měniče (viz. kapitola 4). Ta jsou následně využita v rovnicích modelu elektrodynamického měniče (viz. rovnice (2.42), resp. (2.46)). Protože model využitý v našem případě je nelineární vzhledem k hledaným parametrům, pro fitování na naměřená data je využita nelineární metoda nejmenších čtverců (viz. kapitola 5.1). V rámci algoritmu bylo třeba nastavit maximální počet opakování fitu (resp. maximální počet iterací samotného algoritmu) a maximální počet zhodnocení výsledku. Experimentálně měly nejlepší výsledky hodnoty 4000, resp. 6000. Pro algoritmus bylo nutné využít i omezující podmínky, algoritmus má jako nejmenší možnou hodnotu pro všechny parametry nastavenou nulu. Toto omezení bylo nutné hlavně v případě parametru L_e , zde totiž v případě, že data měříme pouze v nízkých frekvencích kolem stovek Hz, nelze parametr vypočítat. Algoritmus tak přiřazoval parametru L_e záporné hodnoty, což v případě našeho modelu není možné. Důležitou součástí algoritmu je nastavení počáteční hrubé hodnoty všech parametrů, které nastavuje uživatel. Pro model daný rovnicí (2.42), tedy pro naměřená data bez přidané hmotnosti, je nutné nastavit parametry L_e , M'_m (viz. rovnice 2.43), R'_m (viz. vztah 2.43) a C'_m (viz. vztah (2.45)). Pro model daný rovnicí (2.46), tedy pro průběh pro naměřená data s přidanou hmotností, je třeba zadat parametry L_e , C'_m , R'_m a M''_m (viz. vztah (2.48)). Pro zjednodušení hledání těchto parametrů byl vyvinut program pro výpočet elektromechanických obvodových parametrů (viz. kapitola 5.2). V programu stačí nastavit pouze hrubé odhady výsledných hodnot a sdružené parametry R'_m , C'_m , M'_m a M''_m vypočte program. Pro zrychlení algoritmu fitujeme pouze parametry L_e , R_m , C_m , M_m a Bl . Každý parametr zvyšuje exponenciálně složitost a

tím pádem i délku trvání algoritmu, proto se ve finálním řešení upustilo od fitování parametru R_e , který si uživatel změří ohmmetrem na svorkách reproduktoru.

Algoritmus pro zjišťování elektromechanických parametrů pak vypadá následovně:

```

1 [xData_bezmod, yData_bezmod] = prepareCurveData( handles.glob_xdata_bezmod,
    handles.glob_ydata_bezmod );
3 ka = 'abs(';
kb = num2str(handles.glob_re);
5 kc = ' + (1i*2*pi*Le*xData_bezmod) + 1./(Rm+1i*2*pi*xData_bezmod*Mm+1./(1i*Cm*
    2*pi*xData_bezmod))';
7 final_result = strcat(ka,kb,kc); %rovnice pro dany fit
9 ft = fitype(final_result, 'independent', 'xData_bezmod', 'dependent', '
    yData_bezmod'); %nastaveni modelu a dat pro fit
opts = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares'); %vyber metody pro fit
11 opts.Algorithm = 'Trust-Region';
opts.MaxIter = 4000; %maximalni pocet iteraci algoritmu
13 opts.MaxFunEvals = 6000; %maximalni pocet zhodnoceni vysledku
opts.Lower = [0 0 0 0]; %omezujici podminky
15 opts.StartPoint = [handles.cm_sdr_bezmod handles.glob_le handles.mm_sdr_bezmod
    handles.rm_sdr_bezmod]; %pocatecni hrube hodnoty
17 [fitresult, gof] = fit(xData_bezmod, yData_bezmod, ft, opts);

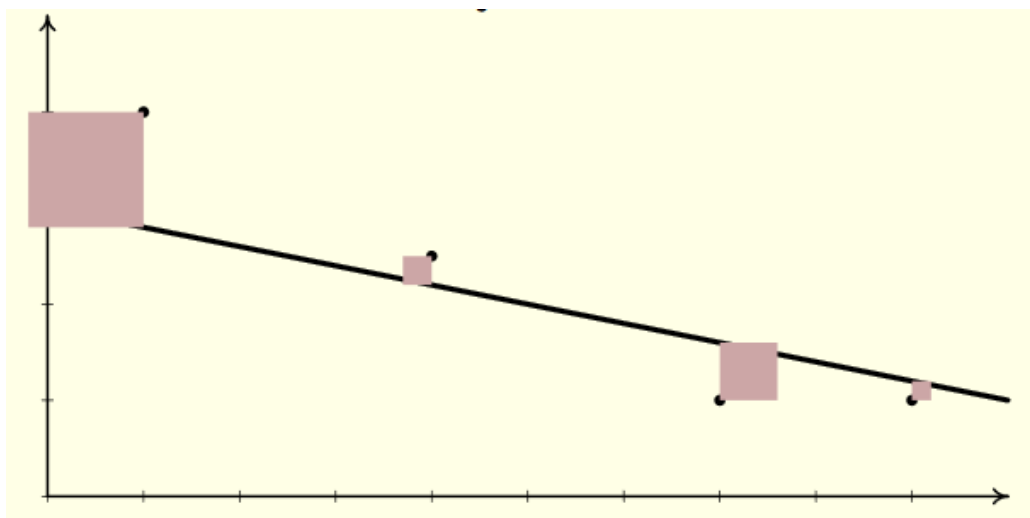
```

Algoritmus je třeba použít dvakrát, jednou pro rovnici (2.42) a následně pro rovnici (2.46). Poté, co oba průběhy algoritmu skončí, dostaneme parametry L_e , C'_m , R'_m , M'_m a M''_m . Parametry M_m a B_l vypočítáme pomocí rovnic (2.48), resp. (2.49). Protože algoritmus proběhne dvakrát, jak pro naměřená data bez přidané hmotnosti, tak pro naměřená data s přidanou hmotností, dostáváme dvě hodnoty parametrů L_e , C'_m a R'_m . Teoreticky by tyto hodnoty měly být stejné, v praxi tomu tak však většinou není. Proto výsledné hodnoty C'_m , R'_m a L_e vypočítáme jako aritmetický průměr dvou naměřených hodnot. Výsledné L_e je tak dáno aritmetickým průměrem, hodnoty C'_m a R'_m je třeba dosadit do vztahu (2.45), resp. (2.43) a tak získat hodnoty C_m a R_m .

5.1 Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců je matematicko–statistická metoda. Využití této metody nalezneme zejména při zpracování experimentálních dat získaných měřením. Název metody vychází z faktu, že řešení má minimalizovat součet čtverců odchylek vůči každé rovnici (viz. obrázek 5.1). Metoda v základní podobě řeší nekompatibilní soustavy lineárních rovnic (resp. soustavy rovnic, kdy řešení soustavy nelze dosáhnout klasickými metody, případně kdy je řešení klasickými metodami příliš složité). V obecnější podobě metoda řeší i soustavy nelineárních rovnic, viz. např [19].

V případě našeho problému je třeba využít metodu nejmenších čtverců v nelineární podobě, resp. využít nelineární regresi za využití metody nejmenších čtverců. Předpis pro nelineární model v základním tvaru je definován vztahem (5.1).



Obrázek 5.1: Ilustrace metody nejmenších čtverců při aproximaci bodů přímkou - převzato z [19]

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) + \boldsymbol{\epsilon} \quad (5.1)$$

$\boldsymbol{\epsilon}$ je v tomto případě vektor chyb, \mathbf{x} je matice daného modelu, $\boldsymbol{\beta}$ je vektor koeficientů a \mathbf{y} je vektor výsledných hodnot a f je funkce závislá na parametrech \mathbf{x} a $\boldsymbol{\beta}$. Pro tento model musí platit, že nemá lineární koeficienty, případně, že je kombinací lineárních a nelineárních koeficientů. Často se na model vztahují ještě další dva požadavky – funkce musí být hladká, tedy musí být derivovatelná v kterémkoli bodě a nechá se zderivovat nespočetněkrát, a metoda nejmenších čtverců musí mít unikátní řešení. Po splnění těchto dvou kritérií se pak práce s modelem ulehčí.

Protože nelineární modely je mnohem těžší fitovat než lineární, odhadnout parametry modelu není tak jednoduché jako v případě lineárního modelu. Je potřeba využít iterativního přístupu (resp. je třeba využít iterativního algoritmu), který postupuje podle těchto kroků:

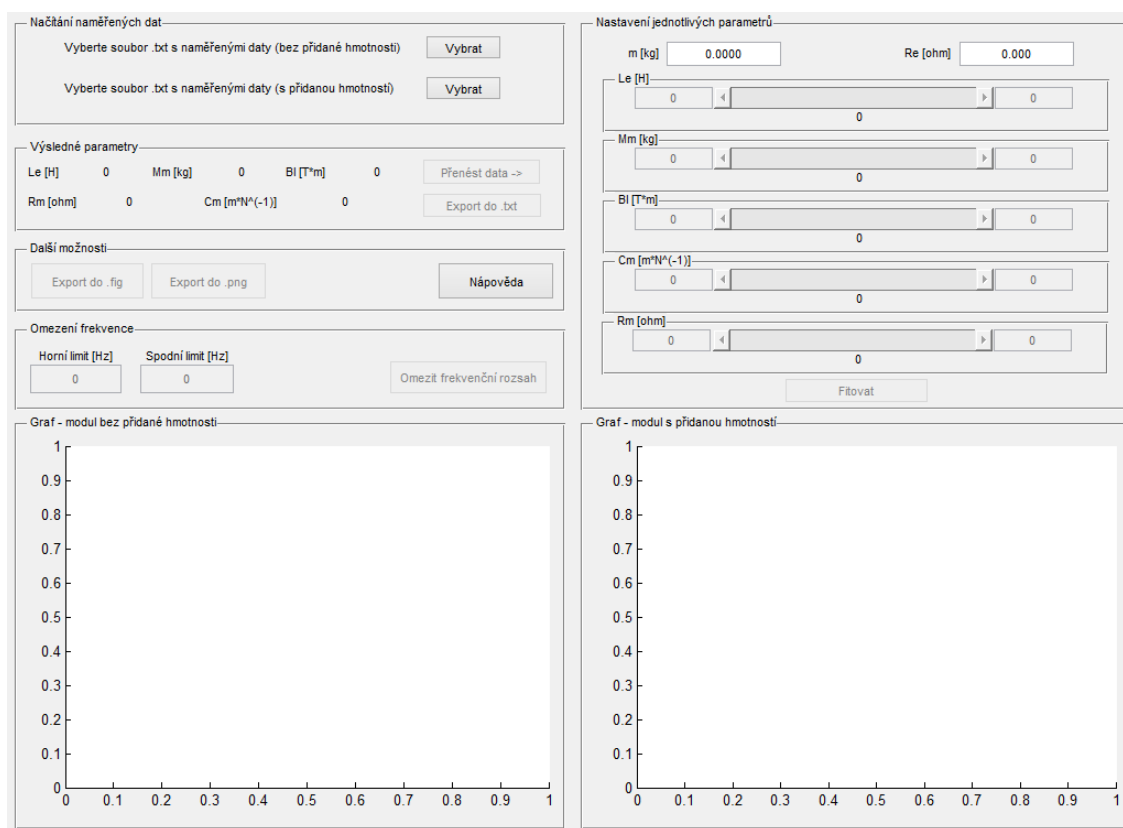
1. Udělejte hrubý odhad počátečních hodnot koeficientů. Pro některé nelineární modely je možný heuristický přístup při tomto odhadu.
2. Pro hrubý odhad počátečních hodnot koeficientů vytvořte fit. Výsledky jsou uloženy ve vektoru \mathbf{y} .
3. Upravte koeficienty a zjistěte, jak můžete výsledky fitu zlepšit. Jak snížit nebo zvýšit koeficienty záleží na využitém algoritmu.
4. Vraťte se k bodu 2, dokud fit nebude mít vámi požadované výsledky.

Tímto přístupem se, oproti lineární regresi pomocí metody nejmenších čtverců, prodlouží doba provádění algoritmu.

Výhodou použití metody nejmenších čtverců je efektivní využití dat, nelineární regrese dokáže vytvořit poměrně dobrý odhad dat i pro modely, pro které není k dispozici velké množství dat. Nevýhodou je zejména velká citlivost k odlehlým hodnotám v rámci dat, dále také potřeba velmi dobré počátečního odhadu koeficientů (viz. např. [20], [21]).

5.2 Program pro výpočet obvodových parametrů

Program pro výpočet elektromechanických obvodových parametrů byl navržen pro jednodušší hledání hrubých počátečních parametrů, které jsou nutné k výpočtu obvodových parametrů. Je napsaný v MATLABu, stejně jako samotný algoritmus, a využívá grafické prostředí GUIDE, které je v MATLABu implementováno.



Obrázek 5.2: Program pro výpočet obvodových parametrů

Program je rozdělen na několik panelů (viz. obrázek 5.2). V panelu **Načítání naměřených dat** jsou tlačítka pro nahrání naměřených dat, jak pro data bez přidané hmotnosti, tak pro data s přidanou hmotností. Data se následně zobrazí na grafy v panelech **Graf - modul bez přidané hmotnosti** a **Graf - modul s přidanou hmotností**. V panelu **Nastavení jednotlivých parametrů** jsou zpřístupněna políčka pro zadání hodnot přidané hmotnosti m , resp. elektrického odporu elektrodynamického měniče R_e . Po vyplnění těchto hodnot a za podmínky, že byly nahrány oba soubory s naměřenými daty ve správném formátu, začne program s výpočtem hrubého odhadu hodnot pro daný průběh. M_m se vypočte dle rovnice

(5.2), kdy f_s je rezonanční frekvence naměřených dat bez přidané hmotnosti, f'_s je rezonanční frekvence naměřených dat s přidanou hmotností.

$$M_m = \frac{m}{(f_s/f'_s)^2 - 1} \quad (5.2)$$

Parametr C_m pak vypočteme, pokud upravíme vztah (5.3) pro výpočet rezonanční frekvence dat bez přidané hmotnosti na rovnici (5.4).

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_m C_m}} \quad (5.3)$$

$$C_m = \frac{1}{M_m f_s^2 4\pi^2} \quad (5.4)$$

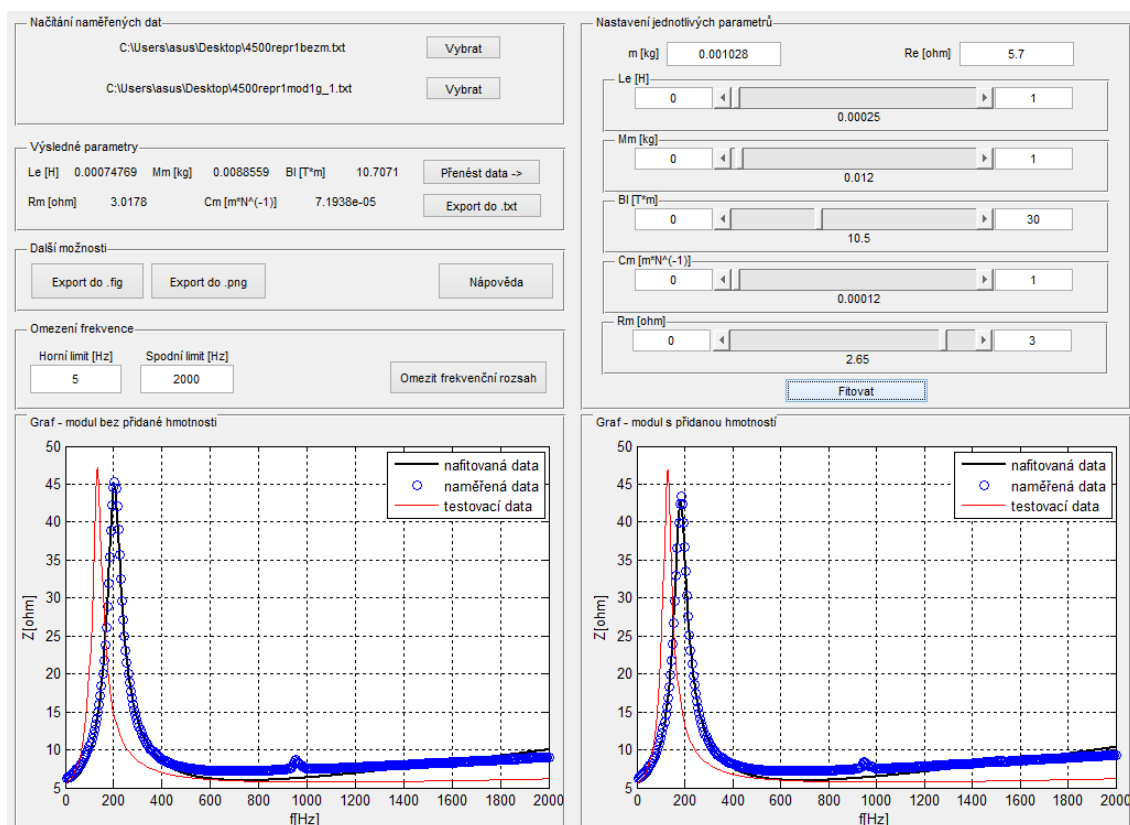
Parametr Bl vypočteme pomocí vzorce (5.5)

$$Bl = \sqrt{\frac{R_e}{2\pi f_s Q_{es} C_m}}, \quad (5.5)$$

kdy Q_{es} je elektrický činitel jakosti. Hodnota pro tento hrubý odhad je určena jako aritmetický průměr parametru Q_{es} 127 nízkofrekvenčních elektrodynamických měničů. Parametr R_m je určen pomocí vzorce (5.6). Q_{ms} je zde mechanický činitel jakosti, kdy jde opět o aritmetický průměr hodnot tohoto parametru 127 nízkofrekvenčních elektrodynamických měničů. Hodnoty Q_{es} a Q_{ms} byly získány z datasheetů nízkofrekvenčních elektrodynamických měničů různých značek a následně zprůměrovány.

$$R_m = \frac{1}{Q_{ms}} \sqrt{\frac{M_m}{C_m}} \quad (5.6)$$

Hodnota posledního parametru L_e je opět hodnota daná aritmetickým průměrem 127 hodnot indukčnosti získané z datasheetů elektrodynamických měničů. Tyto aritmetické průměry byly použity, aby nebylo nutné v programu zjišťovat některé parametry pomocí smyček a jiných složitějších procedur, které by prodlužovaly běh programu. Na panelech grafů se pak zobrazí další průběh funkce (2.42), resp. (2.46), kde jsou za parametry dosazené právě předchozí procedurou odhadnuté hodnoty. Uživatel může nyní v panelech pro parametry Bl , M_m , C_m , R_m , a L_e měnit jejich hodnotu pomocí posuvníků, případně má možnost pomocí políček vedle posuvníků měnit minimální a maximální hodnotu rozsahu, ve které se chce pro daný parametr pohybovat. Uživatel má nyní možnost využít algoritmu a k tomu využít parametry, které pomocí posuvníků nastavil. Kliknutím na tlačítko **Fitovat** spustíme algoritmus (viz. kapitola 5) a na panelech grafů se nám zobrazí nově zjištěný průběh. V panelu **Výsledné parametry** se zobrazí vypočtené parametry. Tyto parametry lze přenést na posuvníky a znovu upravit jednotlivé parametry pro nový fit pomocí tlačítka **Přenést data**, případně, pokud je uživatel s prací hotov, může parametry uložit do textového souboru. V panelu



Obrázek 5.3: Program pro výpočet obvodových parametrů po využití fitovacího algoritmu

Další možnosti je možné výsledné grafy exportovat do formátu .fig nebo do formátu .png. Pro ukládání png byl použit nástroj export_fig (viz. [18]). Dále je v tomto panelu možno vyvolat nápovědu.

Posledním částí programu je panel **Omezení frekvence**. Ten uživateli slouží, pokud nechce fitovat funkci na celá naměřená data, ale chce využít pouze jejich část. Nejprve je třeba stanovit horní a dolní mezní hodnotu, k tomu v programu slouží dvě políčka. Pokud jsou tyto dvě hodnoty frekvence součástí naměřených dat, uživateli se zobrazí tlačítko **Omezit frekvenční rozsah**. Po použití tlačítka může s programem pracovat stejně jako v případě, že průběhy neomezoval.

Program pro výpočet elektromechanických obvodových parametrů využívá pro získávání a změnu jednotlivých součástí programu časovač, protože pokud uživatel využíval posuvník, program nebyl schopen s takovou rychlostí získávat data a měnit je v grafickém uživatelském rozhraní a po určité době přestal fungovat. Časovač tak každou sekundu snímá, co uživatel změnil, podle toho mění data na uživatelském rozhraní. Sekunda byla zvolena jako kompromis, aby bylo možné s programem pracovat i na výkonově slabších počítačích.

Kapitola 6

Měření elektromechanických parametrů měničů

Vytvořené programové prostředky byly vyzkoušeny na dvou elektrodynamických měničích. Byly použity nízkofrekvenční elektrodynamické měniče 6MD38 a 5FG44 od firmy B&C Speakers. Abychom eliminovali vliv vyzařovací impedance na reproduktor, bylo potřeba provést měření ve vakuu. Reproduktor byl proto umístěn do exsikátoru, z něho byl vývěvou vysáván vzduch a uvnitř byl udržován tlak 10hPa (tedy přibližně $100\times$ menší tlak než tlak atmosferický).

Nejprve bylo potřeba zjistit, s jakou přidanou hmotností bude nejlepší měřit (viz. kapitola 2.4). V případě přidaných hmotností o velikosti 5 gramů a 12 gramů se na impedanční charakteristice začaly projevovat rezonance membrány reproduktoru už při nízkých kmitočtech. Impedanční charakteristika tak přestala odpovídat modelu elektrodynamického měniče používaného v této práci a nebylo tak možné elektromechanické parametry zjistit. Proto hmotnost využitá pro měření reproduktoru odpovídá jedné desetíně hmotnosti membrány. Přidaná hmotnost byla realizována jako modelína navážená na analytických vahách. Měření probíhalo na obvodu z kapitoly 3, proto bylo nutné zjistit přesnou hodnotu referenčního rezistoru, který je zapojen sériově s reproduktorem a díky kterému lze zjistit elektrický proud protékající obvodem. Hodnota rezistoru o udávané hodnotě 1Ω byla změřena čtyřsvorkovou metodou, která vyloučí vliv odporu přívodů a přechodových odporů svorek, na multimetru Agilent 34001A. Naměřená hodnota rezistoru je $0,991\Omega$ s uváděnou přesností $\pm 0,0015\Omega$. Naměřená data jsou pak přiložena na CD.

Pro zjišťování elektromechanických parametrů je nejprve využit hrubý odhad parametrů, který poskytuje uživatelské prostředí v MATLABu (viz. kapitola 5.2), následně je tento odhad zpřesňován pomocí dat zjištěných (případně spočítaných) z datasheetu (viz. [22], resp. [23]). Tyto parametry jsou pak využity jako hrubé hodnoty parametrů algoritmu (viz. kapitola 5), který výsledné elektromechanické parametry vypočte.

6.1 Měření elektromechanických parametrů měniče 6MD38

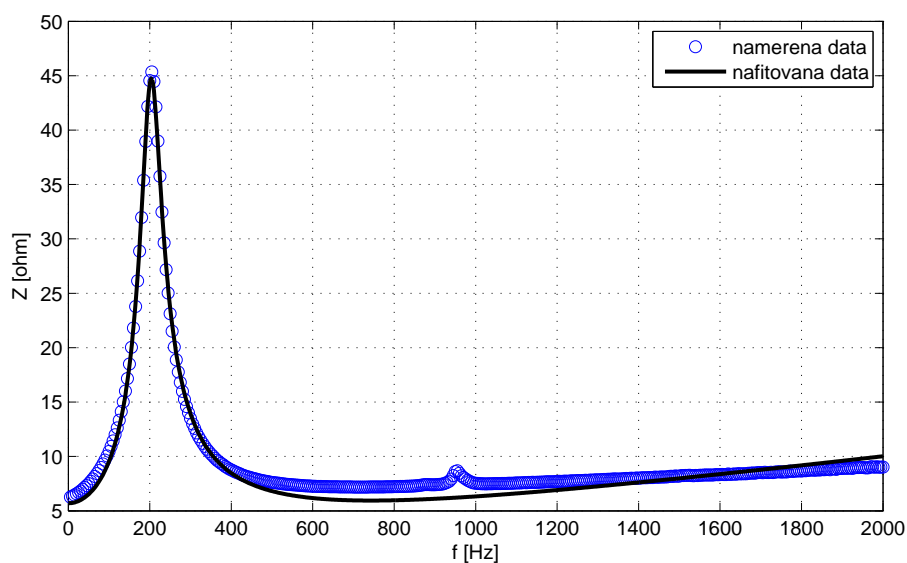
Elektromechanické parametry zjištěné algoritmem a programem využívajícím programové prostředky MATLABu jsou zobrazeny v tabulce 6.1, kde jsou zároveň porovnány s para-

metry uvedenými v datasheetu elektrodynamického měniče 6MD38. Pro všechny parametry jsou uvedeny odchylky měření od dat uvedených v datasheetu reproduktoru. Tyto odchylky měření jsou způsobeny přesností fitu uživatele a také přesností naměřených dat. Parametry uvedené v datasheetu je nutno brát také s určitou rezervou, i ty jsou zatíženy chybou, tu bohužel výrobce neuvádí. Parametr M_m je v datasheetech udáván jako celková mechanická hmotnost, která vyjadřuje celkovou hmotnost membrány a hmotnost vzduchu, který působí na efektivní plochu membrány (viz. např. [24]). Hmotnost působícího vzduchu se díky našemu měření ve vakuu neprojeví, proto bude naměřený parametr M_m vždy menší než ten udávaný.

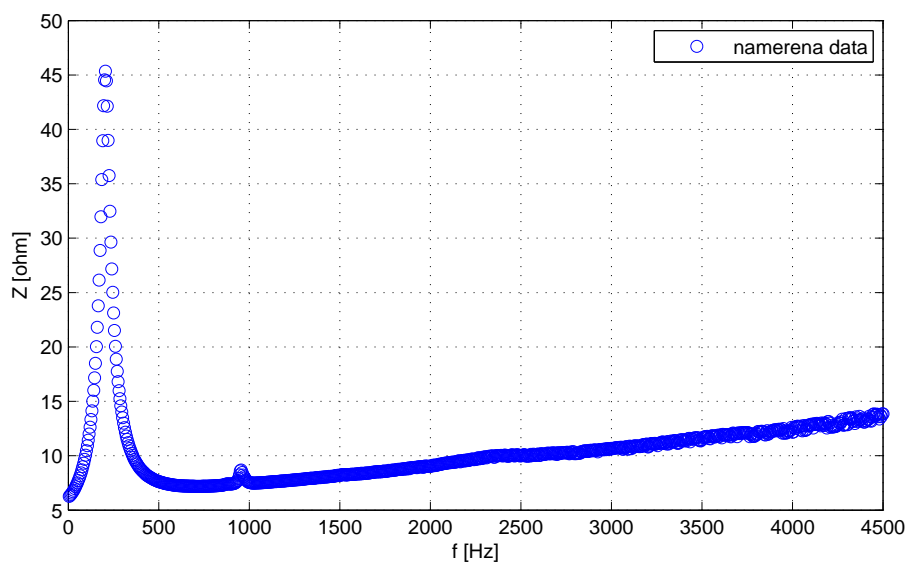
	Uvedená hodnota	Naměřená hodnota	Odchylka měření
L_e [H]	0,00025	0,00075	0,0005 (200%)
M_m [kg]	0,012	0,009	0,003 (25%)
R_m [Ω]	2,65	3,02	0,37 (13,96%)
C_m [$\frac{m}{N}$]	0,00012	0,00007	0,00005 (41,67%)
Bl [Tm]	10,5	10,71	0,21 (2%)

Tabulka 6.1: Porovnání naměřených hodnot a hodnot uvedených v datasheetu (viz. [22]) pro elektrodynamický měnič 6MD38

Z tabulky je vidět, že nejvíce se liší parametr L_e , to je vidět i z obrázku 6.1. Parametr L_e totiž ovlivňuje impedanční charakteristiku zejména na vyšších kmitočtech. Data pro v této práci využívaný model elektrodynamického měniče byla omezena hodnotou 2000 Hz, proto se působení toho parametru ještě nemohlo zcela projevit. Na obrázku 6.2 je vidět, proč bylo nutné prokládat naměřená data křivkou pouze do hodnoty 2000 Hz, výsledky parametrů se po využití všech naměřených dat (s výjimkou parametru L_e) zhorší. Od této hodnoty se začíná výrazněji projevovat nedokonalost modelu elektrodynamického měniče využívaného v této práci a membrána reproduktoru začíná mírně rezonovat, od frekvence 2400 Hz je pak nedokonalost pro tuto práci využívaného modelu elektrodynamického měniče lépe viditelná. První rezonanci membrány lze však pozorovat už na frekvenci 900 Hz.



Obrázek 6.1: Grafy průběhů impedančních charakteristik pro elektrodynamický měnič 6MD38 bez přidané hmotnosti po zpracování dat programem



Obrázek 6.2: Graf naměřených dat pro elektrodynamický měnič 6MD38

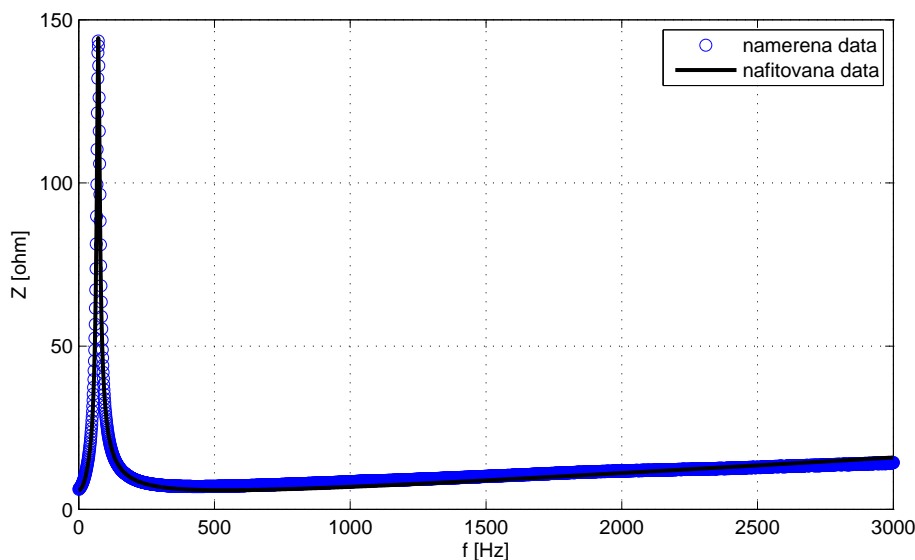
6.2 Měření elektromechanických parametrů měniče 5FG44

Stejně měření elektromechanických parametrů měniče jako u předchozího typu reproduktoru bylo provedeno i u elektrodynamického měniče typu 5FG44. Pro všechny parametry jsou opět v tabulce 6.2 uvedeny odchylky měřených hodnot od hodnot uvedených v datasheetu.

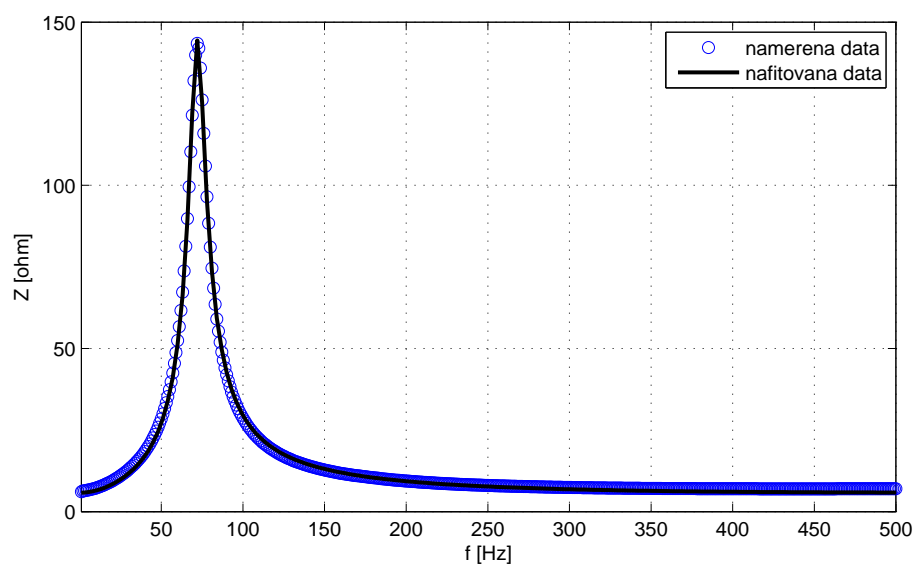
	Uvedená hodnota	Naměřená hodnota	Chyba měření
L_e [H]	0,0008	0,00081	0,00001 (0,13%)
M_m [kg]	0,012	0,009	0,003 (25%)
R_m [Ω]	0,5	0,55	0,05 (10%)
C_m [$\frac{m}{N}$]	0,00049	0,00056	0,00007 (14,29%)
Bl [Tm]	10	8,85	1,15 (11,5%)

Tabulka 6.2: Porovnání naměřených hodnot a hodnot uvedených v datasheetu (viz. [23]) pro elektrodynamický měnič 5FG44

Z tabulky lze vidět zlepšení výsledku parametru L_e . To je způsobeno využitím naměřených data až do hodnoty 3000 Hz, kde se již tento parametr projeví lépe, než v případě reproduktoru 6MD38. Opět lze vidět stejné odchylky parametru M_m . To je způsobeno opět měřením ve vakuu, kdy oproti udávanému parametru zanebáváme hmotnost vzduchu působící na membránu. Graf nafitovaného průběhu je zobrazen na obrázku 6.3. V oblasti rezonance reproduktoru není výsledek příliš patrný, proto je tato část zobrazena na obrázku 6.4.



Obrázek 6.3: Grafy průběhů impedančních charakteristik pro elektrodynamický měnič 5FG44 bez přidané hmotností po zpracování dat programem



Obrázek 6.4: Graf průběhů impedančních charakteristik pro elektrodynamický měnič 5FG44 bez přidané hmotností po zpracování dat programem v oblasti rezonance

Kapitola 7

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit program na měření impedančních charakteristik elektrodynamických měničů. Dále bylo cílem vytvořit algoritmus pro výpočet elektromechanických obvodových parametrů pomocí dat naměřených programem pro měření impedančních charakteristik. U vybraných reproduktorů pak byly určeny elektromechanické obvodové parametry.

V rámci této práce vznikl v LabView vytvořený program pro měření impedančních charakteristik elektrodynamických měničů, který automaticky mění měřicí rozsahy a udržuje na elektrodynamickém měniči konstantní napětí zvolené uživatelem. Pro realizaci byla využita měřicí karta NI-USB 6211. Pro tuto práci byl také navržen obvod pro měření impedanční charakteristiky a zvoleno vhodné zapojení měřicí karty jako zdroje signálu vůči měřicímu obvodu. V MATLABu byl, pomocí Curve Fitting Toolboxu, vytvořen algoritmus pro výpočet elektromechanických obvodových parametrů. Pro snazší použití algoritmu bylo rovněž v MATLABu vytvořeno grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje uživateli jednodušší zjišťování elektromechanických obvodových parametrů elektrodynamického měniče. V závěru práce byly programové prostředky otestovány a byly určeny elektromechanické obvodové parametry pro dva elektrodynamické měniče. Konstatuji, že zadání práce bylo splněno.

Literatura

- [1] National Instruments *NI USB-621x User Manual*
(<http://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf>), 2009
- [2] National Instruments *NI USB-621x Data Sheet*
(<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-9>)
- [3] Akiyama *Akiyama AMD-240 & AMD-400 User Manual*
(http://www.akiyamadj.com/images/downloads/amd_manual.pdf)
- [4] Akiyama *Akiyama Official Web Page*
(<http://www.akiyamadj.com/>)
- [5] Vlach J., Havlíček J., Vlach M. *Začínáme s Lab View*, BEN, 2006
- [6] Škvor Z., *Akustika a elektroakustika*, Academia, 2001
- [7] Beranek L. L., Mellow T. J., *Acoustics: Sound Fields and Transducers*, Elsevier, 2012
- [8] Merhaut J. *Teoretické základy elektroakustiky*, Academia, 1976
- [9] Svoboda L., Štefan M. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*, SNTL, 1983
- [10] Ravaud R., Lemarquand G., Roussel T. *Time-varying non linear modeling of electrodynamic loudspeakers*, Applied Acoustics 70 (450-458), 2009
- [11] Knudsen M. H., Grue Jensen J., Julskjaer V., Rubak P. *Determination of Loudspeaker Driver Parameters Using a System Identification Technique*, Journal of the Audio Engineering Society vol.39, No.9, Zář 1989
- [12] Elliot R. *Measuring Thiele/Small Parameters*
(<http://sound.westhost.com/tsp>)
- [13] Reichl J., Všetická M. *Encyklopedie fyziky*
(<http://fyzika.jreichl.com/>)
- [14] National Instruments *Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals*
(<http://www.ni.com/white-paper/3344/en/>), Březen 2014
- [15] Weber H., Mateljan I. *LIMP - Manual, Impedance Measurement Thiele Small Parameters*, Zář 2014

- [16] Mulcahy J. *REW 5.1 Help*, 2015
- [17] Struck Ch. J. *Determination of the Thiele - Small Parameters Using Two-Channel FFT Analysis*, 82nd AES Convention London, England, Březen 1987
- [18] Altman Y. *Export_fig Utility*
(<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/23629-export-fig>), Duben 2009
- [19] Mařík R. *Metoda nejmenších čtverců*, Leden 2006
- [20] MathWorks *Curve Fitting Toolbox User Guide* 2001
- [21] NIST/SEMATECH *e-Handbook of Statistical Methods* Duben 2012
- [22] B&C Speakers *6MD38 Datasheet*
(<http://www.bcspeakers.com/products/lf-driver/6-5/8/6md38.pdf>)
- [23] B&C Speakers *5FG44 Datasheet*
(<http://www.bcspeakers.com/products/lf-driver/5-0/8/5fg44-8.pdf>)
- [24] Eminence Speaker LLC. *Understanding Loudspeaker Data*
(<http://www.eminence.com/support/understanding-loudspeaker-data/>)
- [25] National Instruments *Data Acquisition Sampling Terminology*
(<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/DBE7AC32661BCF9B86256AC000682154>), August 2007

Příloha A

Zapojení vstupních svorek

Input Configuration	Signal Source Type	
	Floating Signal Source (Not Connected to Building Ground)	Grounded Signal Source
	Examples <ul style="list-style-type: none"> • Thermocouples • Signal Conditioning with Isolated Outputs • Battery Devices 	Examples <ul style="list-style-type: none"> • Plug-in Instruments with Nonisolated Inputs
Differential (DIFF)	<p>Two resistors ($10\text{ k}\Omega < R < 100\text{ k}\Omega$) provide return paths to ground for bias currents</p>	
Single-Ended - Ground Referenced (RSE)		<p>NOT RECOMMENDED</p> <p>Ground-loop losses, V_{g_l}, are added to measured signal.</p>
Single-Ended - Nonreferenced (NRSE)		

Obrázek A.1: Zapojení vstupních svorek měřící karty v závislosti na zvoleném zdroji napětí – převzato z [14]