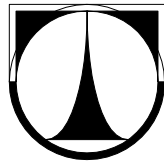


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2006

Jiří Kopal

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Piezelektrické transformátory ve tvaru disku s klínovitě dělenou elektrodou

Piezoelectric Transformers In The Form Of Disc With Wedge-shaped Electrode

Bakalářská práce

Autor:	Jiří Kopal
Vedoucí práce:	Doc. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Petr Půlpán

V Liberci 19. 5. 2006

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra: fyziky

Akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Jiří Kopal

studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto bakalářskou práci:

Název tématu: **Piezoelektrické transformátory ve tvaru disku s klínovitě dělenou elektrodou**

Zásady pro vypracování:

1. Vlastnosti feroelektrických (piezoelektrických) keramik a jejich polarizace
2. Piezoelektrický transformátor – módy kmitů, transformace napětí a výkonu
3. Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru se zátěží
4. Měření transformačního poměru keramických kruhových transformátorů s elektrodou dělenou na klínovité segmenty

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

[1] J.Erhart: Piezoelektrické “chytré” materiály pro elektrotechniku, PZT keramika
Elektro 11 (2002) 4-7

[2] P.Půlpán, J.Erhart: Piezoelektrické transformátory, vyjde v Elektro 01 (2006)

[3] O.Stefan: Obrysové kmity kruhových keramických resonátorů, Čs.čas.fyz. 20 (1970) 113-
122

[4] J.S. Yang, X. Zhang: Extensional vibration of a nonuniform piezoceramic rod and high
voltage generation, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 16
(2002) 29–42

Vedoucí bakalářské práce: Doc.Mgr.Jiří Erhart, Ph.D.

Konzultant: Ing.Petr Půlpán

Zadání bakalářské práce: 27.10.2005

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. 5. 2006**

L.S.

.....
Vedoucí katedry

.....
Děkan

V Liberci dne 27.10.2006

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 19.5.2006

Podpis:

Děkuji všem, kteří mi s mojí prací pomáhali a bez kterých by nevznikla. Zejména svému vedoucímu práce Doc. Mgr. Jiřímu Erhartovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Petru Půlpánovi za podnětné připomínky, trpělivost a čas strávený mým zasvěcováním do problematiky.

Jiří Kopal

Abstrakt

Piezelektrické transformátory ve tvaru disku s klínovitě dělenou elektrodou

Cílem bakalářské práce je měření frekvenčních charakteristik transformačního poměru (napět'ového zesílení) piezelektrických transformátorů ve tvaru disku s klínovitě dělenou elektrodou, navržených pro činnost v módu plošně střížných kmitů. Úvod je věnován piezelektrickému jevu, poznatkům o piezelektrických materiálech, jejich mikrostruktuře a zejména feroelektrických (piezelektrických) keramikách. Práce se dále zaměřuje na piezelektrické transformátory, jejich přednosti, typy a módy kmitů. Praktická část práce začíná přípravou vzorků, následuje měření jejich frekvenčních charakteristik napět'ového zesílení při různém zatížení výstupu (reálnou impedancí). Při hodnocení výsledků se klade důraz zejména na charakteristiky zesílení a posunu rezonanční frekvence v závislosti na zatížení výstupního obvodu. Porovnávají se transformátory mezi sebou (klíčovým parametrem je poměr ploch elektrod), ale i rezonance ve spektru jednotlivých transformátorů. Lze určit pro jaký poměr elektrod je dosahováno maxima napět'ového zesílení. Výsledky práce mohou sloužit k optimalizaci návrhu piezelektrických transformátorů případně k dalšímu výzkumu.

Klíčová slova: piezelektrické transformátory, frekvenční charakteristiky, feroelektrická keramika, polarizace keramiky, napět'ové zesílení

The Abstract

Piezoelectric Transformers In The Form Of Disc With The Wedge-shaped Electrode

The aim of the bachelor thesis is measuring the frequency characteristics of the transformation ratio (of the voltage gain) of the piezoelectric transformers in the form of disc with the wedge-shaped electrode, which were designed for the function in the mode of the plane shear oscillations. The introduction presents the piezoelectric effect, findings about the piezoelectric materials, their microstructure and mainly the ferroelectric (piezoelectric) ceramics. The thesis afterwards aims at the piezoelectric transformers, their qualities, types and modes of the oscillations. The practical part of the thesis begins with the preparation of the specimens then follows the measuring of their frequency characteristics of the voltage gain during different loading of the output (real impedance). The characteristics of the gain coefficient and the shifting of the resonant frequency with the loading of the output circuit are mainly stressed during the appraising of the results. The transformers are being compared with each other (the key parameter is the proportion of the surfaces of the electrodes), but also the overtones in the spectrum of each single transformer. It could be specified, what ratio of the electrodes is being reached the maximum of the voltage gain at. The results of the effort could serve to the optimalization of the design of the piezoelectric transformers, in some cases for further research.

Keywords: piezoelectric transformers, frequency characteristics, ferroelectric ceramics, poling ceramics, voltage gain

Obsah:

1. Úvod.....	9
1.1 Piezoelektrický jev.....	9
1.2 Piezoelektrická keramika z hlediska mikroskopického.....	12
1.3 Polarizace piezoelektrické keramiky.....	15
1.4 Materiálové koeficienty elektromechanických vlastností.....	18
2. Piezoelektrický transformátor.....	20
2.1 Transformátory obecně.....	20
2.2 Princip piezoelektrického transformátoru.....	23
2.3 Typy transformátorů a módy kmitů.....	26
2.4 Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru.....	28
3. Výběr a příprava vzorků piezoelektrických transformátorů.....	30
3.1 Zvolený design piezoelektrických transformátorů.....	30
3.2 Postup přípravy vzorků.....	31
4. Vlastní měření.....	34
4.1 Měření frekvenčních charakteristik piezoelektrických transformátorů.....	34
4.2 Frekvenční charakteristiky T50.....	36
5. Hodnocení výsledků.....	39
6. Závěr.....	45
Použitá literatura.....	46
Příloha A - Frekvenční charakteristiky T100.....	47
Příloha B - Frekvenční charakteristiky T150.....	49
Příloha C - Frekvenční charakteristiky T180.....	51

Seznam použitých zkratk, pojmů a veličin:

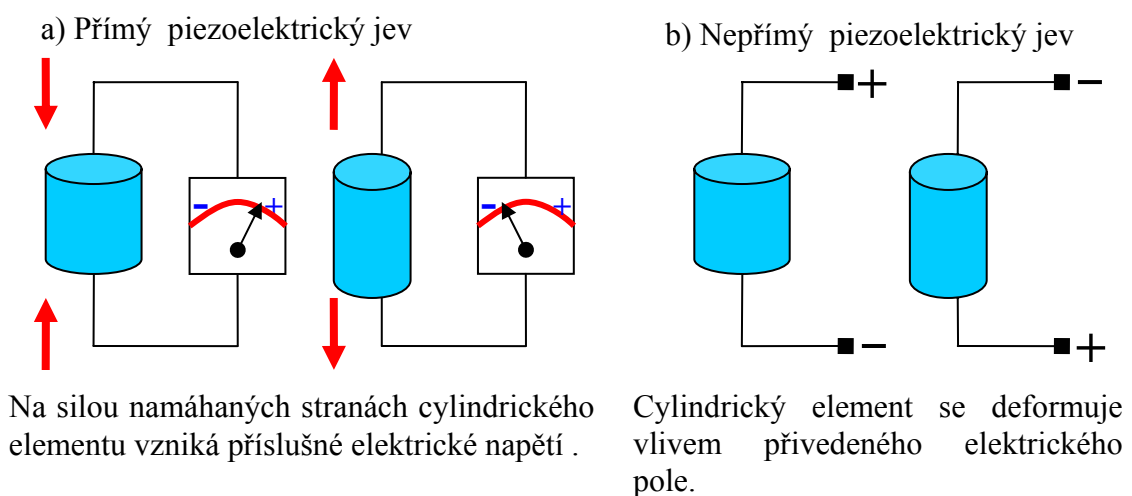
PT	Piezoelektrický transformátor
ET	Elektromagnetický transformátor
APC	American Piezo Ceramics Inc.
MPB	Morphotropic Phase Boundary - morfotropní fázová hranice
PT	Titaničitan olova - PbTiO_3
PZ	Zirkoničitan olova - PbZrO_3
PZT	Piezoelektrická keramika ve složení $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$
T_c	Curieova teplota
E_c	Koercitivní elektrické pole
P_r	Remanentní polarizace
P_{sat}	Nasyčená polarizace
T_μ	Tenzor mechanického napětí
E_i	Vektor elektrického pole
S_λ	Tenzor mechanické deformace
D_i	Vektor elektrického posunutí
$s_{\lambda\mu}^E$	Tenzor elastických konstant
$d_{i\lambda}$	Tenzor piezoelektrických konstant
ε_{ij}^T	Tenzor dielektrických konstant
A_u	Napěťové zesílení
η	Účinnost
Z	Zatěžovací impedance
Δf_r	Relativní posuv frekvence

1. Úvod

1.1 Piezoelektrický jev

Historie piezoelektrického jevu sahá až do roku 1880, kdy bratři Jacques a Pierre Curieové objevili při svých soustavně vedených pokusech neobvyklou vlastnost u krystalů turmalínu [5]. Po podrobení krystalů mechanickému tlaku v určitých směrech se na jeho povrchu začaly vytvářet povrchové náboje. Mechanický tlak a tah vytváří elektrické napětí opačné polaroty úměrné působící síle. Piezoelektrina je lineární elektromechanický jev. Elektřina vznikající tímto způsobem byla Hankelem nazvána piezoelektrinou a daný úkaz nazvali bratři Curieové přímým piezoelektrickým jevem. Zanedlouho po objevu přímého piezoelektrického jevu byl potvrzen i jev opačný - po přivedení elektrického pole na výše zmíněné krystaly začalo docházet k jejich prodlužování nebo zkracování v závislosti na polaritě přivedeného elektrického pole. Přičemž relativní velikost prodloužení byla opět úměrná velikosti elektrického pole. Tento jev byl nazván nepřímým piezoelektrickým jevem. Původ označení obou jevů musíme hledat v řečtině, základem bylo slovo piezein mající význam jako tlak nebo stlačení. Přímý i nepřímý piezoelektrický jev popisuje Obr. 1.1.

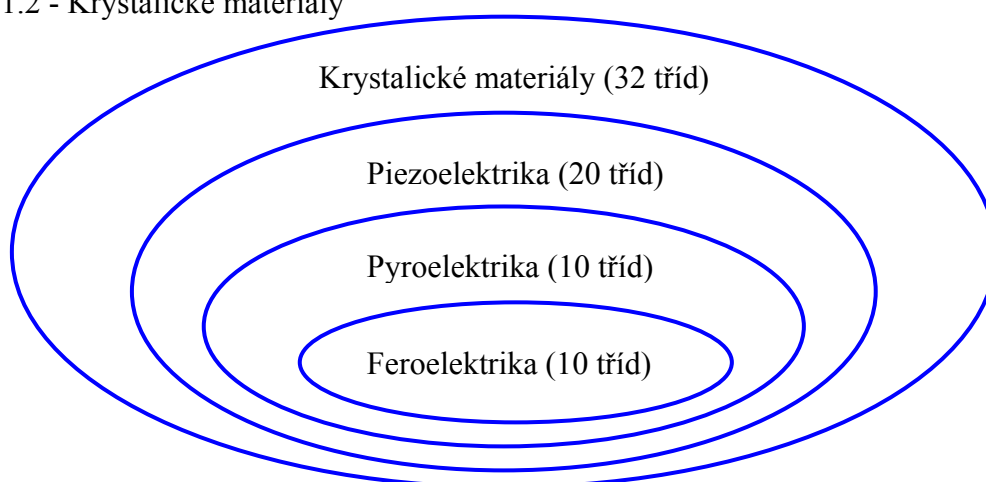
Obr 1.1 - Piezoelektrický jev [6]



Později bratři Curieové zjistili, že se tento jev nevyskytuje jen u turmalínu, ale i u křemene, sirníku zinkového a dalších materiálů. Mnoho fyziků se snažilo piezoelektrinu na základě termodynamických principů objasnit, v plné míře se to však podařilo až W.Voightovi.

S piezoelektrickými materiály jsou úzce spjaty dvě další vlastnosti krystalických materiálů a to vlastnosti pyroelektrické a feroelektrické, vyskytne-li se jedna z těchto uvedených vlastností u některého z materiálů, jsou u něj zaručeny i piezoelektrické vlastnosti. Tuto skutečnost popisuje schématicky pomocí množin Obr. 1.2.

Obr. 1.2 - Krystalické materiály



Piezoelektrické látky mohou mít několik polárních os (např. křemen má 3 polární osy, tzv. elektrické), podél nichž může vznikat polarizace. U pyroelektrických látek existuje pouze jedna polární osa (např. turmalín), kde polarizace vzniká změnou teploty. Feroelektrický materiál je takový materiál, který je spontánně polarizován bez vnějšího elektrického pole, přičemž polarizace musí být vnějším polem otočitelná.

Každý krystalický materiál můžeme zařadit do jedné z třiceti dvou krystalografických tříd symetrie, jež mají bezprostřední vazbu na fyzikální vlastnosti materiálu. Dvacet tříd symetrie dovoluje jev piezoelektrický, deset jev pyroelektrický a feroelektrický.

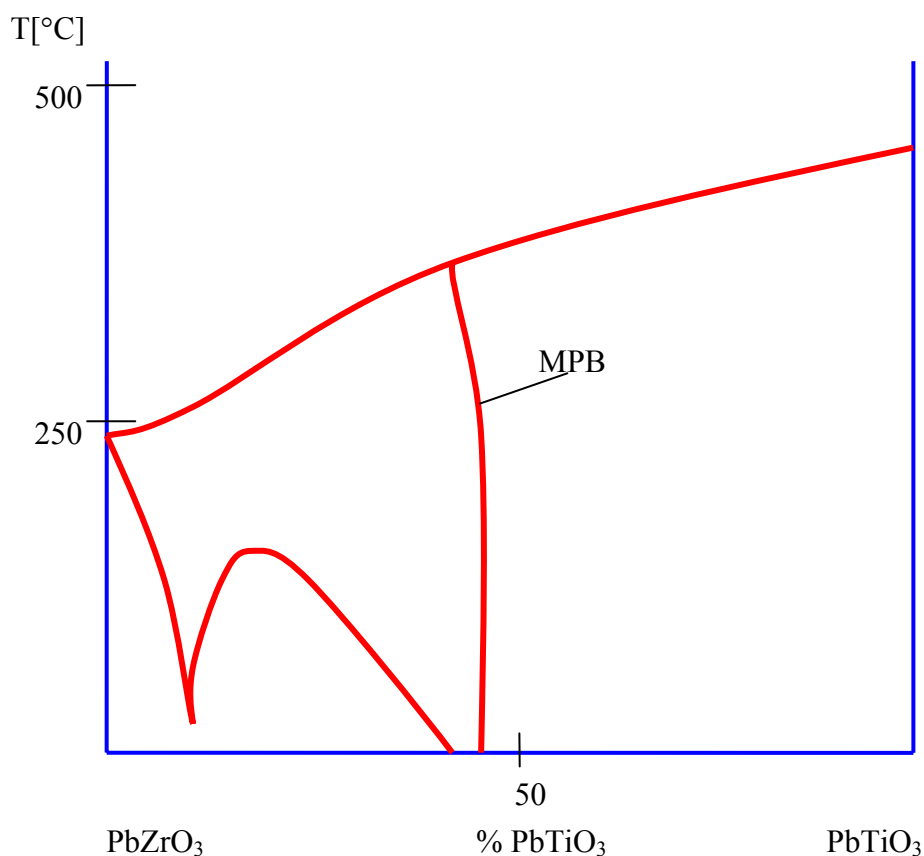
Od doby objevení piezoelektrického jevu do dnešní doby uplynulo již více než sto let, piezoelektrický jev byl podroben soustavnému bádání, největší rozmach však zaznamenal v několika posledních desetiletích. Pokrok má souvislosti s materiálovým inženýrstvím a zejména práškovou metalurgií, která nám umožňuje vytvořit materiály s vlastnostmi „na míru“ pro danou aplikaci. Dnešní piezoelektrické keramiky jsou zejména materiály na bázi tuhých roztoků oxidů kovů , zejména olova, titanu a zirkonu.

V dnešní době si piezoelektrika našla cestu do řady aplikací a stala se nedílnou součástí mnoha elektrických i neelektrických zařízení a jejich přítomnost si někdy ani neuvědomujeme. Jsou součástí zapalovačů, filtrů – SAW (s povrchovou akustickou vlnou), piezoakustických měničů, zpožďovacích linek v televizorech, stabilizátorů frekvence a času v hodinkách a také pro tuto práci klíčové aplikaci - piezoelektrických transformátorů, používaných například v LCD obrazovkách notebooků.

1.2 Piezoelektrická keramika z hlediska mikroskopického

Jak již bylo poznamenáno v předchozí kapitole, nejpoužívanější piezoelektrické keramiky jsou materiály na bázi tuhých roztoků oxidů zirkonu ($PbZrO_3$ - zirkoničitan olova - PZ) a titanu ($PbTiO_3$ - titaničitan olova - PT). V PZT ($PZ_x - PT_{1-x}$) keramice je nejčastěji PZ zastoupena 48 – 52 %, stavový diagram systému PZT je znázorněn na Obr. 1.3.

Obr. 1.3 - Stavový diagram systému PZT [1]



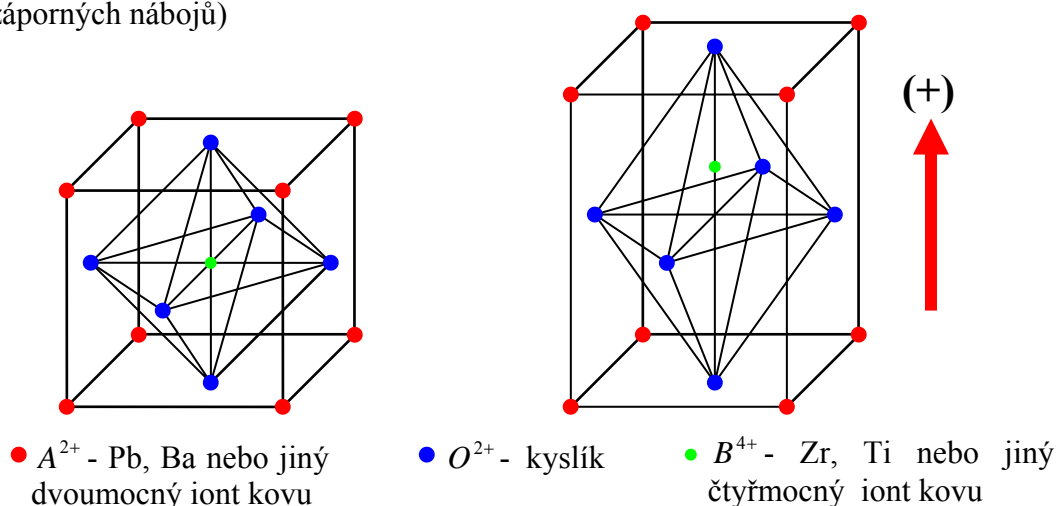
Již na první pohled je zřejmé, že kolem 48 % koncentrace PZ se ve stavovém diagramu nachází rozhraní mezi dvěma feroelektrickými fázemi, zvané morfotropní fázová hranice (MPB). V okolí MPB koexistují v širokém rozsahu teplot dvě fáze materiálu, což má i velice příznivý vliv na materiálové koeficienty. Při tomto zastoupení

PZ a PT dosahují materiálové koeficienty svých maxim až do tzv. Curieovy teploty (T_c), při které přejde materiál z feroelektrické do paraelektrické fáze. Curieova teplota by se též dala nazvat teplotou zániku feroelektrických vlastností PZT, znamená však i zánik piezoelektrických vlastností. Je proto velice důležitým faktorem, který je nutno v každé aplikaci uvažovat.

PZT je tvořena elementárními buňkami perovskitové struktury – ABO_3 (pochází od přírodního materiálu perovskitu $CaTiO_3$), buňky mají nad T_c kubickou strukturu perovskitu - Obr. 1.4a.

Obr 1.4 - Krystalová struktura piezoelektrické keramiky PZT [6]

- a) Teplota nad Curieho bodem (kubická mřížka, symetrické uspořádání kladných a záporných nábojů) b) Teplota pod Curieho bodem (tetragonální mřížka - dipólový moment)



Tepelná energie je nad Curiovou teplotou postačující k udržení dokonalé symetrie celé buňky, včetně jejího středu tvořeného centrálním iontem. Postupným snižováním teploty klesá i tepelná energie celé buňky a při průchodu Curieho bodem, již není schopna udržet centrální iont ve své poloze. Dojde k jeho vychýlení - Obr 1.4b a tedy i k narušení prostorové rovnováhy nábojů. Buňka již navenek vykazuje dipólový moment (vznikl elementární dipól). Shluk elementárních dipólů, jejichž centrální iont se vychýlil přibližně shodným směrem tvoří doménu (domény jsou útvary uvnitř zrn). PZT

je polykrystalický materiál se zrny velikosti řádu jednotek mikrometrů. Jednotlivá zrna mají náhodně uspořádané dipólové momenty, makroskopicky pak keramika nevykazuje dipólový moment (polarizaci). Pro získání piezoelektrických vlastností ji je tedy třeba polarizovat.

1.3 Polarizace piezoelektrické keramiky

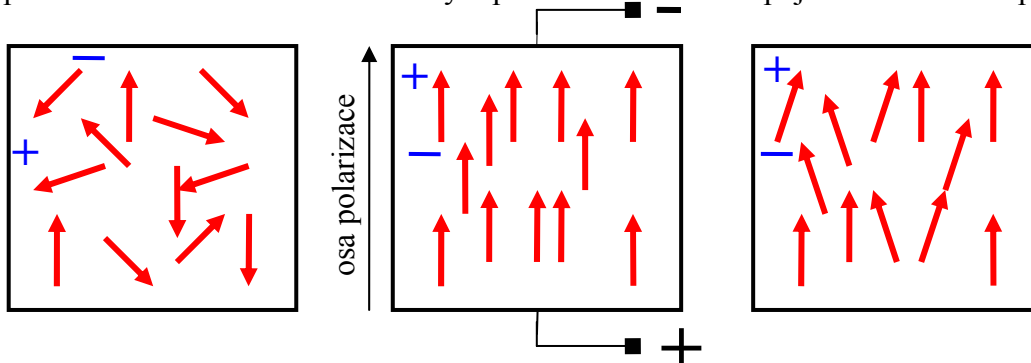
Kvůli náhodnému uspořádání spontánních polarizací v zrnech není PZT keramika makroskopicky piezoelektrická. Jelikož se jedná o polykrystalický materiál je pro dosažení makroskopické piezoelectricity nutné sjednotit směry spontánních polarizací. Polarizace se v technické praxi provádí dvěma způsoby:

- 1) Přiložením elektrického pole (typické hodnoty pro PZT 2-4 kV/mm), někdy též probíhá polarizace za zvýšené teploty (není však myšleno překročení Curieovy teploty), jež dopomáhá pohybu doménových stěn.
- 2) Zahřátím nad Curieovu teplotu, následným přiložením elektrického pole (není již třeba elektrického pole takové intenzity jako v předchozím bodě) a postupným ochlazováním.

Z principiálního hlediska se výše zmíněné způsoby příliš neliší. Po přiložení elektrického pole se každý dipól srovná podle směru vnějšího elektrického pole (Obr. 1.5). Elektrické polarizační pole musí být vždy větší než koercitivní elektrické pole (E_c) pro daný materiál (typická hodnota E_c pro PZT je 0,5 kV/mm). Na tomto místě by bylo též příhodné zmínit hodnotu elektrické pevnosti PZT keramiky, jejíž typická hodnota je 5 kV/mm. Po překročení elektrické pevnosti by mohlo dojít k nenávratnému poškození materiálu.

Obr. 1.5 - Polarizace piezoelektrické keramiky [6]

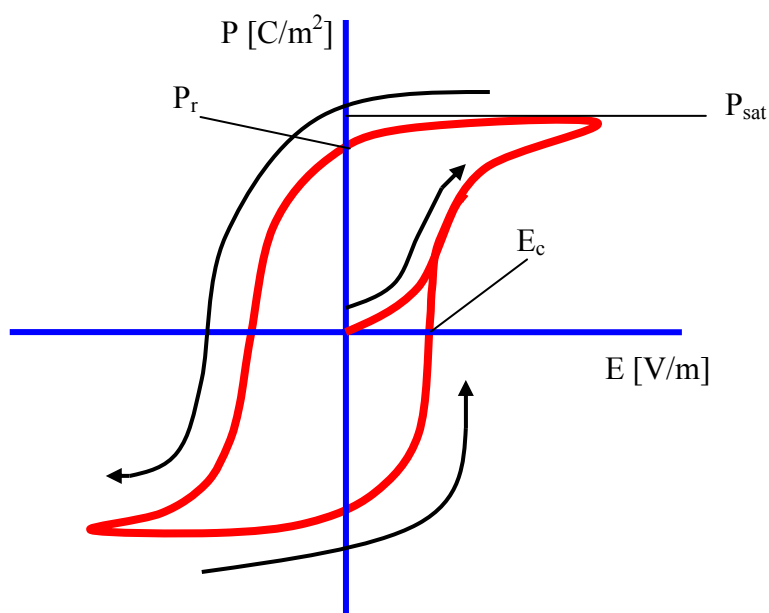
- a) náhodná orientace polarizačních domén b) polarizace stejnosměrným elektrickým polem c) remanentní polarizace po odpojení elektrického pole



Polarizace PZT by se též dala provádět mechanickým tlakem, v praxi se však tento způsob nepoužívá.

Velikost remanentní polarizace (P_r) závisí zejména na velikosti přiloženého pole, ale také na keramice. Keramiky dělíme na "měkké" (soft) a "tvrdé" (hard). Vložení PZT keramiky do střídavého elektrického pole získáme charakteristiku na Obr. 1.6.

Obr. 1.6 - Polarizace střídavým elektrickým polem – hysterézní smyčka [6]



Jedná se o hysterézní smyčku, analogickou ke smyčce feromagnetických materiálů. Průsečík charakteristiky s osou E [V/m] nám udává hodnotu koercitivního pole - E_c , které je potřeba na polarizaci PZT keramiky. Naopak průsečík s osou P [C/m²] udává hodnotu remanentní polarizace - P_r , to je hodnota polarizace po odpojení elektrického pole. Na charakteristice je též viditelná hodnota nasycené polarizace - P_{sat} . Od jisté velikosti intenzity elektrického pole již nedochází k nárůstu polarizace a při dalším zvyšování intenzity by mohlo dojít k průrazu materiálu. Plocha hysterézní smyčky je též velice důležitým parametrem, neboť ztráty v materiálu za jednu periodu jsou jí přímo úměrné. Pro měkké keramiky je typická široká smyčka a pro tvrdé úzká smyčka. Fyzikální vysvětlení spočívá ve skutečnosti, že doménové stěny u měkké

keramiky nejsou tak pevně vázány jako u tvrdých keramik. Snadněji se tedy i pohybují a elektrické pole je tudíž může přemístit na větší vzdálenost. Dobrá pohyblivost doménových stěn u měkkých keramik má za následek i nižší koerzivní elektrické pole a tedy i nižší elektrické polarizační pole než u tvrdých keramik.

Před polarizací jsme PZT keramiku mohli považovat za izotropní materiál. Polarizovaná PZT keramika je však materiál anizotropní, a tedy i její vlastnosti se již nedají jednoduše popsat, neboť jsou v každém směru jiné. Její popis se pak provádí pomocí tenzorů. Jednotlivé materiálové parametry však prochází časovým vývojem – „aging“ (logaritmicky mění své hodnoty, tedy za dekádu se změní daný materiálový koeficient o udávanou procentuální hodnotu). Na stárnutí, ale i změny parametrů má velice významný vliv teplota. Výrobci piezoelektrických keramik je doporučováno nepřekračovat $T_c/2$ z důvodu stárnutí, ale i změny materiálových vlastností s teplotou.

1.4 Materiálové koeficienty elektromechanických vlastností

Piezoelektrický jev dávají do souvislosti s mechanickým napětím T_μ , elektrickým polem E_i , mechanickou deformací S_λ a indukcí elektrického pole D_i stavové rovnice (1.4.1 a 1.4.2). Jedná se o soustavu devíti lineárních rovnic psaných nejčastěji v tomto tvaru:

$$S_\lambda = s_{\lambda\mu}^E T_\mu + d_{i\lambda} E_i \quad (1.4.1)$$

$$D_i = d_{i\mu} T_\mu + \varepsilon_{ij}^T E_j \quad (1.4.2)$$

Mechanická deformace S_λ a mechanické napětí T_μ jsou tenzory 2. řádu:

$$S_\lambda = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad T_\mu = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix}$$

Elektrické pole E_i a indukce elektrického pole D_i jsou vektory:

$$E_i = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad D_i = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix}$$

Pro polarizovanou PZT keramiku se symetrií ∞m vypadají materiálové parametry následujícím způsobem:

$s_{\lambda\mu}^E$ je tenzorem elastických konstant a obsahuje pět nezávislých prvků, je definován jako podíl mechanické deformace a mechanického napětí při konstantní intenzitě elektrického pole:

$$s_{\lambda\mu}^E = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{pmatrix} \quad s_{\lambda\mu}^E = \left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial T_{\mu}} \right)_E$$

$d_{i\lambda}$ je tenzorem piezoelektrických konstant obsahující tři nezávislé prvky, definované jako podíl indukce elektrického pole a mechanického napětí nebo mechanické deformace a intenzity elektrického pole:

$$d_{i\lambda} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad d_{i\lambda} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_{\lambda}} \right)_E = \left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial E_i} \right)_T$$

ϵ_{ij}^T je tenzorem dielektrických konstant (permutivity) se dvěma nezávislými prvky, definovanými jako podíl indukce elektrického pole a jeho intenzity při konstantní mechanické deformaci:

$$\epsilon_{ij}^T = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad \epsilon_{ij}^T = \left(\frac{\partial D_i}{\partial E_j} \right)_T$$

2. Piezoelektrický transformátor

2.1 Transformátory obecně

Transformátor je zařízení, které převádí energii ze vstupu na výstup. Můžeme uvažovat transformátor s jedním vstupem a výstupem, tak i více vstupy a výstupy, ale i kombinace předchozích možností. Obecně může být charakter energie na vstupu odlišný od charakteru energie odebírané na výstupu (např. synchronní motor – přivádíme výkon v podobě elektrické energie a odebíráme výkon v podobě mechanické energie rotační). Tato práce se však zaměřuje na transformátory převádějící energie stejného typu (elektrické), přičemž se mění pouze její parametry. U transformátorů je velice důležitým pojmem účinnost, označovaná jako η a definovaná vztahem 2.1.1.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1.1)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad [\text{W}] \quad (2.1.2)$$

η [W]účinnost
 ΔP [W].....rozdíl výkonů
 P_1 [W].....výkon dodávaný na vstup
 P_2 [W].....výkon odebíraný z výstupu

Účinnost je tedy definovaná jako poměr výkonu odebíraného z výstupu a výkonu dodávaného na vstup. Z definice je zřejmé, že tato hodnota nikdy nepřekročí 100 %, ale cílem je se této hodnotě co nejvíce přiblížit, jak už z hlediska ekonomického, tak i z hlediska ztrát. Důvodem je rozdíl výkonů ΔP definovaný vztahem 2.1.2, který se prakticky ve všech případech v časovém hledisku přeměňuje na neužitečné teplo. Je tedy nutno řešit i jeho odvod, aby nedošlo k poškození transformátoru. Dalším důležitým parametrem je jmenovitý výkon označovaný jako P_N [W], udávající hodnotu výkonu na vstupu, pro kterou je zařízení optimalizováno. Hodnota účinnosti proto

nabývá pro P_N svého maxima. Obecně platí že čím větší P_N , tím vyšší cena, neboť s rostoucím jmenovitým výkonem rostou i fyzické rozměry transformátoru.

Běžné elektromagnetické transformátory (ET) jsou definované bezrozměrným číslem převodu – vztah 2.1.3.

$$p = \frac{N_2}{N_1} \quad [1] \quad (2.1.3)$$

p [1].....číslo převodu
 N_1 [1].....počet závitů primárního vinutí
 N_2 [1].....počet závitů sekundárního vinutí

Číslo převodu u ET přibližně odpovídá napěťovému zesílení. U piezoelektrických transformátorů (PT) vzhledem k absenci vinutí nelze číslo převodu zavést, používá se proto napěťové zesílení – vztah 2.1.4.

$$A_u = \frac{U_2}{U_1} \quad [1] \quad (2.1.4)$$

A_u [1]..... napěťové zesílení
 U_1 [V].....napětí na primárním obvodu
 U_2 [V]..... napětí na sekundárním obvodu

Napěťové zesílení je u PT však závislé na frekvenci a často i na amplitudě budícího harmonického napětí. Se zatěžováním výstupního obvodu PT dochází k posunu rezonanční frekvence, proto se zavádí bezrozměrný koeficient zvaný relativní posun frekvence definovaný vztahem 2.1.5.

$$\Delta f_r = \frac{f_r - f_{r0}}{f_{r0}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.1.5)$$

Δf_r [%]relativní posun frekvence
 f_{r0} [Hz]rezonanční frekvence nezatíženého transformátoru
 f_r [Hz]rezonanční frekvence zatíženého transformátoru

Důležitým pojmem u transformátorů je také impedanční přizpůsobení definované vztahem 2.1.6.

$$\hat{Z}_{OUT} = \hat{Z}^* \text{ [\Omega]} \quad (2.1.6)$$

\hat{Z}_{OUT} [\Omega]impedance výstupu transformátoru
 \hat{Z} [\Omega]zatěžovací impedance

Říká nám, že pokud bude impedance výstupu transformátoru rovna komplexně sdružené hodnotě zatěžovací impedance transformátoru, pak výkon na zatěžovací impedanci bude nabývat svého maxima.

2.2 Princip piezoelektrického transformátoru

Piezoelektrické transformátory jsou obdobou transformátorů elektromagnetických. Transformují střídavé elektrické napětí nejlépe o frekvenci blízké nebo rovné rezonanční frekvenci prvku. Přiložením napětí na vstup se vlivem nepřímého piezoelektrického jevu začne prvek deformovat (společná deformace vstupu a výstupu PT je analogií společného magnetického toku u ET). Je-li koeficient elektromechanické vazby dostatečný, pak kmity buzené v primárním obvodu, vyvolají v sekundárním obvodu přímý piezoelektrický jev a napětí primárního obvodu se tím transformuje na výstup. Z principiálního hlediska je možné jako materiál piezoelektrického transformátoru užít libovolné piezoelektrikum - monokrystaly či keramiku, v praxi se však z ekonomických důvodů užívá zejména PZT keramika. Výhody které přináší PT oproti běžným transformátorům jsou tyto čtyři [2]:

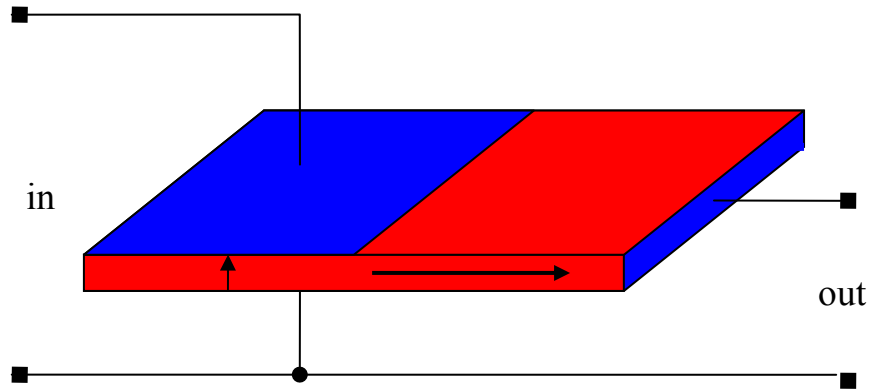
- a) Malé rozměry
- b) Vysoká účinnost (> 90 %) při stejném poměru výkonu k objemu
- c) Absence elektromagnetického šumu
- d) Nehořlavost

S čím dál více rostoucími požadavky integrace, přichází výše zmíněné přednosti velice vhod. Častou aplikací PT je vysokofrekvenční technika, kde PT vytlačují klasické elektromagnetické transformátory, díky skutečnosti, že ztráty v materiálu nejsou tolik závislé na frekvenci (u ET zejména pro vyšší frekvence rostou ztráty vlivem hystereze a vířivých proudů)

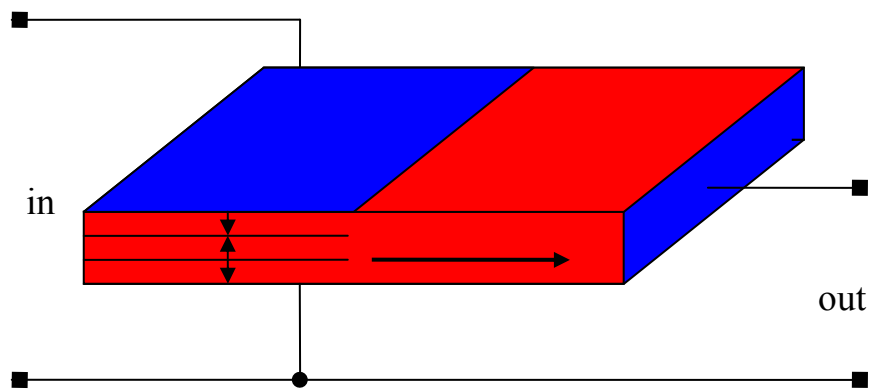
PT je možno v základě rozdělit na typ založený na homogenní keramické destičce a typ založený na vícevrstvé struktuře – Obr. 2.1.

Obr. 2.1 - Transformátory Rosenova typu (šipky v materiálu znázorňují směr polarizace)

a) Transformátor založený na homogenní keramické destičce [2]



b) Transformátor založený na vícevrstvé struktuře



Limitujícím faktorem použití PT je generování tepla vlivem ztrát v materiálu, působením teplotního pnutí by mohlo dojít k mechanickému poškození materiálu. Teplem však degradují i materiálové vlastnosti. Na materiály vhodné pro použití v PT jsou kladeny následující požadavky [2]:

- a) Vysoké koeficienty elektromechanické vazby (vedou k velkému zesílení)
- b) Vysoká mechanická jakost Q_m (ovlivňuje stabilitu frekvence, účinnost)
- c) Vysoká elektrická jakost Q_e (ovlivňuje množství generovaného tepla, malá závislost impedance PT na teplotě)
- d) Vysoká Curieova teplota T_c (možnost nastavení pracovního bodu na vyšších teplotách)

Požadavky na výše uvedené parametry vedly k návrhům mnoha typů PT. Hodnotícími parametry PT jsou zesílení výstupního elektrického obvodu, účinnost, výstupní výkon, případně hustota výkonu (podíl výstupního výkonu a objemu transformátoru).

2.3 Typy transformátorů a módy kmitů

Piezoelektrické transformátory se liší nejen svým designem, ale i módem kmitů, které bývají pro daný design typické. Módy kmitů kruhových rezonátorů mohou být [3]:

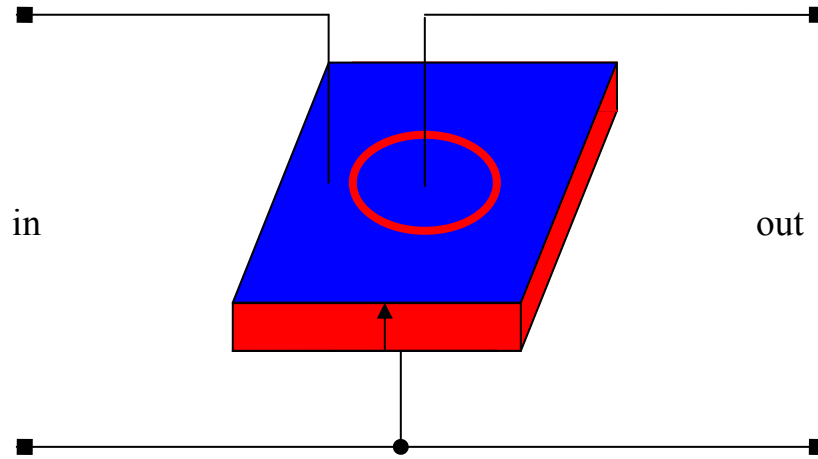
- a) Radiální
- b) Tangenciální (Tečné)
- c) Typu C
- d) Plošně střižné
- e) Podélné

Kmity radiální, tangenciální a typu C patří do skupiny takzvaných obrysových kmitů. Rezonanční frekvence obrysových kmitů kruhového rezonátoru teoreticky nezávisí na jeho tloušťce, ale jsou pouze funkcí jejího průměru [3]. Spektrum kmitů piezokeramického rezonátoru (transformátoru) ovlivňuje nejenom jeho design, ale i Poissonovo číslo - σ , které u veškerých známých piezoelektrických materiálů leží v intervalu 0,2 až 0,4 [3]. Analytický výpočet kmitů je obecně velice složitá záležitost a vede zpravidla na Besselovy funkce.

Například Rosenův transformátor (Obr. 2.1a) využívá podélné kmity [4], jsou však i variace tohoto typu transformátoru na kruhu nebo prstenci využívající plošně rozpínavé kmity, respektive kmity tangenciální. Typické parametry jednovrstvých transformátorů Rosenova typu [2]: $A_u = 15$, $\eta > 95 \%$ a hustota výstupního výkonu $130 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Dalším typem PT, jsou transformátory „ring-dot“, využívající planárních kmitů piezokeramické destičky. Výhodou oproti Rosenovu typu je jednoduchá polarizace. Většina transformátorů ring-dot je polarizovaná homogenně ve směru tloušťky v celém objemu keramického prvku. Typické parametry [2]: $A_u = 5$, $\eta > 97 \%$ a hustota výstupního výkonu $17 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-3}$. Příklad transformátoru ring-dot je na Obr. 2.2.

Obr. 2.2 - Transformátor typu ring-dot [2]

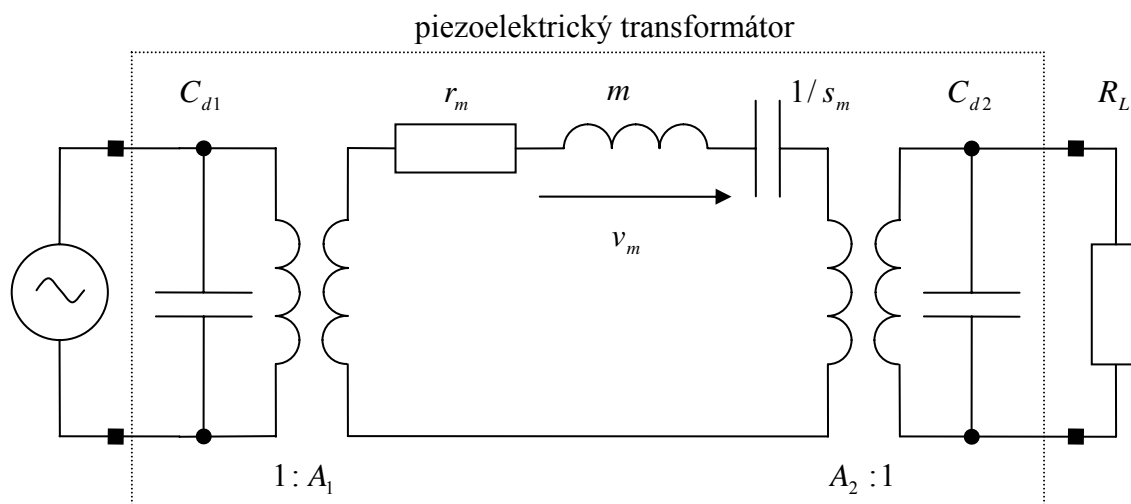


Kromě transformátorů typu Rosenova a ring-dot existuje i mnoho jiných. Každý design má své klady a zápory, pro každou aplikaci se hodí jiný.

2.4 Náhradní obvod piezoelektrického transformátoru

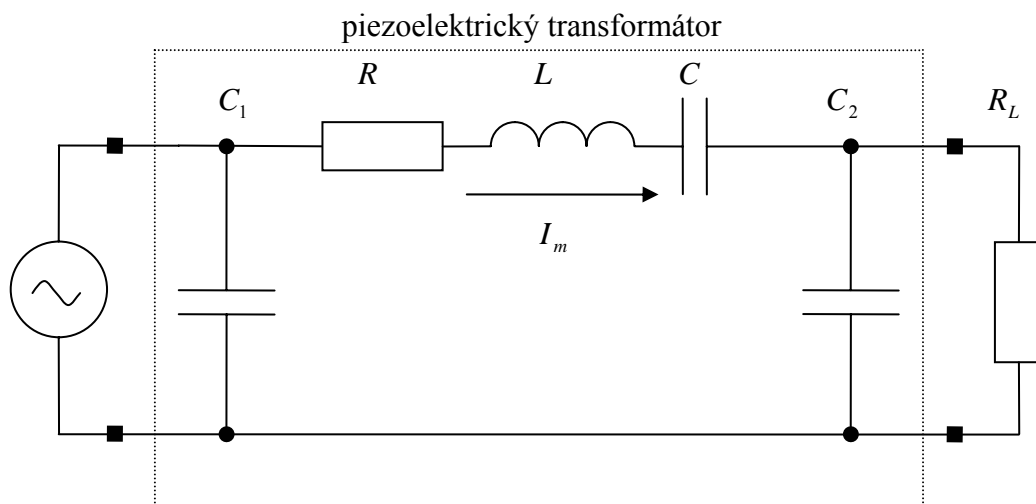
Piezoelektrický transformátor je stejně jako elektromagnetický transformátor složitější zařízení, nedá se tedy popsat pouze konstantním přenosem (zesílením). Náhradní elektromechanický obvod PT je znázorněn na Obr. 3.4. Pro převod elektromechanické přeměny energie na „čistě“ elektrické schéma se využívá metody grafu toku výkonu. Elektrické napětí je zde ekvivalentem síly, elektrický proud rychlosti, indukčnost ekvivalentem hmotnosti, mechanický odpor (ztráty) představuje elektrický odpor a poddajnost odpovídá kapacitě. Analogií elektrické impedance je impedance mechanická, definovaná jako poměr síly působící na soustavu a rychlosti, kterou na základě síly soustava kmitá. [2]

Obr. 3.4 - Náhradní elektromechanický obvod PT [2]



C_{d1} , C_{d2} představují upnuté kapacity vstupu a výstupu PT a A_1 , A_2 transformační poměry vstupu a výstupu. R_L je zátěž výstupní části PT. S elektrickou analogií se shoduje i řazení prvků, jsou-li připojeny k jedné síle, pak se řadí paralelně. Pohybují-li se stejnou rychlostí, pak se řadí sériově. Zdrojem síly se rozumí generátor, páka nebo transformátor. Na Obr. 3.5 je modifikované zapojení pro účely zapojení PT do obvodů střídavého proudu.

Obr. 3.5 - Náhradní schéma PT, realizované pomocí ideálních prvků RLC [2]



3. Výběr a příprava vzorků piezoelektrických transformátorů

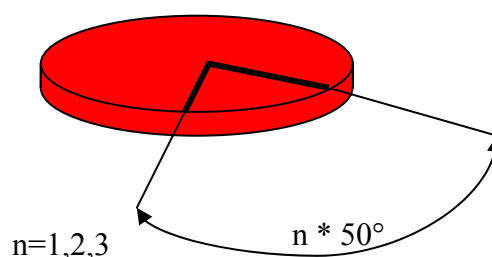
3.1 Zvolený design piezoelektrických transformátorů

Tato práce se věnuje transformátorům ve tvaru disku s klínovitě dělenou elektrodou. Návrh byl proveden na základě práce Oto Stefana [3]. Dle poznatků získaných z této práce by měly transformátory pracovat v módu plošně střižných kmitů. Nemáme však zařízení, které by umožňovalo mód kmitů změřit.

3.2 Postup přípravy vzorků

Základem našich PT je disk z tvrdé PZT keramiky, typ APC 841 o průměru 40 mm a tloušťce 2 mm. Typické hodnoty materiálových koeficientů zachycuje Tab. 3.1. Transformátor s klínem hlavní elektrody 180° byl hotov. Vyráběly se ještě 3 transformátory s úhlem klínového segmentu hlavní elektrody rovným celočíselnému násobku 50° (Transformátory jsou dále značeny podle velikosti úhlu klínu primární elektrody – **T50, T100, T150, T180**). Nejdříve bylo nutné vyznačit na disk z obou stran tvar elektrod – Obr 3.1. Poté se na místa, kde byl vyznačen tvar elektrod, nalepily tenké proužky izolepy. Následně již bylo možné nanášet stříbrnou pastou elektrody. Bylo důležité, aby se kvůli polarizaci pasta nedostala na bok disku, neboť by mohlo dojít k difúzi pasty do materiálu. Při polarizaci by pak i po odstranění zaschlé pasty z povrchu hrozil na boku disku průraz dielektrika. Po zaschnutí pasty se odstranila izolepa a na její místo se nanasla vodou smývateľná stříbrná pasta, důvodem bylo spojení elektrod kvůli homogenní polarizaci disku. Takto připravené vzorky již bylo možno polarizovat.

Obr. 3.1 - Vyznačení elektrod



Polarizace probíhala elektrickým polem za zvýšené teploty, dle postupu zmíněného již v kapitole 1.3. Vzorky byly svými spojenými elektrodami postupně upevněny do vodivé konstrukce a spolu s ní ponořeny do silikonového oleje ohřátého na 130°C . Na polarizaci byl použit regulovatelný vysokonapěťový zdroj 0-8 kV. Polarizační pole by mělo mít velikost 3 kV/mm, vzhledem k tloušťce disků (2 mm) by tedy měl být každý disk připojen na napětí 6 kV. Vysokonapěťový zdroj jsme připojili k vodivé konstrukci držáku a postupně zvyšovali napětí.

Polarizace transformátorů:

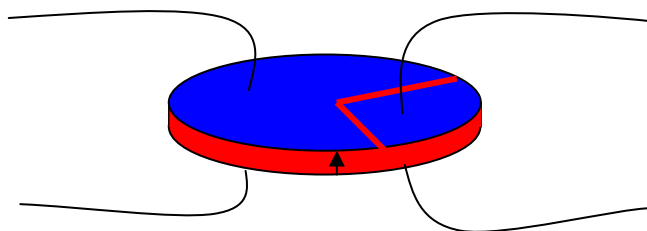
T50: Při napětí 5 kV začalo docházet k probíjení na hranách disku, snížili jsme napětí na 4,8 kV a při tomto napětí zůstal vzorek v lázni pět minut.

T100: Při napětí 4,8 kV docházelo na hranách k velkému jiskření, napětí bylo sníženo na 4,4 kV, po vyndání z lázně bylo odhaleno mechanické poškození na hraně. Vzorek byl nepoužitelný a celý proces výroby se musel opakovat. Při druhém pokusu vzorek asi po 20 sekundách v lázni při 5 kV prasknul. Při třetím pokusu jsme již nechtěli riskovat zničení dalšího vzorku a nastavili proto napětí 4,6 kV. Vzorek zůstal v lázni pět minut, během polarizace napětí stoupl na 4,8 kV. Vzorek byl po vyjmutí z lázně nepoškozen.

T150: Již při napětí 4 kV se na hranách začaly objevovat jiskry a po zvýšení napětí se začaly štípat hrany - vzorek byl znehodnocen. Na druhý pokus se při napětí 4,5 kV na hranách začaly opět objevovat jiskry, napětí jsme dále nezvyšovali. Po třech minutách jiskření ustalo a po pěti minutách napětí vystoupalo na 4,9 kV.

Po vyjmutí vzorků z lázně byly všechny pečlivě odmaštěny a byla smyta vodou rozpustná vodivá pasta, která vodivě spojovala elektrody při polarizaci. Kvalita polarizace byla ověřena v d_{33} -metru. Hodnoty koeficientu d_{33} se bezprostředně po polarizaci pohybovaly v rozmezí 230 až 260 $\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$. Stříbrnou pastou jsme na elektrody připevnili kontakty – Obr 3.2.

Obr. 3.2 - Ukázka hotového vzorku T100



Tab 3.1 - Typické hodnoty materiálových koeficientů pro tvrdou PZT keramiku APC841 [1]

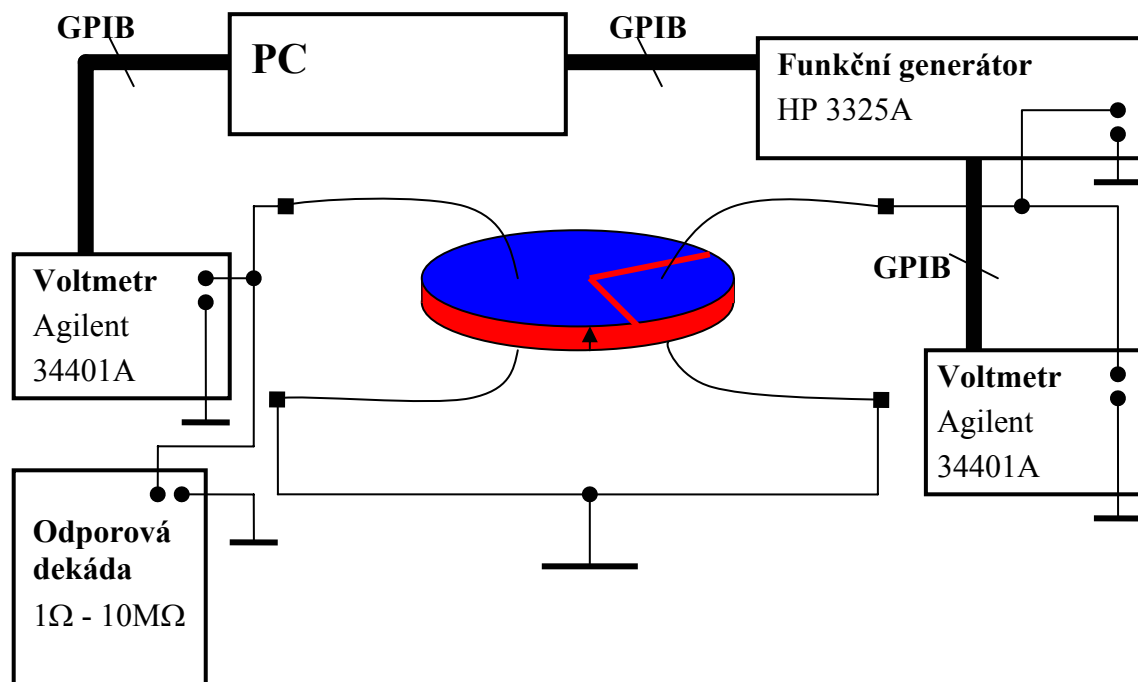
Vlastnost	Jednotka	APC841
$\varepsilon_{33} / \varepsilon_0$	1	1350
$\tan(\delta)$	%	0,35
T_C	°C	320
k_p	1	0,60
k_{33}		0,68
k_{31}		0,33
k_{15}		0,67
d_{33}	10^{-12} C/N	275
$-d_{31}$	nebo	109
d_{15}	10^{-12} m/V	450
g_{33}	10^{-3} Vm/N	25,5
$-g_{31}$	nebo	10,5
g_{15}	10^{-3} m ² /C	35
s_{11}^E	10^{-12} m ² / N	11,7
s_{33}^E		17,3
ρ	g/cm ³	7,6
Q_m	1	1400

4. Vlastní měření

4.1 Měření frekvenčních charakteristik piezoelektrických transformátorů

Hotové transformátory byly připojeny do přípravku s kontakty, na vstupní elektrodu se připojil výstup z funkčního generátoru Hewlett Packard - HP 3325A, na výstupní elektrodu multimetr Agilent 34401A. Výstupní napětí generátoru není tvrdé, proto byl také na vstupní elektrodu připojen multimetr Agilent 34401A. Všechny použité měřicí přístroje v laboratoři jsou propojeny s počítačem sběrnicí IEEE 488 (GPIB), která svojí rychlostí pro účely tohoto měření naprosto postačuje. Schématicky je měřicí zapojení zachyceno na Obr. 4.1. Měření probíhalo automatizovaně v prostředí Agilent VEE 6.2. Stačilo pouze nastavit délku frekvenčního kroku na intervalech rezonancí a délku kroku mimo ně. Najednou šlo měřit maximálně 3 rezonance, vzhledem k velice členitému spektru všech transformátorů měření pro jednu zátěž probíhalo většinou ve dvou krocích.

Obr. 4.1 – Schéma měřicího zapojení



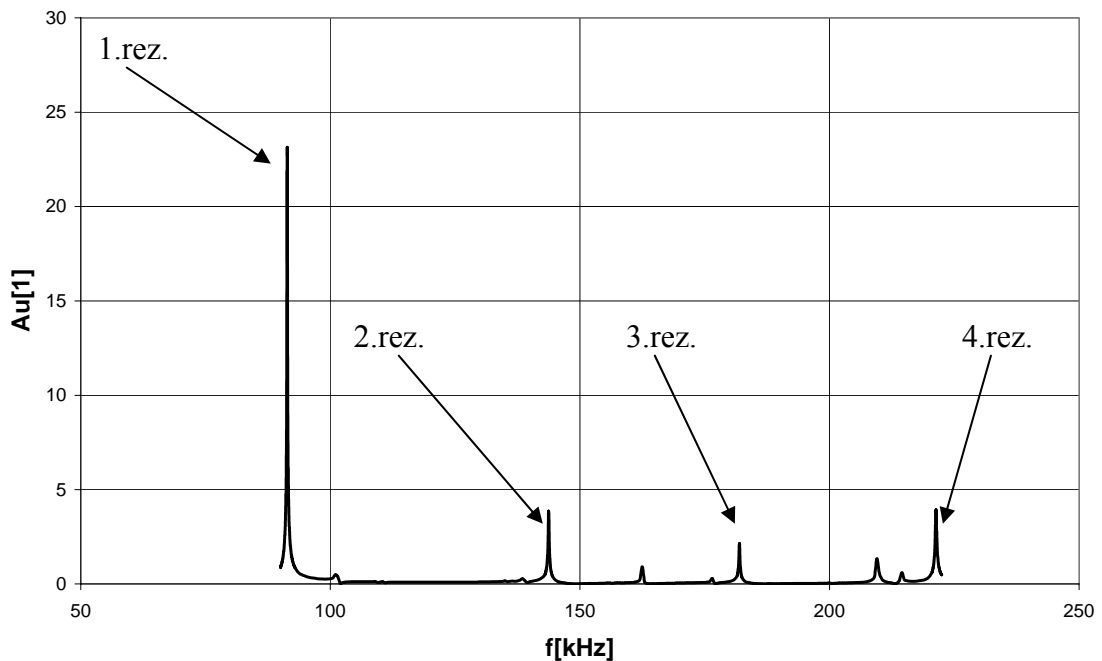
Kvůli časové náročnosti jsme volili frekvenční krok v rezonancích 10 Hz a mimo ně 100 Hz. I tak však proměření všech rezonancí (pro jednu zatěžovací impedanci) v pásmu 0-300 kHz (frekvenční rozsah multimetru Agilent 34401A) někdy trvalo skoro dvě hodiny. Nejdříve se spektrum každého transformátoru proměřilo s hrubým krokem, aby se našly rezonance. Poté se již spektrum měřilo detailněji, přičemž měření začínalo u první nalezené rezonance ve spektru.

Výstupem programu byly soubory obsahující informace o nastavené amplitudě na generátoru, o frekvenci, elektrickém napětí na vstupu, elektrickém napětí na výstupu a zesílení A_u . Konec souboru obsahoval informace o maximálním zesílení v daném pásmu a příslušné frekvenci pro každou amplitudu nastavenou na budícím generátoru. Z časových důvodů byla u každého transformátoru detailně proměřována pouze rezonance, která měla ve stavu bez zatížení nejvyšší hodnotu zesílení A_u , při výstupních amplitudách napětí generátoru 1 V, 2 V, 5 V a 10 V. Pro ostatní rezonance v pásmu byla měřena pouze špičková zesílení a rezonanční frekvence. Celé pásmo se proměřovalo pouze pro nezatížený výstup transformátoru (zatížený pouze vstupní impedancí voltmetru Agilent 34401A, která je 10 M Ω). Poté se výstup zatěžoval impedancemi 10 M Ω , 1 M Ω , 100 k Ω , 50 k Ω , 10 k Ω , 5 k Ω , 1 k Ω , 100 Ω a 10 Ω . Stále však bylo nutno uvažovat i vstupní impedanci voltmetru. Daná hodnota zátěže se tedy musela ještě sečíst pomocí vzorce na paralelní řazení impedancí se vstupní impedancí voltmetru. Výsledné zatěžovací impedance byly tedy 10 M Ω (pouze připojený voltmetr), 5 M Ω , 909 k Ω , 100 k Ω , 50 k Ω , 10 k Ω , 5 k Ω , 1 k Ω , 100 Ω a 10 Ω .

4.2 Frekvenční charakteristiky T50

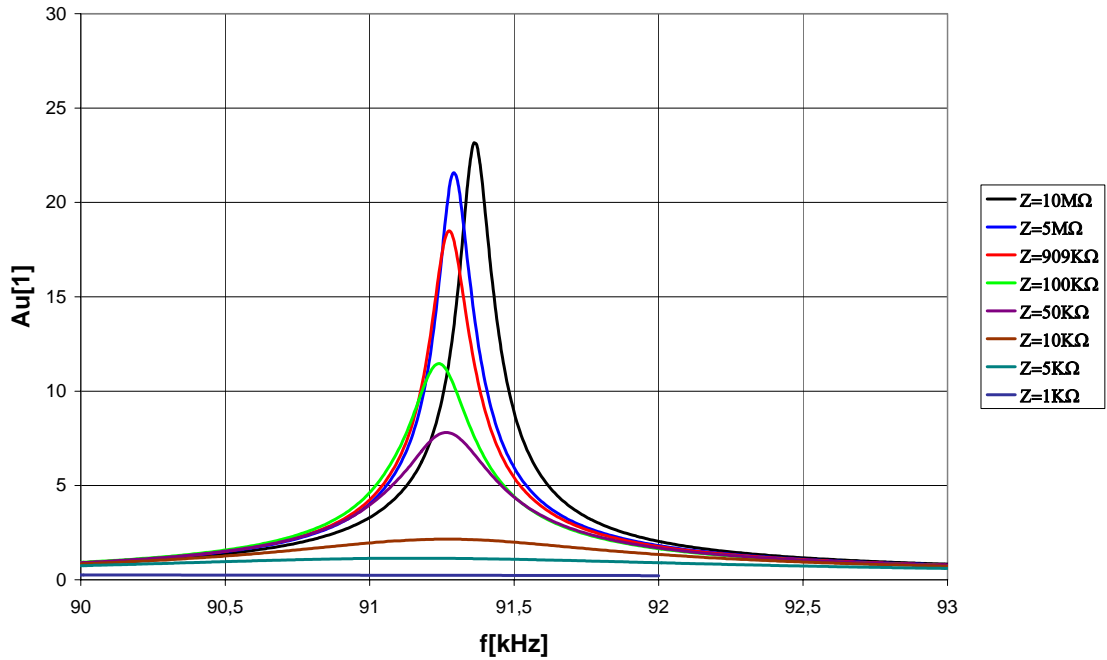
U T50 byla první výrazná rezonance až za 90 kHz. Na spektru (Graf 4.1) jsou vidět čtyři výraznější rezonance (dále značené jako **1.rez.**, **2.rez.**, **3.rez.** a **4.rez.**), které byly podrobeny detailnějšímu zkoumání.

Graf 4.1 – Spektrum transformátoru T50, $Z = 10 \text{ M}\Omega$ při amplitudě budícího signálu 1 V

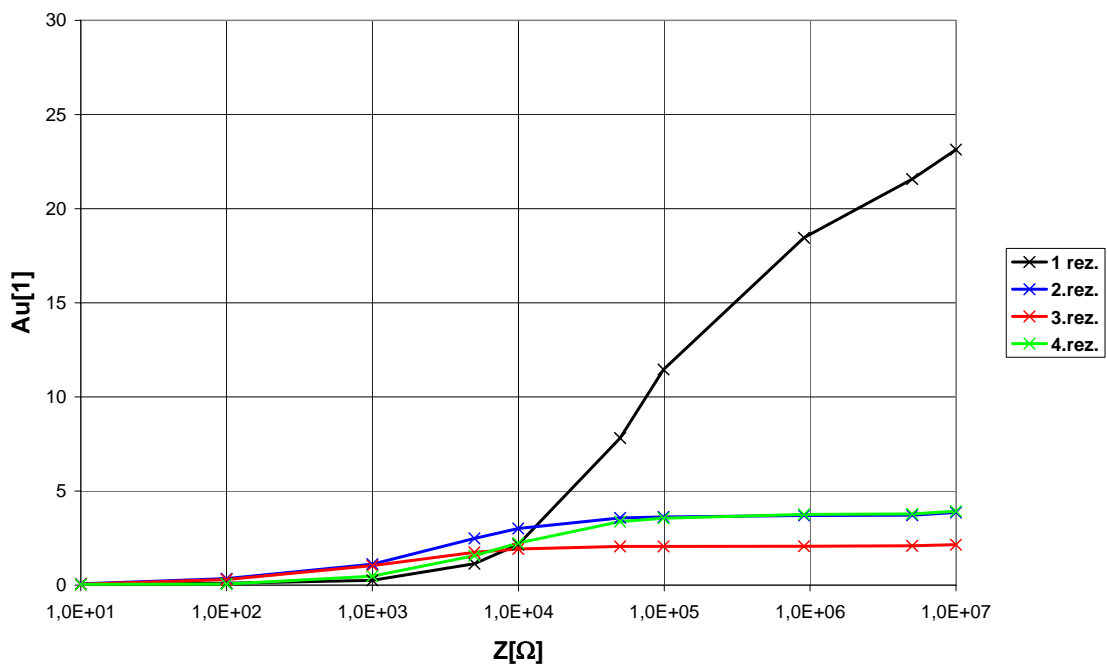


Graf 4.2 ukazuje posun frekvence a pokles zesílení první rezonance v závislosti na zatížení výstupu. Ukázka je provedena na 1. rezonanci, která svým zesílením dominuje celému spektru. Graf 4.3 zachycuje trend zesílení v závislosti na zatěžování výstupního obvodu piezoelektrického transformátoru u všech čtyř sledovaných rezonancí. Na grafu 4.4 je zachycen relativní posun frekvence sledovaných rezonancí v závislosti na zatěžovací impedanci. Graf 4.5 ukazuje na první rezonanci, že zesílení A_u není jen veličina závislá pouze na zatížení výstupního obvodu PT, ale i na amplitudě budícího napětí. V této kapitole je ukázka asi všech charakteristik, které se dají podle našeho měření u jednotlivých PT sledovat. Vzhledem k rozsáhlosti jsou důležité charakteristiky dalších PT (T100, T150, T180) umístěny do přílohy. Přílohou je i datové médium CD, které obsahuje veškerá data, která byla během měření získána.

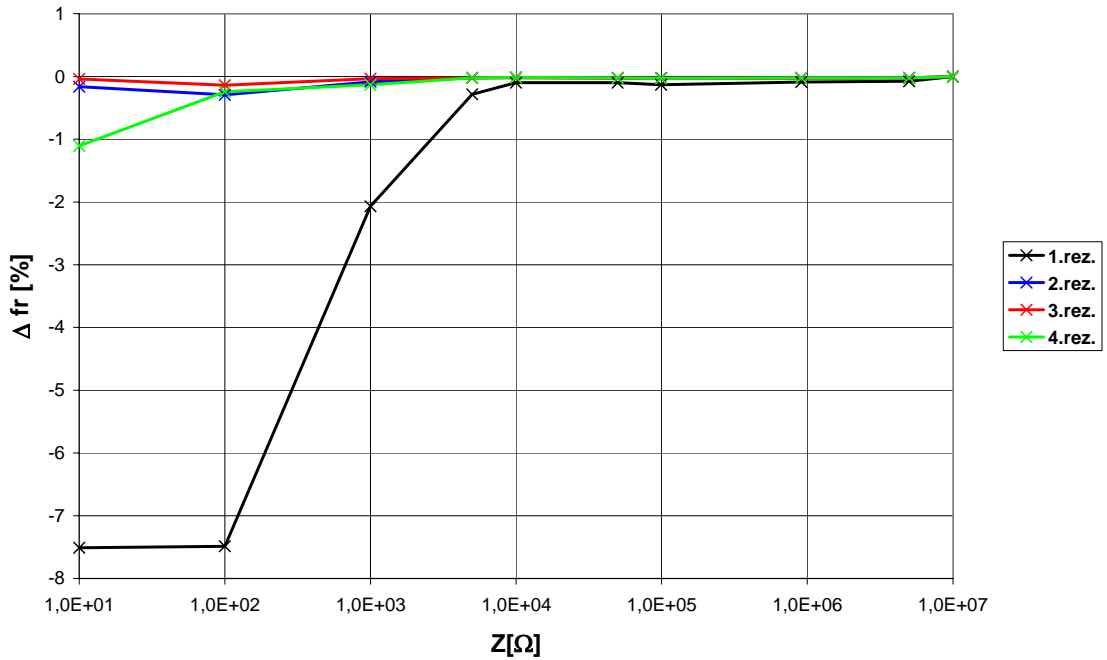
Graf 4.2 – T50 – 1. rezonance pro různě zatížený výstupní obvod při amplitudě budícího signálu 1 V



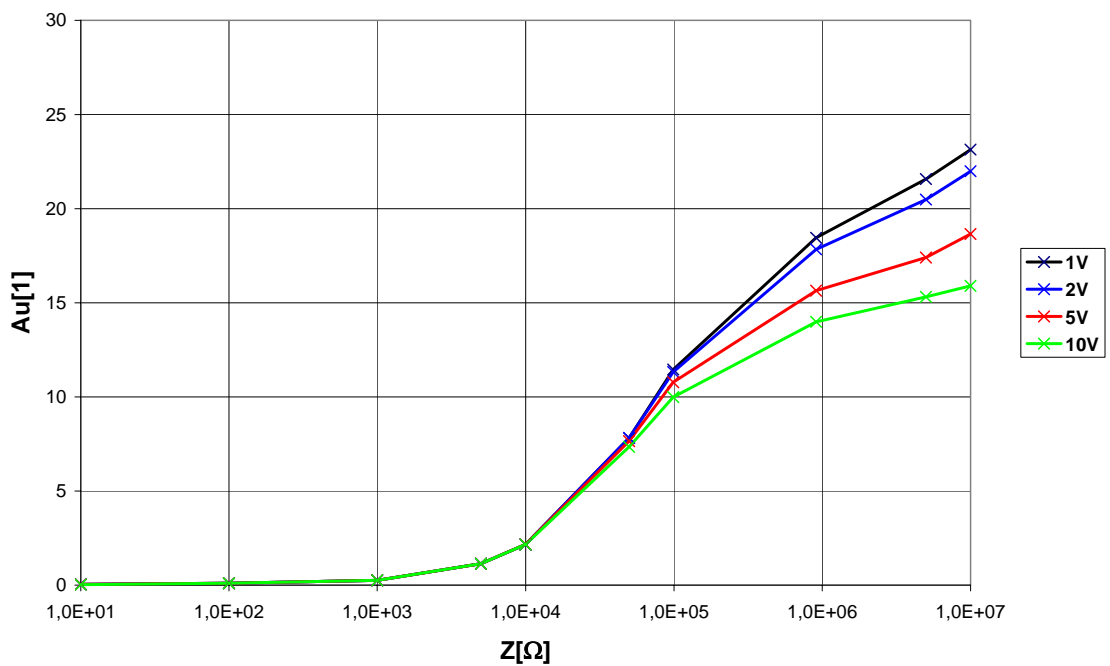
Graf 4.3 – T50 – Napěťové zesílení v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V



Graf 4.4 – T50 – Relativní posun rezonančních frekvencí v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V



Graf 4.5 – T50 – Napěťové zesílení (1. rez.) v závislosti na zatěžování výstupního obvodu pro různé amplitudy budícího napětí



5. Hodnocení výsledků

Pohledem na frekvenční charakteristiky je vidět, že jednotlivé PT zesilují napětí pouze v relativně úzkých oblastech (rezonancích). Spektrum je velice členité, u každého PT je jedna rezonance poblíž 90 kHz, která danému spektru dominuje (v grafech vždy odznačována jako 1.rez.). Napět'ové zesílení PT ve stavu zatížení pouze vstupním odporem voltmetru se pro tuto rezonanci vzorek od vzorku příliš nemění, pohybuje se v rozmezí od 23 do 25. Pohledem na charakteristiky závislosti napět'ového zesílení na zatěžovací impedanci vidíme oblast nasyceného zesílení (pro velké Z), ale také prudký pokles zesílení s klesající impedancí. Pokud hodnota zatěžovací impedance poklesne pod určitou hodnotu (Z z intervalu $1\text{ k}\Omega - 100\text{ k}\Omega$), pak zesílení na 1. rezonanci již není největší, ale začne převládat některá vyšší rezonance ze spektra. Příkladem je graf 4.3, kde se pro $Z < 50\text{ k}\Omega$ peak 1. rezonance propadl svým zesílením pod všechny ostatní rezonance. Na vyšších rezonancích ze spektra (viz. graf 4.3) mají PT zesílení v závislosti na zatěžovací impedanci mnohem méně závislé. Napět'ové zesílení na 3. rezonanci v rozmezí zatěžování $10\text{ M}\Omega$ až $50\text{ k}\Omega$ nepoklesne o více než 4 %. Pro vyšší hodnoty zatěžovací impedance je špičkové zesílení závislé i na velikosti amplitudy budícího harmonického napětí. Pro $Z = 10\text{ M}\Omega$ činil pokles zesílení 31 % (mezi 1 V a 10 V), s klesající zátěží se pokles zesílení snižuje a pro $Z < 50\text{ k}\Omega$ nepřekračuje 6 %.

Zatěžování výstupního obvodu PT má vliv i na relativní posun rezonanční frekvence (Graf 4.4), který je opět největší u 1. rezonance (maximální hodnota dosahuje skoro -8 %). Relativní posun rezonanční frekvence vyšších rezonancí ze spektra není tak výrazný, pohybuje se nejvýše kolem -3 % v celém rozsahu zátěží. U výše zmíněné 3. rezonance transformátoru T50 však na intervalu zatěžování $50\text{ k}\Omega$ až $10\text{ M}\Omega$ nepřekročí ani hodnotu -0,03 %.

Srovnání jednotlivých transformátorů je na grafech 5.1, 5.2 a 5.3. Graf 5.1 ukazuje závislost zesílení PT na 1. rezonanci v závislosti na poměru ploch

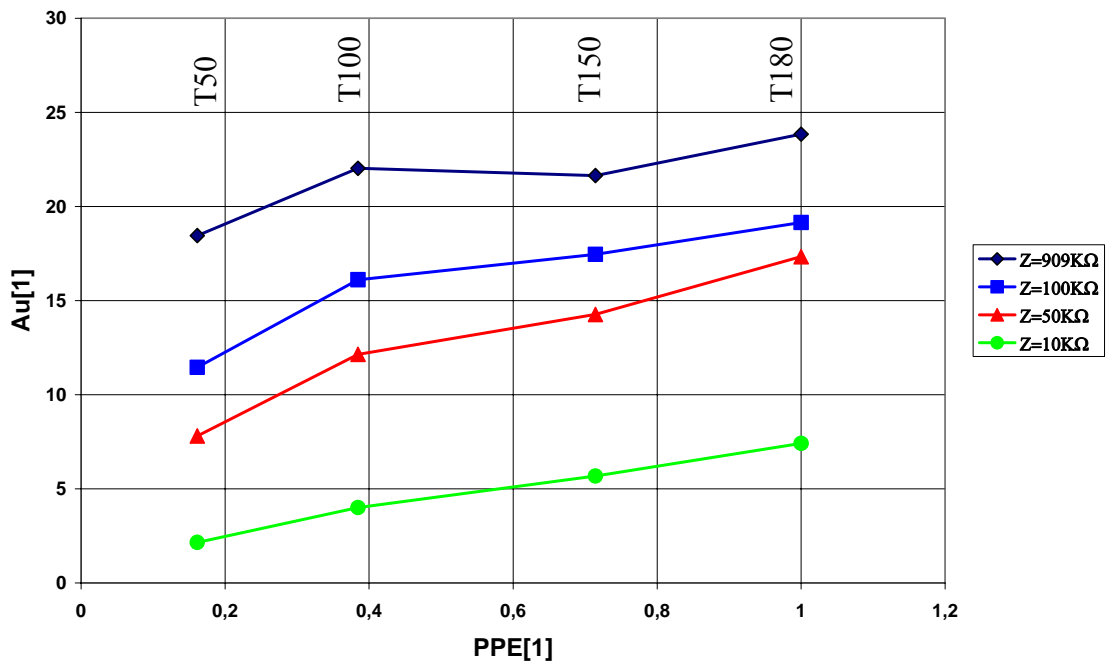
elektrod (PPE), pro jednotlivé zatěžovací impedance. Poměr ploch elektrod je definovaný vztahem 5.1.1. S rostoucím PPE roste i zesílení při konstantní zatěžovací impedanci. Velikostí úhlu primární elektrody, která roste současně s PPE lze tedy přímo ovlivnit zesílení. Například pro zátěž $Z = 10 \text{ k}\Omega$ lze A_u ovlivnit v rozmezí 2,15 až 7,41 (pro úhel hlavní elektrody v rozmezí 50° až 180°).

$$PPE = \frac{\alpha}{360 - \alpha} [1] \quad (5.1.1)$$

PPE[1]poměr ploch elektrod

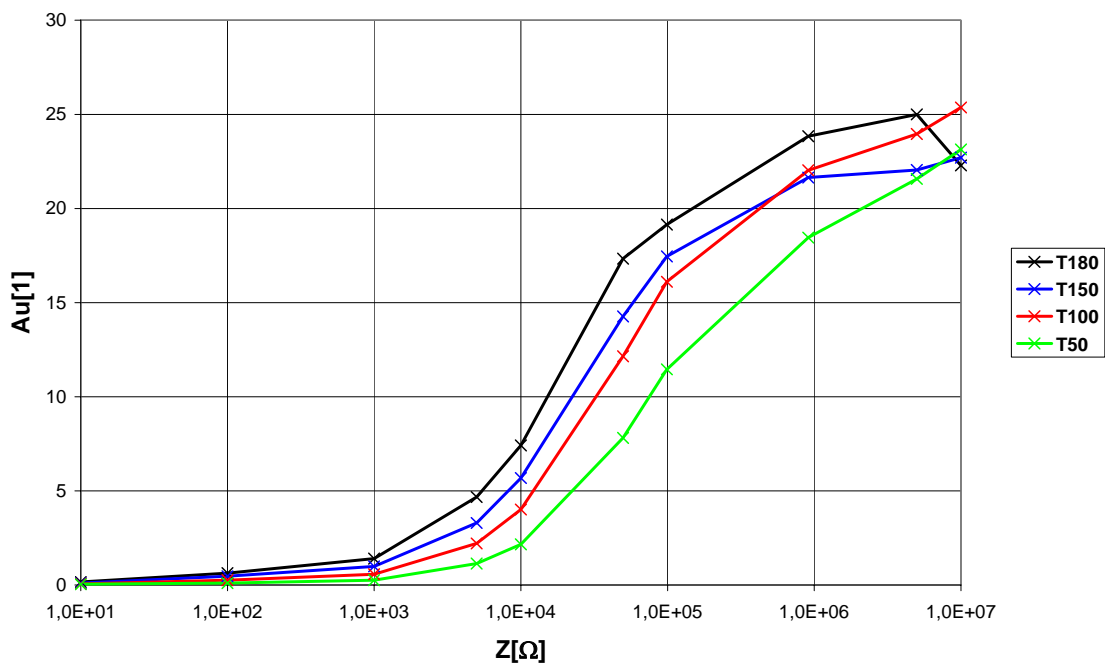
α [$^\circ$].....velikost úhlu primární elektrody

Graf 5.1 – Závislost napět'ového zesílení PT (1.rez.) na poměru ploch elektrod při konstantní amplitudě budícího napětí 1 V pro různé zatěžovací impedance



Graf 5.2 zachycuje zesílení PT (1.rez.) v závislosti na zatěžovací impedanci pro jednotlivé transformátory. Charakteristika T180 dosahuje nejvyšších zesílení, pro zatěžovací impedanci $Z = 10 \text{ M}\Omega$ se však láme dolů. Zesílení jednotlivých PT při $Z = 10 \text{ M}\Omega$ se pohybuje v rozsahu 23-25. Je zde opět vidět trend růstu A_u společně s růstem úhlu primární elektrody.

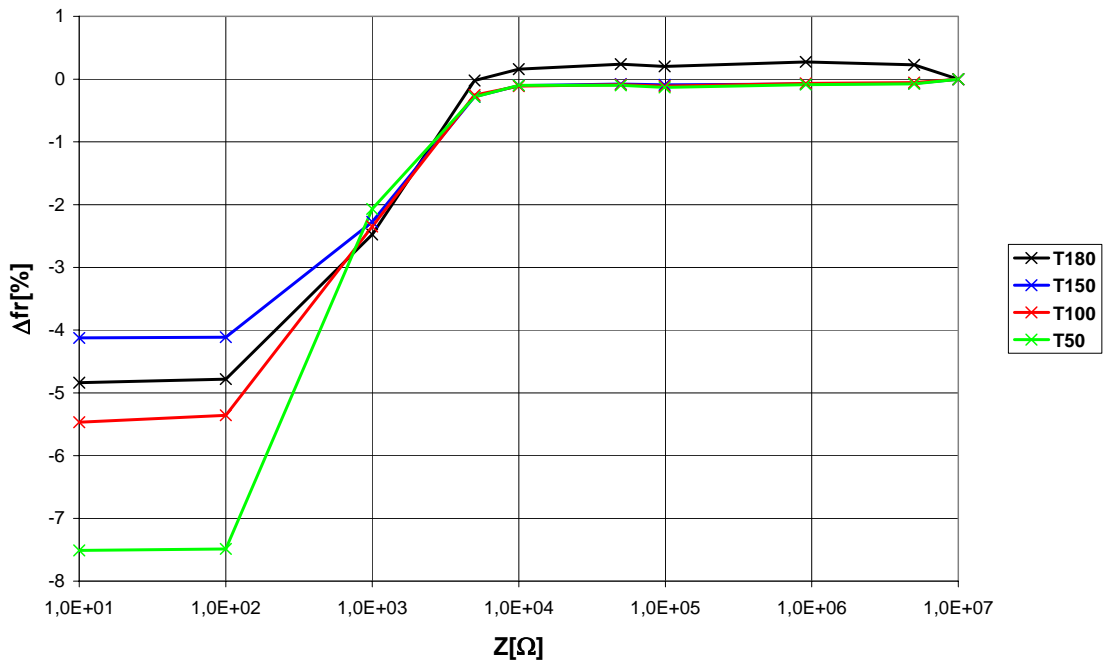
Graf 5.2 – Závislost napětového zesílení PT (1.rez.) na zatěžování výstupního obvodu pro jednotlivé transformátory při konstantní amplitudě budícího napětí 1 V



Graf 5.3 ukazuje relativní posun frekvence 1. rezonance v závislosti na zatížení výstupu, pro jednotlivé transformátory. Pro zatěžovací impedance $10 \text{ }\Omega$ a $100 \text{ }\Omega$ jsou patrné největší rozdíly mezi jednotlivými PT. Největší posun frekvence pro tyto zátěže vykazuje T50 (-7,5 %), nejmenší T150 (-4 %). Pro zatěžovací impedance větší než $10 \text{ k}\Omega$ jsou rozdíly v relativních posunech rezonanční frekvence téměř nerozeznatelné (vyjma T180) a ztrácí se v tolerancích čar jednotlivých charakteristik. T180 se celkově svými výsledky vymyká všem ostatním. Důvodem je jeho rozdílná konstrukce,

symetrická podle osy procházející středem disku, umožňující více módů kmitů. Proto je ve spektru T180 více rezonancí než u ostatních transformátorů.

Graf 5.3 – Relativní posun 1. rezonanční frekvence jednotlivých transformátorů v závislosti na zatěžování výstupního obvodu pro jednotlivé transformátory při amplitudě budícího napětí 1 V



Chyby měření při určování rezonanční frekvence, nepřekročily ± 5 Hz (polovina frekvenčního kroku při měření), což představuje pro první rezonanci ze spektra PT relativní chybu menší než $6 \cdot 10^{-3}$ %.

Krajní chyba měření při určování napětového zesílení (nepřímo měřené veličiny) je definována vztahem lineárního hromadění chyb jako totální diferenciál výrazu na výpočet napětového zesílení (2.1.4) a vypadá tedy následujícím způsobem:

$$\Delta A_u = \left| \frac{\partial \left(\frac{U_2}{U_1} \right)}{\partial U_1} \Delta U_1 \right| + \left| \frac{\partial \left(\frac{U_2}{U_1} \right)}{\partial U_2} \Delta U_2 \right| = \left| -\frac{U_2}{U_1^2} \Delta U_1 \right| + \left| \frac{1}{U_1} \Delta U_2 \right| \quad [1] \quad (5.1.1)$$

$\Delta A_u [1]$chyba měření napět'ového zesílení

$U_1 [V]$ změřené napětí na vstupu

$U_2 [V]$ změřené napětí na výstupu

$\Delta U_1 [V]$ chyba měření napětí na vstupu

$\Delta U_2 [V]$ chyba měření napětí na výstupu

Chyby měření střídavého harmonického napětí na multimetru Agilent 34401A pro napět'ový rozsah 1-750 V a frekvenční rozsah 50-100 kHz jsou 0,60 % z naměřené hodnoty a 0,08 % z rozsahu voltmetru. A pro rozsah 100-300 kHz 4,00 % z naměřené hodnoty a 0,5 % z rozsahu voltmetru. Dají se tedy zapsat pro rozsah 50-100 kHz jako 5.1.2 a pro rozsah 100-300 kHz jako 5.1.3.

$$\Delta U_i = 0,012U_i + 0,0008U_{Ri}, (i=1,2) [V] \quad (5.1.2)$$

$$\Delta U_i = 0,04U_i + 0,005U_{Ri}, (i=1,2) [V] \quad (5.1.3)$$

$U_{Ri}[V]$ napět'ový rozsah voltmetru na vstupu ($i=1$), výstupu ($i=2$)

Výraz 5.1.1 lze tedy užitím vztahu pro chyby (5.1.3) rozepsat následujícím způsobem:

$$\Delta A_u = \left| -\frac{U_2}{U_1^2} (0,04U_1 + 0,005U_{R1}) \right| + \left| \frac{1}{U_1} (0,04U_2 + 0,005U_{R2}) \right| \quad (5.1.4)$$

roznásobením členů, odstraněním absolutních hodnot a dosazením vztahu 2.1.4 získáme z 5.1.4 vztah 5.1.5:

$$\Delta A_u = 0,04 \cdot A_u + 0,005 \cdot U_{R1} \cdot \frac{A_u}{U_1} + 0,04 \cdot A_u + 0,005 \cdot U_{R2} \cdot \frac{1}{U_1} \quad (5.1.5)$$

Úpravou 5.1.5 získáváme 5.1.6:

$$\Delta A_u = 0,08 A_u + \frac{0,005}{U_1} \cdot (A_u \cdot U_{R1} + U_{R2}) \quad (5.1.6)$$

Obdobným způsobem bychom získali vztah 5.1.7 (dosazením 5.1.2 do 5.1.1), pro určení chyby A_u pro frekvence menší jak 100 kHz.

$$\Delta A_u = 0,012 A_u + \frac{0,0008}{U_1} \cdot (A_u \cdot U_{R1} + U_{R2}) \quad (5.1.7)$$

Již na první pohled je vidět, že krajní relativní chyba napěťového zesílení pro frekvence do 100 kHz je minimálně 1,2% (koeficient u prvního členu vztahu 5.1.7) a pro frekvence nad 100 kHz minimálně 8 % (koeficient u prvního členu vztahu 5.1.6). Maximální relativní chyba zesílení pro T50 (v celém měřeném spektru) je skoro 30 %, jedná se však o relativní chybu v oblasti mimo rezonanci, kdy PT vstupní napětí zeslabuje. Na vrcholu 1. rezonančního peaku T50 je relativní chyba zesílení 3,3 %. Průměrná relativní chyba zesílení v celém měřeném rozsahu frekvencí u T50 pro napětí 1 V je 2,6 %.

6. Závěr

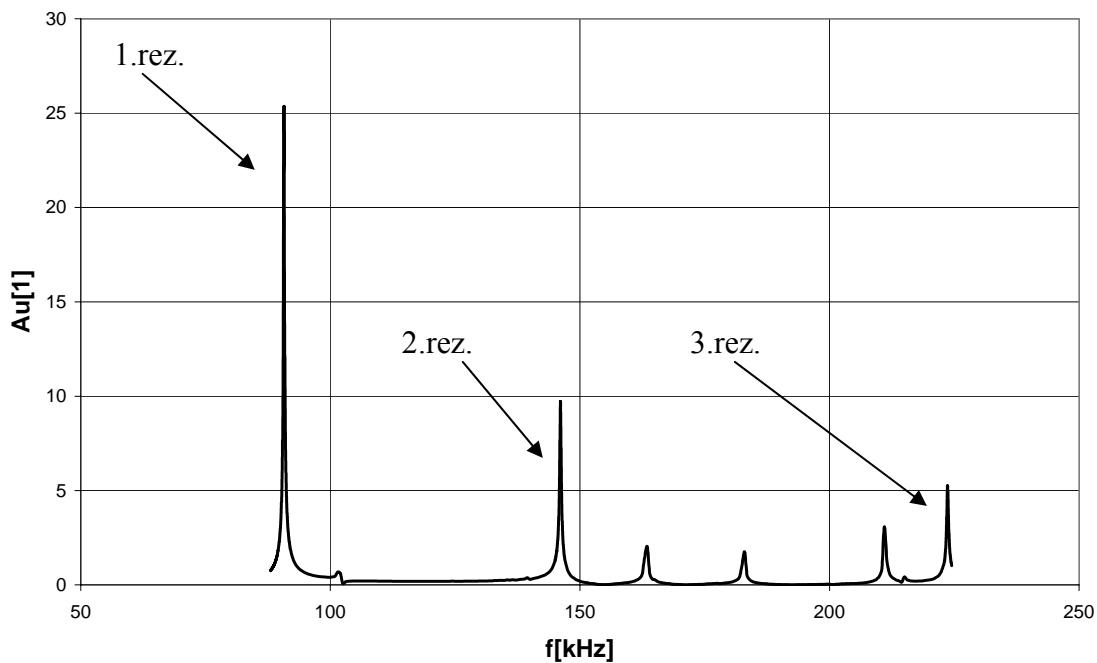
Během měření bylo získáno o transformátorech T50, T100, T150 a T180 mnoho dat, v této práci jsou však publikována jen ta nejdůležitější. Všechna ostatní data jsou součástí přílohy na CD. Transformátory T50, T100 a T150 dosahují kvalitativně podobných výsledků, T180 se svými charakteristikami liší. Důvodem je symetrie elektrod podle osy procházející středem, jeho spektrum je členitější a obsahuje i rezonance, které ostatní transformátory nemají. Zpočátku se zdálo, že vzhledem ke členitosti spektra každého zde měřeného PT, budou transformátory v praxi nepoužitelné. Pro PT by bylo určitě vhodnější, kdyby byla veškerá energie soustředěna do jednoho kmitu, tedy kdyby spektrum nebylo členité. Naměřené hodnoty však poukázaly na některé zajímavé vlastnosti zejména vyšších rezonancí ze spektra. Jejich charakteristiky napěťového zesílení v závislosti na zatěžovací impedanci jsou od jisté hodnoty zatěžovací impedance na zatěžování téměř nezávislé. I relativní posun vrcholu rezonančního peaku je na tomto intervalu zatěžování velice malý. Tyto vlastnosti jsou pro transformátory žádoucí. Jedinou nevýhodou vyšších rezonancí je nízké zesílení. Transformátory by se daly provozovat i na své první rezonanci, na které dosahují vysokých hodnot napěťového zesílení. Nevýhodou je však značná závislost napěťového zesílení i relativního posunu rezonančního peaku na zatěžovací impedanci. Jsou však aplikace, kde není třeba velký proudový odběr a tedy by výše zmíněné vlastnosti nevadily. Na základě této práce by se daly navrhnout transformátory optimalizované pro danou impedanci zátěže při daném zesílení.

Použitá literatura

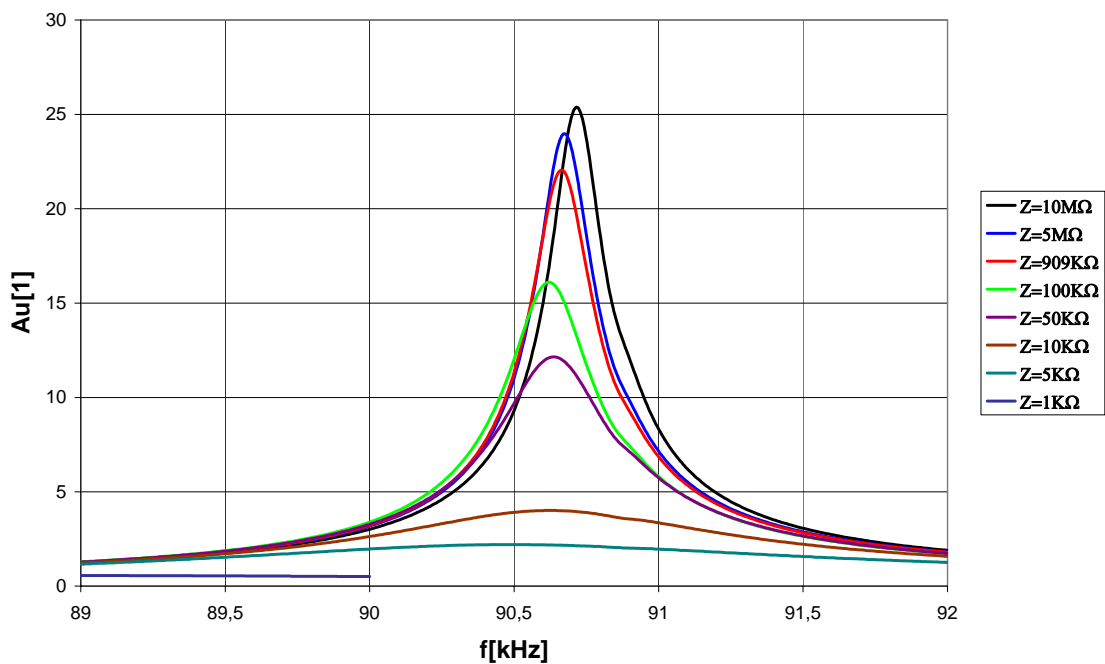
- [1] J.Erhart: Piezoelektrické “chytré” materiály pro elektrotechniku, PZT keramika Elektro 11 (2002) 4-7
- [2] P.Půlpán, J.Erhart: Piezoelektrické transformátory, Elektro 01 (2006) 8-12
- [3] O.Stefan: Obrysové kmity kruhových keramických rezonátorů, Čs.čas.fyz. 20 (1970) 113-122
- [4] J.S. Yang, X. Zhang: Extensional vibration of a nonuniform piezoceramic rod and high voltage generation, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 16 (2002) 29–42
- [5] J. Zelenka: Piezoelektrické rezonátory a jejich použití, Academia Praha, 1983
- [6] www.americanpiezo.com

Příloha A - Frekvenční charakteristiky T100

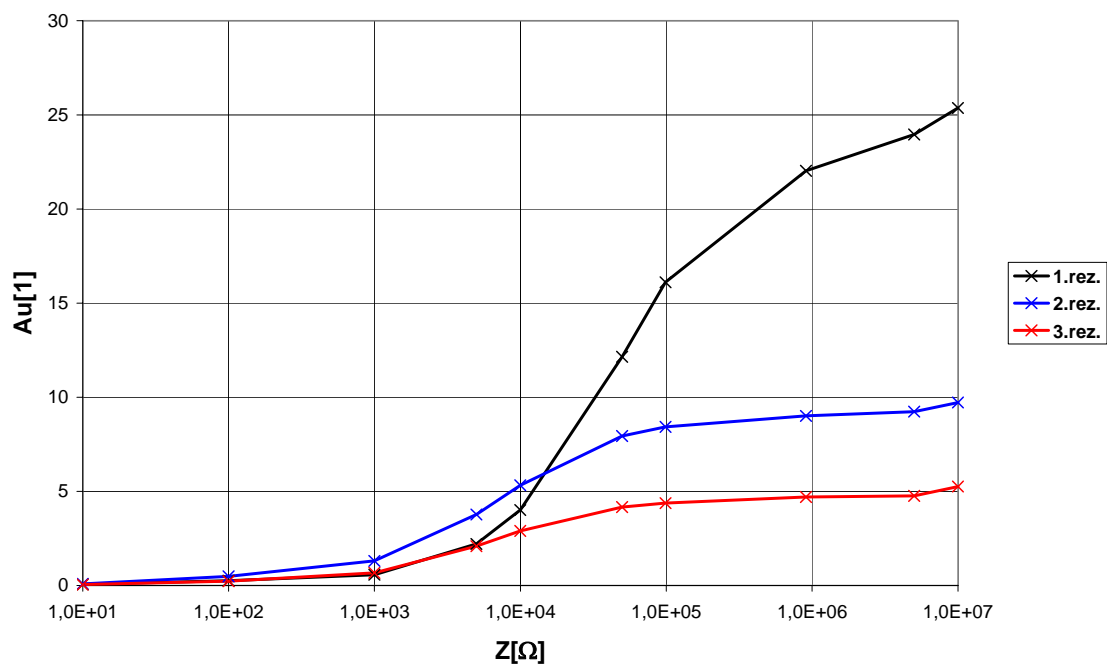
Spektrum transformátoru T100, $Z = 10 \text{ M}\Omega$ při amplitudě budícího signálu 1 V



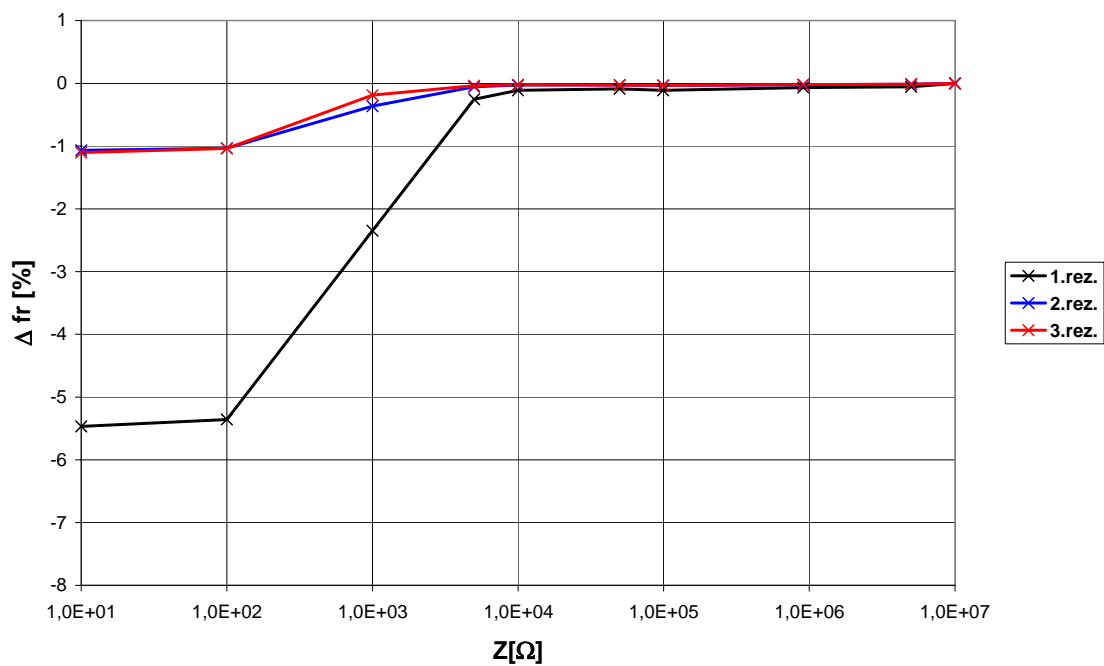
T100 – 1. rezonance pro různě zatížený výstupní obvod při amplitudě budícího signálu 1V



T100 – Napěťové zesílení v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V

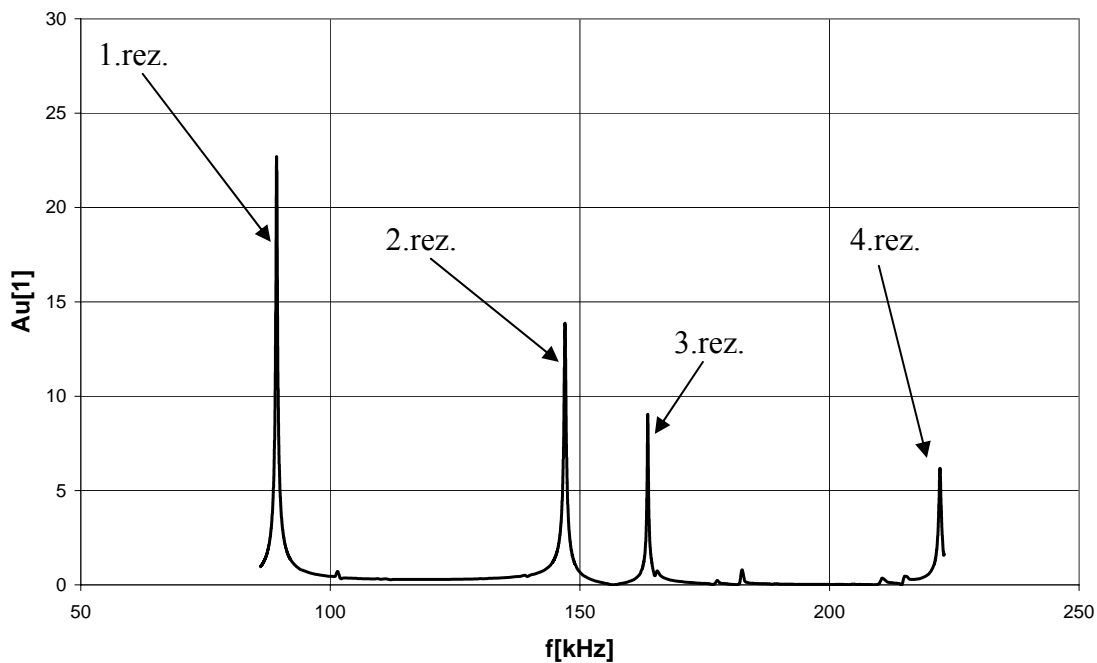


T100 – Relativní posun rezonančních frekvencí v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V

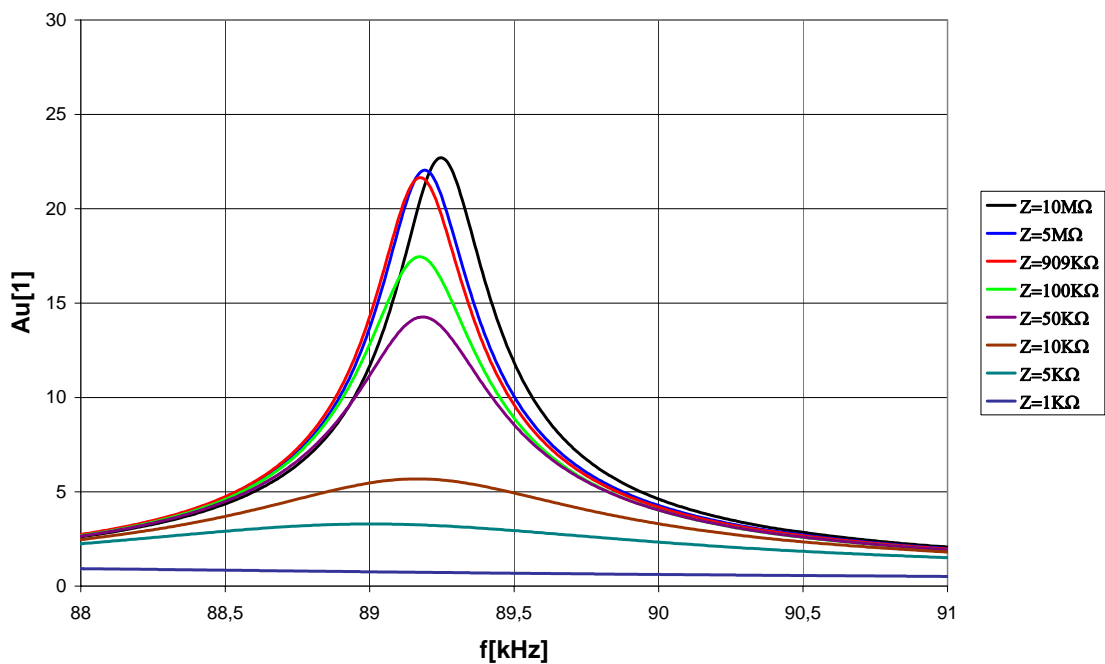


Příloha B - Frekvenční charakteristiky T150

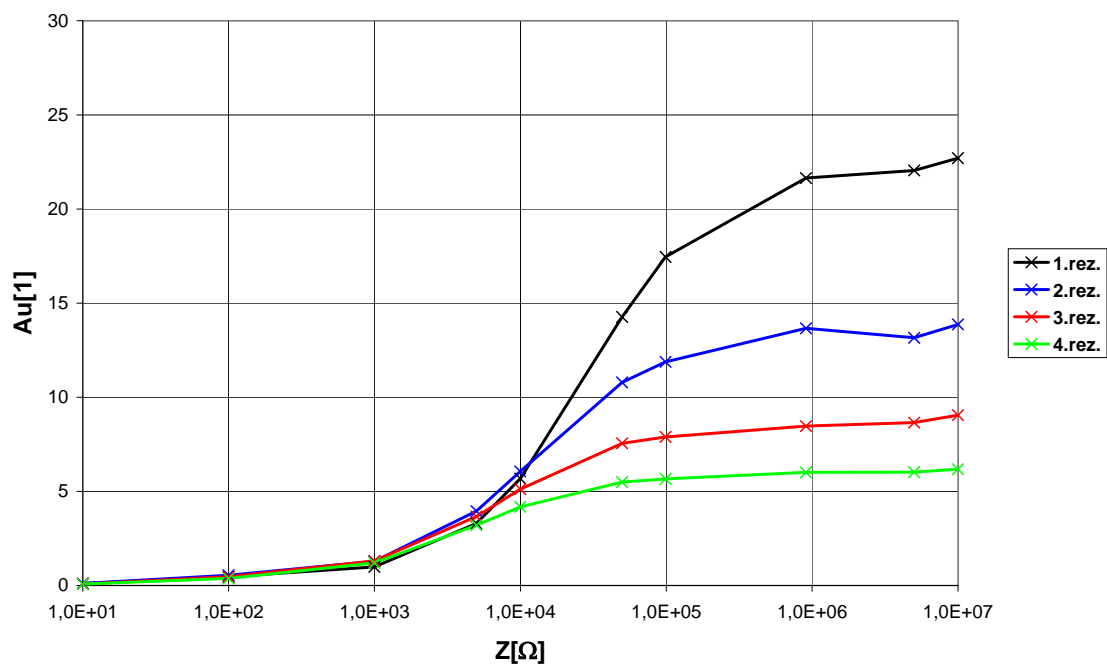
Spektrum transformátoru T150, $Z = 10\text{ M}\Omega$ při amplitudě budícího signálu 1 V



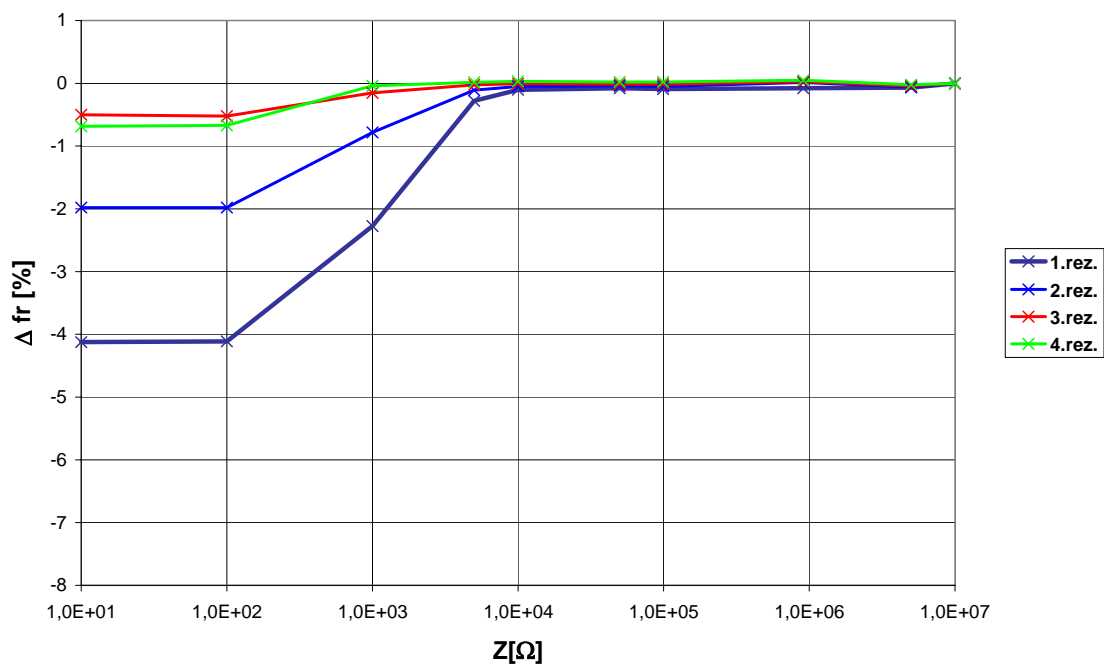
T150 – 1. rezonance pro různě zatížený výstupní obvod při amplitudě budícího signálu 1 V



T150 – Napěťové zesílení v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V

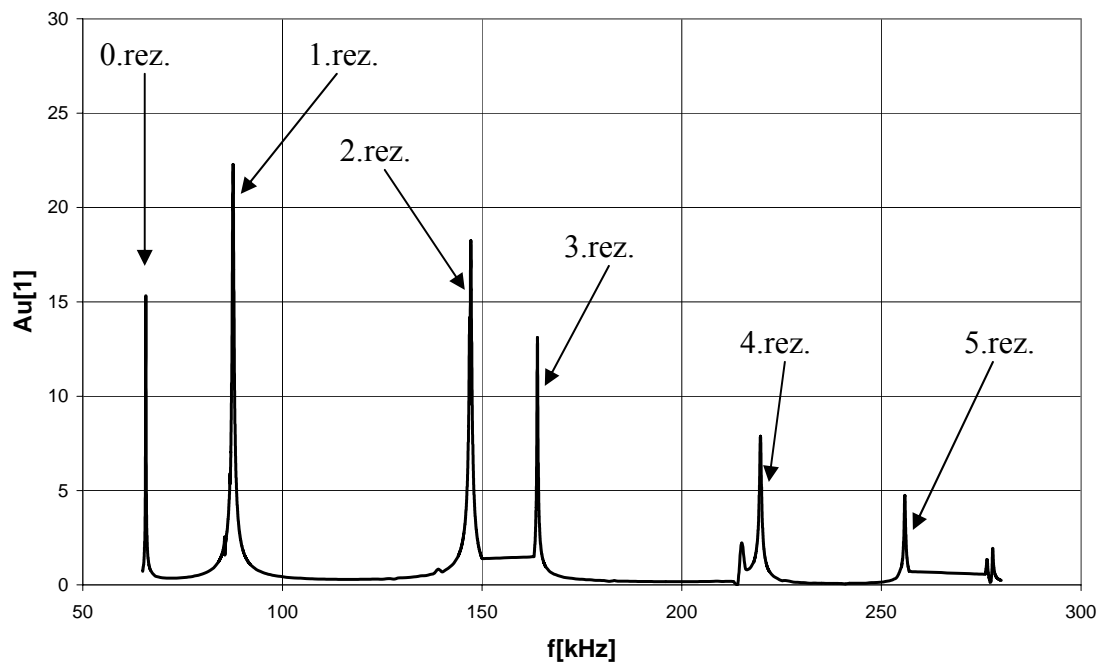


T150 - Relativní posun rezonančních frekvencí v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V

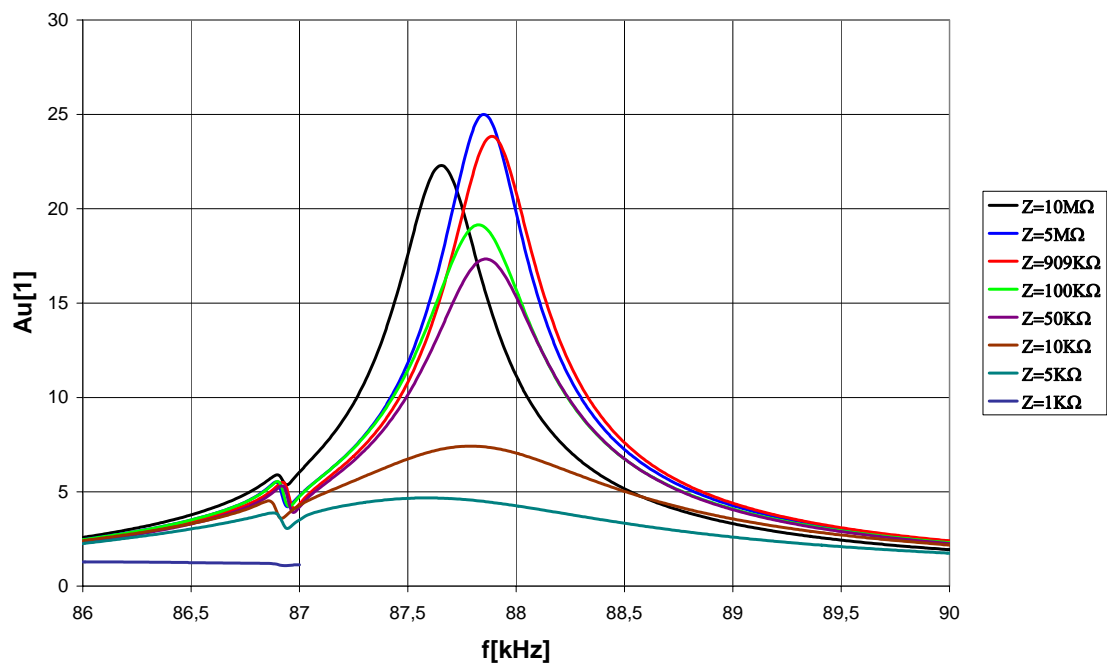


Příloha C - Frekvenční charakteristiky T180

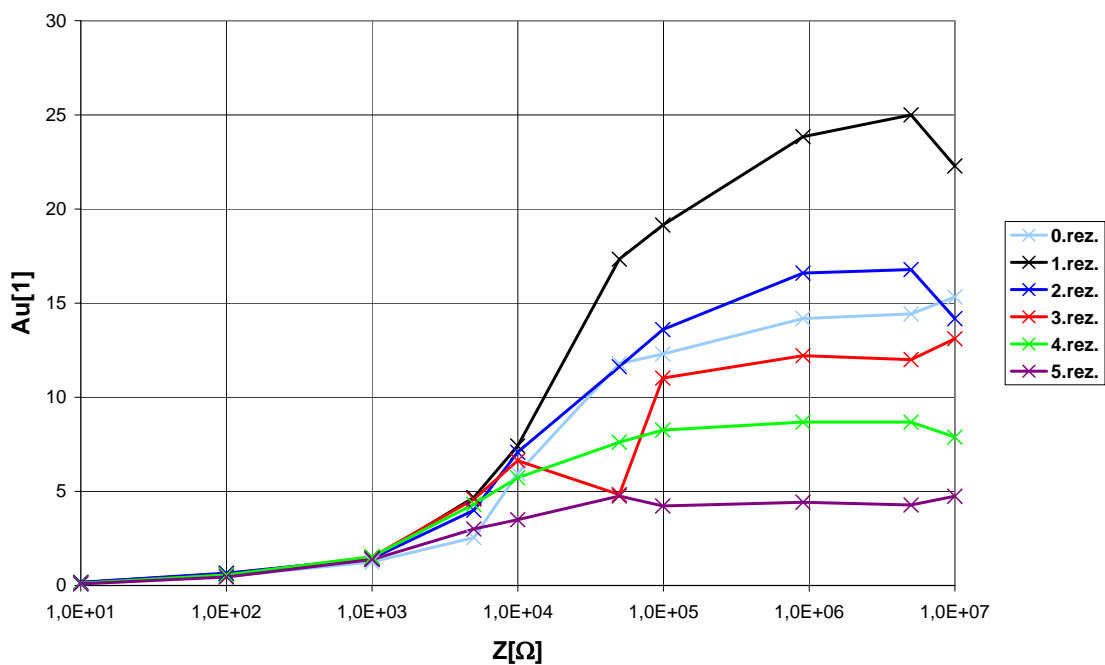
Spektrum transformátoru T180, $Z = 10\text{ M}\Omega$ při amplitudě budícího signálu 1 V



T180 – 1. rezonance pro různě zatížený výstupní obvod při amplitudě budícího signálu 1 V



T180 – Napěťové zesílení v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V



T180 – Relativní posun rezonančních frekvencí v závislosti na zatížení výstupního obvodu při amplitudě budícího signálu 1 V

