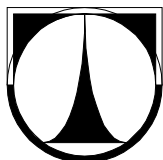


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Liberec 2007

Michal Podzimek

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

## **Návrh a realizace systému pro potlačení kmitání piezoelektrického ohybového aktuátoru**

**Design and realization of the system for controlling the vibrations  
of bending piezoelectric actuator**

### **Bakalářská práce**

<b>Autor:</b>	<b>Michal Podzimek</b>
<b>Vedoucí práce:</b>	<b>doc.Ing.Pavel Mokrý, Ph.D.</b>
<b>Konzultant :</b>	<b>Ing.Kateřina Nováková</b>

(Originální zadání práce)

V Liberci 3. 1. 2008

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užití své diplomové 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(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc.Ing.Pavlu Mokrému, Ph.D. za cenné připomínky a pomoc při tvorbě této práce. Dále také děkuji Ing.Kateřině Novákové za všechny užitečné rady . A v neposlední řadě děkuji svým rodičům za morální i finanční pomoc během celého mého studia.

## Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na systém semiaktivního tlumení vibrací který se skládá z piezoelektrického převodníku(aktuátor), vyrobeného ho z keramiky PZT a připojeného ke zpětnovazebnímu elektronickému obvodu s operačním zesilovačem. Elektronický obvod s operačním zesilovačem realizuje zápornou kapacitu a jeho funkcí je řídit elastické vlastnosti keramiky které lze popsat pomocí Youngova modulu. Citlivým nastavením zpětnovazebnímu obvodu lze dosáhnout poklesu efektivní dynamické hodnoty Youngova modulu. To v konečném důsledku znamená větší útlum přenosu vibrací skrz piezoelektrický materiál.

Cílem bakalářská práce je zjistit chování systému semiaktivního tlumení vibrací ve frekvenční oblasti pokrývající rezonanční frekvenci aktuátoru a zhodnotit jeho výsledky .

## Klíčová slova :

Piezoelektrický rezonátor

Semiaktivní tlumení vibrací

Obvod se zápornou kapacitou

## Anotation

This thesis is focused on a system for semiactive vibration. The system consists of a piezoelectric transducer made of PZT ceramics connected to a feedback electronics circuit with an operational amplifier. The feedback electronics circuit with an operational amplifier realizes negative capacity and its function is to control elastic properties described by Young's modulus. It is possible to achieve a reduction of the effective dynamic value of the Young's modulus by sensitive setting of the proper feedback circuit parameters. Finally, the transmission of vibrations through the piezoelectric actuator is markedly decreased.

The main objective of this thesis is to find out the form of the system for semiactive vibration in the frequency band covering the resonance frequency of the actuator and to strike a balance.

## Keywords:

Piezoelectric resonator

Semiactive vibration

Circuit realizing negative capacity

# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	9
<b>2. Teoretická část</b>	
2.1 Piezoelektrický jev.....	10
2.2 Lineární piezoelektrické stavové rovnice.....	10
2.3 Použití piezoelektrických materiálů v praxi.....	11
2.4 Materiály vhodné pro piezoelektrický jev.....	12
2.5 Ohybové aktuátory.....	12
2.6 Měření výchylky aktuátoru.....	14
2.7 Obvod se zápornou kapacitou.....	15
<b>3. Praktická část</b>	
3.1 Realizace a připojení obvodu se zápornou kapacitou na piezoelektrický element.....	18
3.2 Měření výchylky volného konce rezonátoru v oblasti rezonance včetně a bez obvodu se zápornou kapacitou.....	19
3.3 Porovnání numerických simulací s naměřenými výchylkami piezoelektrického bimorfu.....	22
3.3.1 Porovnání numerické simulace s naměřenými výchylkami piezoelektrického aktuátoru bez zapojeného obvodu se zápornou kapacitou.....	22
3.3.2 Porovnání numerické simulace s naměřenými výchylkami piezoelektrického aktuátoru včetně zapojeného obvodu se zápornou kapacitou.....	24
<b>Závěr</b>	
<b>Použitá literatura</b>	
<b>Seznam příloh</b>	
<b>Přílohy</b>	



# 1. Úvod

V současné době se v závislosti s čím dále více rozvíjející společností setkáváme také s rostoucí hlučností či vibracemi. Existují tři možnosti jak tyto hluky nebo vibrace tlumit.

Nejstarším způsobem je využití pasivních systémů potlačování vibrací. Tyto systémy používají mechanické součásti jako jsou pružiny, tlumiče nebo pryže za účelem mechanické izolace zdroje vibrací. Pasivní systémy jsou jistě cenově nejvýhodnější, ale jejich největším problémem je velká hmotnost a nedostačující tlumení hluku a vibrací v oblasti nízkých frekvencí.

Dalším způsobem jsou aktivní systémy tlumení vibrací. Jejich princip je založen na snímání vibrací senzorem a následném generování vibrací se stejnou amplitudou ale s opačnou fází než které potlačujeme pomocí aktuátoru. Piezoelektrický materiál se používá ať už jako senzor tak jako aktuátor. Celý proces tlumení vibrací zde obstarává řídicí elektronika. Mezi nevýhody tohoto způsobu tlumení vibrací stojí za zmínku hlavně velká náročnost na spotřebovanou energii, složitost elektroniky a v neposlední řadě také malá účinnost při potlačování nízkých frekvencí tlumení.

Posledním způsobem je tzv. semiaktivní způsob tlumení vibrací. Zde se využívá také piezoelektrického jevu, ale pomocí piezoelektrických aktuátorů mechanické vibrace zároveň detekujeme i budíme. Tento systém využívá přímý i nepřímý piezoelektrický jev ve stejném okamžiku. Pomocí připojeného externího obvodu se zápornou kapacitou na piezoelektrický vzorek se mění napětí na vzorku dle generovaného náboje vyvolaném mechanickým namáháním. Čímž se v podstatě řídí elastická tuhost piezoelektrického materiálu. Jako piezoelektrický materiál se díky velké hodnotě elektromechanického koeficientu  $k$  nejvíce používá PZT keramika. Mezi nesporné výhody těchto systémů patří jednoduché technologické provedení (tedy i výhodnější pořizovací cena), malá hmotnost, rychlá odezva a vysoká efektivnost.

Termín popisující schopnost systému přenést vibrace z jedné části na druhou je přenos vibrací. Při tlumení vibrací se snažíme aby se vibrace ze zdroje nepřenášely na další části, čili aby přenos nabýval co nejmenších hodnot.

Přenos vibrací je definován jako:  $T = |U_2 / U_1|$  (rce xy) (DP)

Značí se  $T$ , a je tedy poměrem výstupní ( $U_2$ ) a vstupní ( $U_1$ ) amplitudy vibrace.

Bakalářská práce je zaměřena na potlačování vibrací ve frekvenční oblasti pokrývající rezonanční frekvenci piezoelektrického bimorfu. Je nasnadě vysvětlit z jakých důvodů je tato bakalářská práce potřebná a proto se bude nutné i seznámit s pojmem rezonance.

Rezonance označuje jev, pozorovatelný při nuceném kmitání. Pokud je frekvence vnější budící síly nucených kmitů shodná s vlastními kmity oscilátoru, vhodná velikost i relativně malé budící síly může způsobovat velké změny v kmitajícím systému. Z tohoto důvodu je nutno tlumení vibrací v okolí rezonance věnovat větší pozornost.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část pojednává o piezoelektrickém jevu-jeho využití, o bimorfech jako takových a měření jejich výchylky a o obvodu se zápornou kapacitou. Praktická část seznamuje s návrhem obvodu se zápornou kapacitou, s výsledky měření výchylky rezonátoru v oblasti rezonance bez a včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou a obsahuje porovnání numerických simulací s naměřenými výchylkami piezoelektrického bimorfu.

## 2. Teoretická část

### 2.1 Piezoelektrický jev

Již v roce 1880 objevili a popsali bratři Curieové u monokrystalů turmalínu a později křemene piezoelektrický jev. U příslušných látek může docházet ke dvěma jevům. Příímým piezoelektrickým jevem je nazývána schopnost anizotropních látek vytvářet působením mechanické deformace (tahu, tlaku, ohybu nebo krutu) elektrické náboj. Zatímco u nepřímého piezoelektrického jevu dochází k mechanické deformaci způsobené přiloženým elektrickým nábojem.

Tento jev a zařízení používající ho se začali masově průmyslově využívat přibližně od poloviny 20.století kdy s rostoucím výzkumem v této oblasti úměrně narůstalo i jeho rozšíření použití v praxi.

Velice podobná piezoelektrickému jevu je elektrostrikce. V tomto jevu se působením elektrickému napětí krystal určitých látek mechanicky deformuje. Avšak jestliže závislost u piezoelektrického jevu je lineární(viz kapitola 2.2) u elektrostrikce je kvadratická.

V bakalářské práci bude použit aktuátor z tzv.PZT keramiky proto se zde stručně zmíním o způsobu úpravy tohoto materiálu na piezoelektrický. Piezoelektrina vzniká v látkách bez středu symetrie. Při teplotách nad Curieovou teplotou je PZT keramika v tzv. kubické fázi, má svůj střed symetrie a je paraelektrická. Elementární buňka ztrácí střed krystalické symetrie v tzv. tetragononální fázi, kdy dojde k poklesu teploty pod Curieovou teplotu a středové atomy se vychýlí ze své polohy. Vzniká elementární dipól. Veškeré buňky jejichž ionty se vychýlí zhruba totožným směrem vytvoří domény čímž se látka v podstatě stává feroelektrickou. V piezoelektrickou látku se ale stává až po zpolarizování. K polarizaci dochází po vložení látky do silného elektrického pole. Doménové struktury látky se mění tak, aby se polární osy krystalů nelišili od směru symetrie tohoto elektrického pole. I když zbytková polarizace po vypnutí elektrického pole je nepatrně vychýlena nastává změna izotopní struktury v anizotropní a látku je možno považovat za piezoelektrickou.

### 2.2 Lineární piezoelektrické stavové rovnice

Piezoelektrický jev lze kvantitativně popsat dvěma dvojicemi veličin. První dvojice jsou mechanické veličiny – jsou to složky tenzoru deformace  $S_{kl}$  ( $k,l = 1,2,3$ ) a tenzoru napětí  $T_{ij}$  ( $i,j = 1,2,3$ ). Druhá dvojice veličin jsou veličiny elektrické, a to složky vektoru elektrického pole  $E_j$  ( $j=1,2,3$ ) a složky vektoru elektrického posunutí  $D_i$  ( $i = 1,2,3$ ). Vzájemnou souvislost všech čtyř veličin vyjadřují tyto rovnice:

$$T_\lambda = c_{\lambda\mu} S_\mu \quad (\lambda, \mu = 1, 2, \dots, 6) \quad (1.1)$$

$$S_\lambda = s_{\lambda\mu} T_\mu \quad (\lambda, \mu = 1, 2, \dots, 6) \quad (1.2)$$

$$D_i = \varepsilon_{ij} E_j \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.3)$$

$$E_i = \beta_{ij} D_j \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.4)$$

Rovnice (1.1) a (1.2) nazýváme zobecněným hookovým zákonem. (elementární Hookův zákon v podstatě říká že deformace materiálu je úměrná napětí materiálu). Mechanické vlastnosti látek charakterizují buď elastické moduly  $c_{ijkl}$  nebo koeficienty  $s_{ijkl}$ . Elektrické vlastnosti jsou dány permitivitou  $\epsilon_{ij}$  nebo impermitivitou  $\beta_{ij}$ . Permitivita  $\epsilon_{ij}$  je součin relativní permitivity  $\epsilon_r$  a permitivity vakua  $\epsilon_0$ . Veškeré uvedené veličiny spojují čtyři soustavy *lineárních piezoelektrických stavových rovnic* [3] popisující přímý a nepřímý piezoelektrický jev.

$$T_\lambda = c_{\lambda\mu}^E S_\mu - e_{i\lambda} E_j \quad (1.5)$$

$$D_i = e_{i\mu} S_\mu + \epsilon_{ij}^S E_j \quad , \quad (1.6)$$

$$T_\lambda = c_{\lambda\mu}^D S_\mu - h_{i\lambda} D_j \quad (1.7)$$

$$E_i = -h_{i\mu} S_\mu + \beta_{ij}^S D_j \quad , \quad (1.8)$$

$$S_\lambda = s_{\lambda\mu}^E T_\mu + d_{i\lambda} E_j \quad (1.9)$$

$$D_i = d_{i\mu} T_\mu + \epsilon_{ij}^T E_j \quad , \quad (1.10)$$

$$S_\lambda = s_{\lambda\mu}^D T_\mu + g_{i\lambda} D_j \quad (1.11)$$

$$E_i = -g_{i\mu} T_\mu + \beta_{ij}^T D_j \quad , \quad (1.12)$$

kde  $\lambda, \mu = 1, 2, \dots, 6$  a  $i, j = 1, 2, 3$

Piezoelektrické koeficienty  $d_{j\lambda}$  či  $g_{j\lambda}$  nebo piezoelektrické moduly  $e_{j\lambda}$  či  $h_{j\lambda}$  charakterizují piezoelektrické vlastnosti. První indexy u těchto koeficientů určují směr působícího elektrického pole a druhý, podle toho zda jde o přímý či nepřímý piezoelektrický jev, směr vyvolané deformace ( $\lambda = 1, 2, 3$ ), rovinu stříhu ( $\lambda = 4, 5, 6$ ), či směr působícího mechanického napětí na rovinu, v níž toto napětí působí.

### 2.3 Použití piezoelektrických materiálů v praxi

V současné době se můžeme s využitím piezoelektrického jevu setkat v těchto odvětvích:

- v radioelektronice, kde se využívají rezonátory jako filtry či ve zpozdřovacích linkách.
- v lékařství v ultrazvukových sondách či tomografech.
- v optice pro realizaci jemných posunů (fotoaparáty).
- v automobilovém průmyslu (jako parkovací a nárazová čidla, nebo pro zapalování zážehových spalovacích motorů).

- ve sportu-konkrétně ve sjezdovém lyžování kde se pomocí piezoelektrického akčního členu podle laboratorních výsledků dosáhne až 50x zvětšit tlumení lyží.
- v aktivním potlačení vibrací a hluku kde je obrovskou výhodou současné použití jako senzoru a aktuátoru.
- ve výrobě snímačů do hudebních nástrojů(zejména kytarových)

Obligátní je použití v zapalovačích, které piezoelektrický efekt proslavilo a v podstatě dostalo do povědomí mnoha lidí. Dalšími oblastmi by byla ještě celá řada.

## 2.4 Materiály vhodné pro piezoelektrický jev

Piezoelektrické látky jsou bez výjimky pevné látky. Jak již bylo řečeno piezoelektrina vzniká pouze v látkách bez středu symetrie. Pro tuto podmínku je z krystalických materiálů které lze podle jejich krystalografické symetrie obecně rozdělit do 32 krystalových tříd pouze 20 tříd piezoelektrických. Při poklesu teploty materiálu pod Curieovu teplotu a zároveň vhodnou polarizací realizovanou působením silného elektrického pole nebo působením mechanického napětí lze pozorovat přímý piezoelektrický jev. Po působení elektrického pole a následné změně tvaru piezo-vzorku i piezoelektrický jev nepřímý.

Asi nejpoužívanějším monokrystalem je křemen( $\text{SiO}_2$ ). Pro vyšší elektromechanický faktor se ve zpoždovacích linkách nahrazuje křemen niobičnanem lithným ( $\text{LiNbO}_3$ ) nebo tantaličnanem lithným ( $\text{LiTaO}_3$ ).

Mezi keramikou dosahuje největšího použití tzv. PZT keramika, což je materiál na bázi tuhých roztoků oxidů olova (Pb), zirkonu (Zr) a titanu (Ti) čili  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ . Jako snímač do prostředí s vysokými tlaky a teplotami je hojně využíván fosforečnan galičitý ( $\text{GaPo}_4$ ). Materiálová vlastnost jednotlivých látek je určující pro jeho další praktické použití. Výjimkou není ani ohybový aktuátor s nímž je v této bakalářské práci provedeno měření.

## 2.5 Ohybové aktuátory

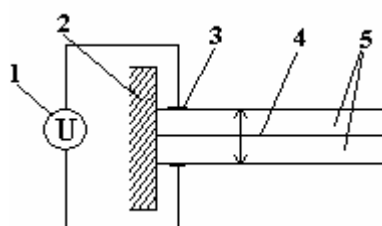
Nejčastěji používanými typy aktuátorů jsou tzv. ohybové kompozitní struktury. Ohybové kompozitní struktury nejsou nic jiného než piezoelektrické látky vybroušené do tvaru destiček nebo tyčinek osazené dvěma či více elektrodami. Celá podstata použití aktuátorů spočívá v jejich trvalém upevnění a deformaci v důsledku připojeného harmonického napětí na elektrody.

Ohybové aktuátory můžeme rozdělit do tří skupin:

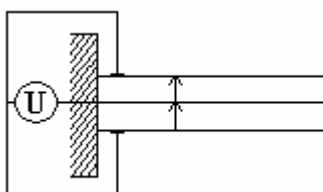
- bimorfy
- uniformy
- polyformy

V bakalářské práci je použit bimorf a proto se v následujícím odstavci bude širěji pojednávat právě o něm.

Bimorf se skládá se dvou vrstev piezoelektrického materiálu. Dle způsobu polarizace jednotlivých vrstev jsou bimorfy sériové a paralelní. Sériové bimorfy mají vrstvy polarizované antiparalelně tak, že elektrické pole připojené v jedné polaritě prochází celou strukturou materiálu. Tímto zapojením bimorfu dochází vzhledem k neutrální ose u obou vrstev bimorfu k opačnému mechanickému napětí. Jedna strana bimorfu je v tlaku a druhá v tahu. Paralelní bimorfy jsou polarizovány paralelně a jsou realizovány tak, že neutrální osa je zapojena na jeden elektrický pól a obě vnější strany bimorfu jsou připojeny na opačný elektrický pól zdroje. U paralelních bimorfů lze oproti sériovým pozorovat při stejném napětí budícího zdroje dvojnásobnou výchylku. To je způsobeno tím že v paralelních bimorfech se důsledkem zapojení vytváří dvojnásobné elektrické pole. V bakalářské práci je použito sériové zapojení bimorfu, postačující pro naše potřeby měření.



Obr 1-1: *Sériové zapojení bimorfu. V obrázku jsou čísla naznačeny části obvodu zapojení bimorfu kde jsou: 1 - zdroj harmonického napětí, 2 – pevné uchycení, 3 – elektrody piezoelektrického materiálu bimorfu, 4 - střední neutrální osa(nebo-li střední kovová osa-viz dále) 5 - obě vrstvy bimorfu*



Obr 1-2 : *Paralelní zapojení bimorfu*

Střední neutrální osa(kovová elektroda) je jenom kovový pásek umístěný mezi obě vrstvy. Tento kovový pásek zvyšuje odolnost vůči mechanickému poškození, pracuje jako pružina a také zvyšuje výchylku bimorfu. Elektrody piezoelektrického materiálu bimorfu jsou uhlíkové a povrch bimorfu je izolován speciálním ochranným lakem.

Rezonanční frekvence bimorfu lze počítat dle vzorce [2]:

$$f_R = 0,161 \frac{2h}{L^2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E}} \quad (1.13)$$

kde

$L$  je volná délka bimorfu,

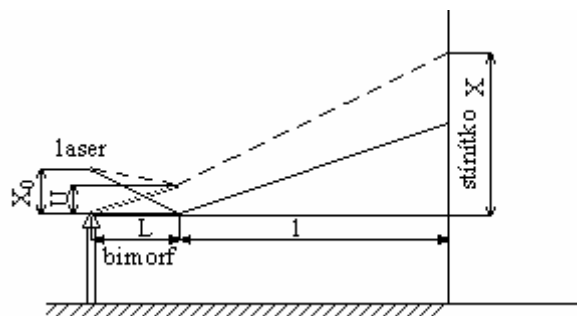
$h$  tloušťka keramické vrstvy,

$\rho$  hustota keramiky a  $s$  je koeficient čili elastická konstanta .

## 2.6 Měření výchylky aktuátoru

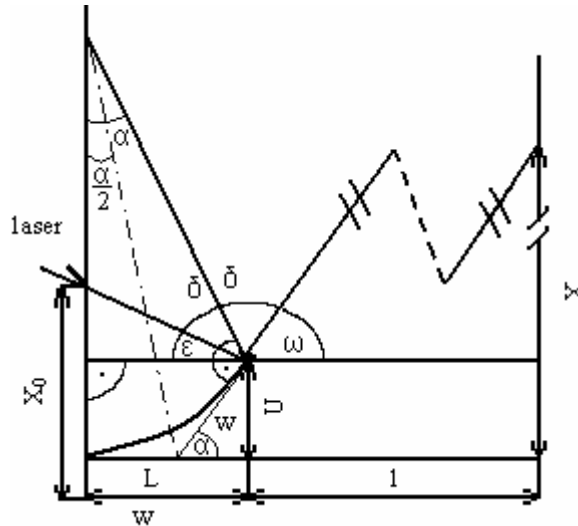
Celý princip tohoto měření spočívá v tom, že na volném konci aktuátoru je přilepeno malé zrcátko které je osvětleno laserem. Při buzení aktuátoru harmonickým sinusovým napětím dochází k jeho ohybu a tedy i změně polohy zrcátka. Na stínítku můžeme díky odrazu pozorovat stopu odražených paprsků které mají stejnou frekvenci jako aktuátor. Při nastavení rezonanční frekvence aktuátoru se rozkmit na stínítku výrazně zvětšil.

Aktuátor je buzen frekvenčním generátorem o amplitudě 10 V a v rozmezí frekvencí 35 až 66Hz. Vzhledem k rezonanční frekvenci aktuátoru 49,7Hz nás ovšem zajímaly přesné hodnoty výchylky aktuátoru v bezprostředním okolí této frekvence. Úkolem tohoto měření je zjistit a vyhodnotit hodnoty výchylky aktuátoru bez a včetně zapojeného obvodu se zápornou kapacitou.



*Obr. 1-3: Soustava pro měření výchylky aktuátoru (na obrázku je patrná změna polohy odraženého paprsku laseru na stínítku při ohybu aktuátoru)*

Přehlednější znázornění úhlů a jednotlivých velikostí je uvedeno na obr 1-4. Celkovou výchylku  $u$  budeme vyjadřovat v následujících výpočtech právě z těchto hodnot.



Obr. 1-4: Soustava pro měření výchylky včetně znázorněných úhlů (z důvodu vhodnějšího znázornění v tomto obrázku nejsou všechny délky v reálném poměru svých velikostí)

Výpočty z kterých jsem vycházel při určování vzorce pro výchylky bimorfu jsou následující[8]:

$$\frac{\pi}{2} = \alpha + \varepsilon + \delta \quad ;$$

$$\pi = \varepsilon + 2\delta + \omega \quad ;$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{x_0}{1} \quad ;$$

$$\omega = \operatorname{arctg} \frac{x}{1} \quad ;$$

$$\omega = w \sin \lambda$$

$$w = r \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}$$

$$r = \frac{l}{\lambda}$$

$$u = L * \frac{\operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}}{\lambda} * \sin \lambda \quad ;$$

kde

$$u = \frac{2L}{\lambda} * \sin 2 \frac{\lambda}{2} \quad (1.14)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} * (\operatorname{arctg} \frac{x}{1} - \operatorname{arctg} \frac{x_0}{L}) \quad (1.15)$$

Jelikož volný konec bimorfu při měření měnil především svou vertikální polohu, je zřejmé že na stínítku se objevovala čára jejíž vrchol byl označen jako X2 a spodní konec jako X1. Pro tyto obě velikosti byl spočítány výchylky  $u_2$  a  $u_1$  dle 1.14. Celková výchylka  $u$  pak byla rovna polovině rozdílu těchto hodnot.

## 2.7 Obvod se zápornou kapacitou

Obvod se zápornou kapacitou byl zkonstruován z důvodu potřeby řízení elastické tuhosti (Youngova modulu) piezoelektrického materiálu.

Potřeba dvou pracovních módů (zvětšování či zmenšování elastické tuhosti) obvodu se zápornou kapacitou vedla k vytvoření dvou typů obvodu :

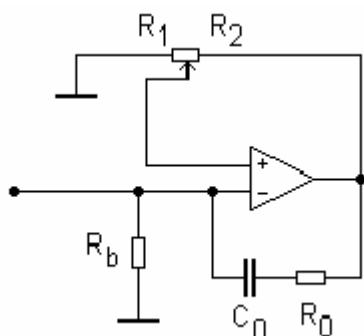
- obvod typu „S” (softening)
- obvod typu „H” (harding)

Obvod „H” je používán pro zvyšování Youngova modulu v systémech potlačování vibrací. Můžeme říci, že po připojení „H” obvodu se piezoelektrický materiál „ztvrdí”. Obvod „H” je stabilní ve stavu  $C/C_s > -1+k^2$ . Kde  $C$  je externí kapacita obvodu,  $C_s$  je kapacita piezoelektrického aktuátoru a  $k$  je koeficient elektromechanické vazby ( $0 < k < 1$ ).

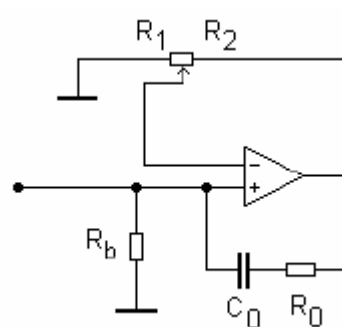
Pomocí obvodu „S” dosáhneme snižování Youngova modulu (piezoelektrický materiál se „změkčí”). Tento obvod je stabilní při  $C/C_s < -1$ .

V použití obou obvodů to znamená výrazné zvýšení, resp. snížení Youngova modulu (zhruba 20x).

Kapacita obou obvodů je charakterizována vztahem  $C = -C_0 \cdot R_2/R_1$  (DP)



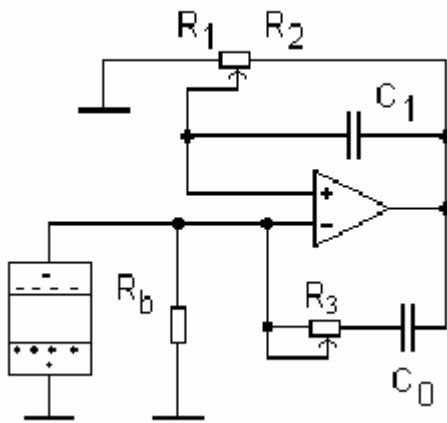
Obr. 1-5: Obvod se zápornou kapacitou typu „S”



Obr. 1-6: Obvod se zápornou kapacitou typu „H”

Při výkladu principu použití obvodu se zápornou kapacitou si musíme uvědomit, že zmíněný obvod je vůči piezoelektrickému vzorku v podstatě externí kapacita. Vibrace, jež chceme tlumit, jsou mechanické napětí. A působením tohoto mechanického napětí na piezoelektrický vzorek se na jeho elektrodách objeví náboj  $Q$ . Tento náboj je přiveden do externí kapacity, která se nabije čímž mezi jejími elektrodami vznikne elektrické napětí  $U = -Q/C$ . Napětí  $U$  je přivedeno zpět na elektrody piezoelektrického vzorku, vyvolávající díky nepřímému piezoelektrickému jevu mechanickou deformaci. Tato mechanická deformace se sečte s deformací vzniklou přiloženým mechanickým napětím. Když je obvod se zápornou kapacitou vhodně naladěn, dochází tedy k tlumení vibrací. Na obrázku 1-7 je znázorněn obvod se zápornou kapacitou typu „H” včetně zapojeného piezoelektrického elementu.





*Obr. 1-7: Obvod se zápornou kapacitou typu „H” včetně zapojeného piezoelektrického elementu*

### 3. Praktická část

V této části práce je podrobněji pojednáno o jednotlivých součástkách obvodu se zápornou kapacitou včetně jejich účelu a o použitých měřicích přístrojích (viz kap.3.1). Dále o výsledcích měření výchylky rezonátoru v oblasti rezonance s a bez obvodu se zápornou kapacitou a to v kapitole 3.2. V kapitole 3.3 následuje porovnání numerické simulací s naměřenými výchylkami piezoelektrického bimorfu.

#### 3.1 Realizace a připojení obvodu na piezoelektrický element

Na Obrázku 1-7 je znázorněn obvod se zápornou kapacitou typu „H” připojený na piezoelektrický element. Funkci celého obvodu lze velmi ovlivnit výběrem jednotlivých součástek v obvodu. Pro pořízení celého obvodu je také určující jeho dostupnost, což pro relativní lehkou dostupnost jednotlivých součástek ve výsledku znamenalo i jednoduché pořízení celého obvodu.

Obvod byl realizován na nepájivém poli EIC-104. Klíčovou součástkou obvodu se zápornou kapacitou je operační zesilovač. Ze široké škály vyráběných operačních zesilovačů byl vybrán LF 356 od firmy Texas Instruments

Kondenzátor  $C_0$  je referenční kondenzátor. Kondenzátor  $C_1$  je v obvodu za účelem potlačení šumu zesilovače. Kromě odporu  $R_b$  jsou všechny zapojené odpory 25 otáčkové-tzv.trimry. Odpor  $R_b$  má hodnotu  $5M\Omega$  a je zapojen paralelně k piezoelektrickému aktuátoru, ten je pak přiveden na invertující vstup operačního zesilovače. K ladění fáze vysílaného signálu na aktuátor je určen Odpor  $R_3$  s hodnotou  $100\Omega$ . Pro zvyšování amplitudy signálu z obvodu negativní kapacity je určen odpor  $R_2$  a má hodnotu  $100k\Omega$ .



Obr. 1-8: Použité trimry v zapojení

Obvod se zápornou kapacitou je napájen duálním napájením  $+15V$  a  $-15V$  stejnosměrných, tedy nejčastěji používaným napájením u operačních zesilovačů. Napájení realizuje laboratorní zdroj HY3005D-2 od firmy Mastech znázorněn na obr.1-9.



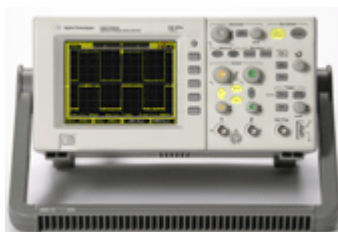
Obr. 1-9: Použitý zdroj v zapojení

Piezoelektrický element je buzen frekvenčním generátorem HP 33120A (na obr. 1-10) s amplitudou 10V a v rozmezí frekvencí 35-66 Hz. Z hlediska rezonanční frekvence aktuátoru 49,7Hz nás bude podrobněji zajímat chování obvodu se zápornou kapacitou v bezprostřední okolí této hodnoty.



*Obr. 1-10: Použitý frekvenční generátor v zapojení*

Pomocí osciloskopu DS0306A (viz obr.1-11) od firmy Agilent technologies jsem postupně ladil obvod. Na první vstupní kanál osciloskopu jsem přivedl signál kterým budíme z frekvenčního generátoru piezoelektrický element. Do druhého kanálu sondu jsem pomocí sondy přivedl signál z piezoelektrického elementu. Dále zbývalo jen naladit obvod se zápornou kapacitou tak, aby byli oba signály v opačné fázi a s co nejmenším rozdílem amplitudy. Největší amplitudové zesílení obvodu se zápornou kapacitou se nacházelo na hraně stability a proto bylo obtížné udržet obvod stabilní za současné co největší možné amplitudy ovládaného signálu.



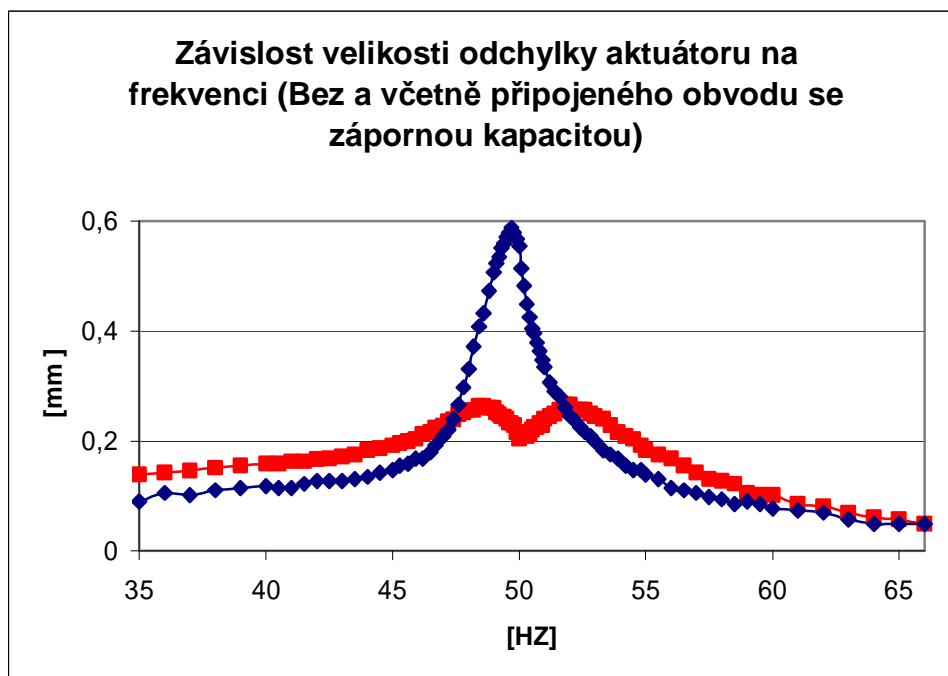
*Obr. 1-11: Použitý osciloskopp DS0306A*

### 3.2 Měření výchylky volného konce rezonátoru v oblasti rezonance včetně a bez obvodu se zápornou kapacitou

Měření jsme provedli dle kapitoly 2.6. Nejprve byla proměřena závislost velikosti odchylky volného konce rezonátoru na frekvenci bez zapojeného obvodu se zápornou kapacitou. Na *obr.1-12* je tato závislost znázorněna modrou barvou a je patrné že při rezonanci piezoelektrického rezonátoru a v bezprostředním okolí rezonance docházelo k největším odchylkám. Maximální odchylka na volném konci, téměř 1,16 mm, nastala při rezonanční frekvenci 49,7Hz.

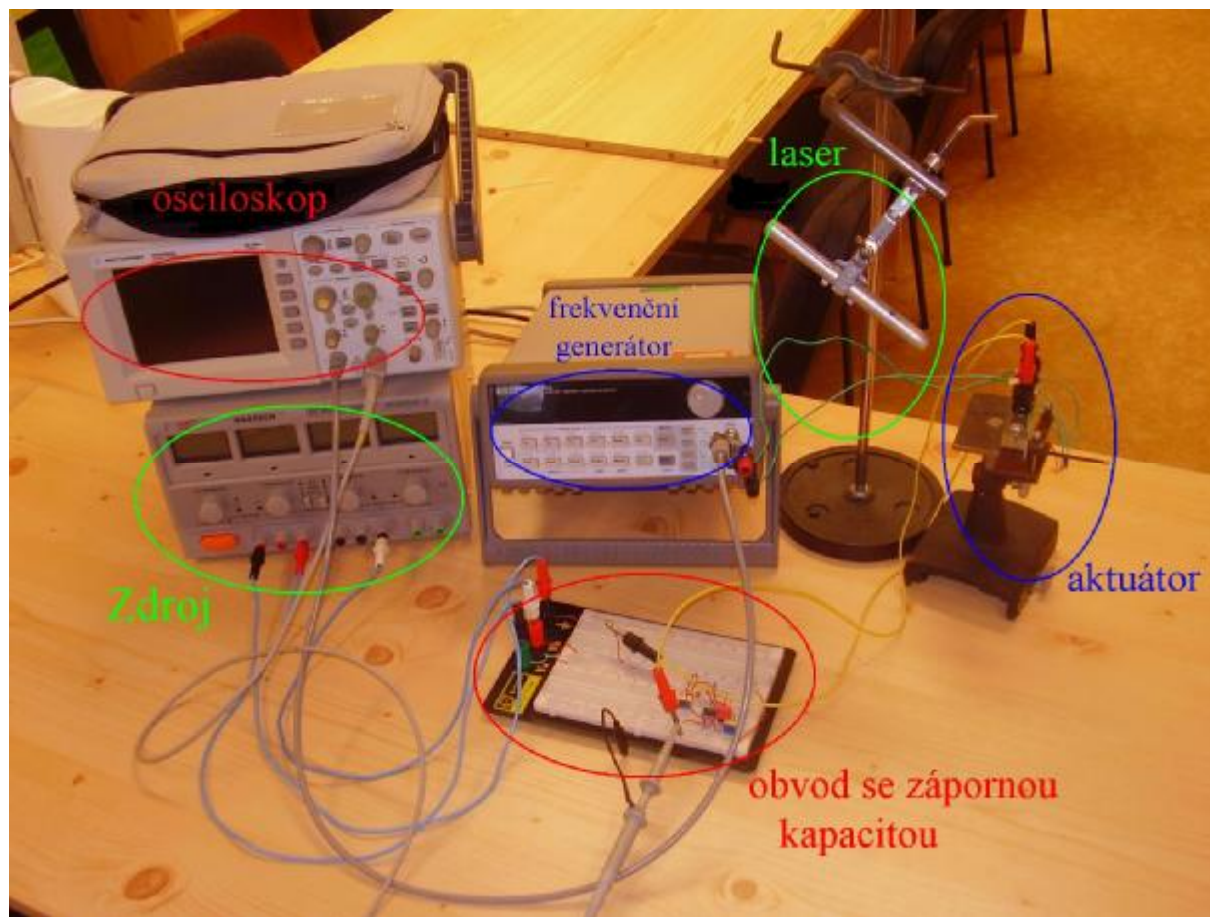
Po zapojení obvodu se zápornou kapacitou na piezoelektrický rezonátor jsme při rezonanční frekvenci 49,7Hz dosahovali odchylky 0,46mm. Tato odchylka dosahuje nejmenší hodnoty z důvodu naladění obvodu se zápornou kapacitou právě na tuto rezonanční frekvenci.

Závislost velikosti odchytky volného konce rezonátoru včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou je znázorněna na *obr.1-12* červenou barvou.



*Obr. 1-12: Graf závislosti odchytky volného konce aktuátoru na frekvenci*

Jak již bylo v kapitole 2.7 řečeno, obvod se zápornou kapacitou je vzhledem k piezoelektrickému aktuátoru externí kapacita. Pokud označíme kapacitu piezoelektrického aktuátoru  $C_s$  a kapacitu zpětnovazebního obvodu  $C$ , pak naší snahou je dosáhnout rovnosti mezi těmito kapacitami, tedy aby platilo že  $C_s = C$ . Tuto rovnost lze vyjádřit také pomocí poměru  $\alpha = C / C_s$  a hodnota tohoto poměru by měla v ideálním případě dosahovat hodnoty  $\alpha = -1$ . Jelikož kapacity  $C$  i  $C_s$  jsou komplexní čísla pak i poměr  $\alpha$  musí být komplexní číslo. Piezoelektrický aktuátor stejně jako zpětnovazební obvod jsou frekvenčně závislé. Díky různým materiálovým vlastnostem piezoelektrického aktuátoru a zpětnovazebního kondenzátoru  $C_0$  s odporem  $R_3$  mají tyto obě kapacity i odlišnou frekvenční závislost. Z těchto důvodů je možné po naladění obvodu se zápornou kapacitou dosáhnout  $\alpha$  která se co nejvíce blíží hodnotě  $-1$ , jen pro jednu frekvenci. Na *Obr. 1-12* lze pozorovat, že při naladění obvodu se zápornou kapacitou na rezonanční frekvenci jsme dosáhli také největšího potlačení vibrací. S rostoucí odlišností od této frekvence se zvyšovala také různost komplexních čísel kapacit  $C$  a  $C_s$  a tedy i poměr  $\alpha$  se vzdaloval hodnotě  $-1$  a ve výsledku to znamenalo menší potlačení vibrací.

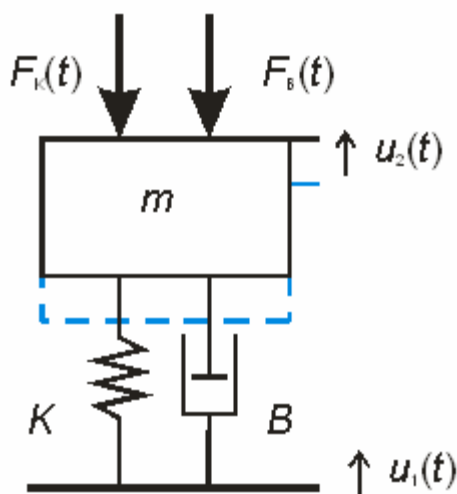


*Obr. 1-13: Fotografie soustavy měření s obvodem se zápornou kapacitou*

### 3.3 Porovnání numerické simulace s naměřenými výchylkami piezoelektrického bimorfu

Cílem numerické simulace je nejprve spočítat a nasimulovat chování piezoelektrického aktuátoru dle teoretických znalostí a výpočtů. Zobrazit závislost výchylky volného konce aktuátoru na frekvenci a tu porovnat s hodnotami a posléze závislostí námi naměřenou.

V numerické simulaci jsme považovali piezoelektrický aktuátor jako těleso o hmotnosti  $m$  na pružině a tlumiči.



Obr. 1-14: Dynamický model tělesa  $m$  na tlumeném pružném závěsu

Vibrace představují budící harmonický signál lze vyjádřit jako  $u_1(t) = U_1 e^{j\omega t}$ , zatímco těleso o hmotnosti  $m$  se pohybuje harmonickým pohybem charakterizovaným vzorcem  $u_2(t) = U_2 e^{j\omega t}$ .

#### 3.3.1 Porovnání numerické simulace s naměřenými výchylkami piezoelektrického aktuátoru bez zapojeného obvodu se zápornou kapacitou

Vztah pro přenos celé soustavy je:

$$Tr = \sqrt{\frac{K^2 + (B\omega)^2}{(B\omega)^2 + (K - m\omega^2)^2}} \quad (1.16)$$

kde  $B$  charakterizuje koeficient tlumení tlumiče a  $k$  koeficient tuhosti pružiny.

Přenos vibrací je obecně definován jako poměr signálu přeneseného a signálu budícího, bude tedy přenos  $Tr = |U_2 / U_1|$ . Po dosazení do rovnice 1.16 vyjde vztah následující:

$$|U2| = |U1| * \sqrt{\frac{K^2 + (B\omega)^2}{(B\omega)^2 + (K - m\omega)^2}} \quad (1.17)$$

Budící signál  $U1$  je součin piezoelektrické konstanty  $d$  a hodnoty napájecího napětí  $V$ . Je tedy  $U1 = d * V$

Vztah pro naměřenou hodnotu přeneseného signálu  $U2$  bude:

$$|U2| = d * V * \sqrt{\frac{K^2 + (B\omega)^2}{(B\omega)^2 + (K - m\omega)^2}} \quad (1.18)$$

Mechanická rezonance nastává při splnění podmínky  $K - m\omega^2 = 0$ , a z tohoto bude vztah pro mechanickou rezonanci roven odmocnině poměru  $k$  a hmotnosti  $m$ :

$$\omega r = \sqrt{\frac{K}{m}} \Rightarrow m = \frac{K}{\omega r^2} \quad (1.19)$$

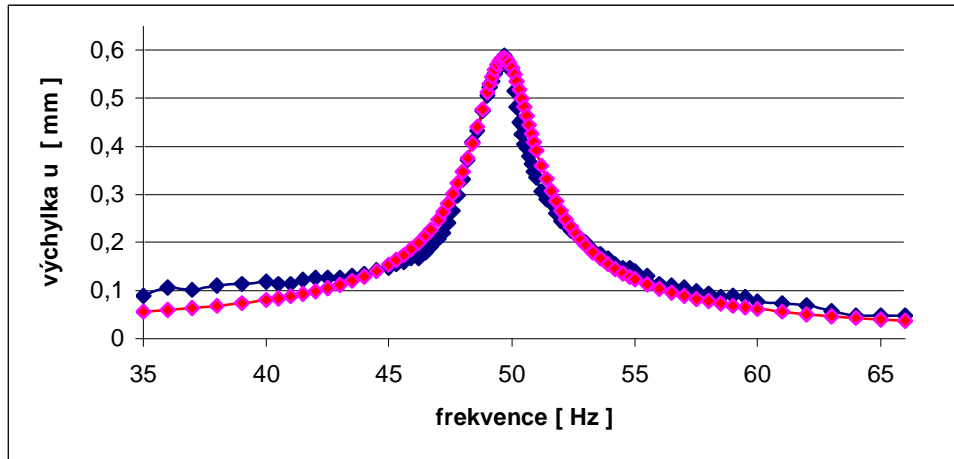
Výsledek pro hmotnost ze vztahu 1.19 dosadíme do 1.18 a vyjde:

$$u = d * V * \sqrt{\frac{K^2 + (B\omega)^2}{(B\omega)^2 + \left(K - K \left(\frac{\omega}{\omega r}\right)^2\right)^2}} \quad (1.20)$$

Ve zlomku pod odmocninou můžeme zkrátit  $K^2$ , čímž výsledný vztah pro výchylku volného konce piezoelektrického aktuátoru bude:

$$u = d * V * \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{B}{K}\right)^2 * \omega^2}{\left(\frac{B}{K}\right)^2 * \omega^2 + \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega r}\right)^2\right)^2}} \quad (1.21)$$

Fitováním bylo docíleno že piezoelektrická konstanta  $d = 0,00016$ , koeficient tlumení tlumiče  $B = 0,0028$  a tuhost bimorfu představující v simulaci koeficient tuhosti pružiny je  $K = 17,85$ .



Obr. 1-15: Graf znázorňující frekvenční závislost výchylky volného konce piezoelektrického aktuátoru  $u$  z naměřených hodnot z hodnot vypočtených

Na obr. 1-15 je vyobrazena závislost výchylky volného konce piezoelektrického aktuátoru na frekvenci budícího signálu. Modrou barvou je znázorněna závislost z hodnot naměřených (dle kapitoly 2.6). Zatímco červená křivka je výsledkem dosazením do vztahu 1.21 a tedy výsledkem numerické simulace.

Z obr. 1-15 je patrné, že shoda hodnot naměřených a vypočtených je téměř stoprocentní a můžeme tedy zvolený postup a jeho výsledky považovat za správný.

### 3.3.2 Porovnání numerické simulace s naměřenými výchylkami piezoelektrického aktuátoru včetně zapojeného obvodu se zápornou kapacitou

Pro výpočet výchylky volného konce aktuátoru použijeme vztah 1.21. Avšak za  $K$  dosadíme vzorec následující.

$$K = K_0 * \left( \frac{1 + \alpha(\omega)}{1 - k^2 + \alpha(\omega)} \right) \quad (1.22)$$

kde  $k^2 = 0,3$  vychází z předpokládaných materiálových vlastností obvyklých pro PZT keramiku.

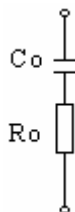
Do vztahu 1.22 dosadíme  $\alpha(\omega)$ , což je již zmíněný záporný poměr kapacit obvodu se zápornou kapacitou  $C_0$  a piezoelektrického aktuátoru  $C_s$ . V obvodu se zápornou kapacitou určuje zesílení poměr odporů  $R_2$  a  $R_1$ .

Výsledný vztah bude tedy:

$$\alpha(\omega) = \frac{C(\omega)}{C_s(\omega)} = - \frac{R_2 * C_0(\omega)}{R_1 * C_s(\omega)} \quad (1.23)$$



Kapacitu obvodu se zápornou kapacitou  $C_o$  tvoří sériový obvod RC

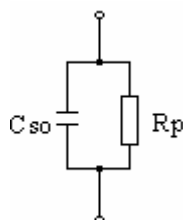


Obr. 1-16: Sériový obvod RC

Ze vztahu pro impedanci tohoto obvodu můžeme vyjádřit kapacitu  $C_o(\omega)$ :

$$Z_o(\omega) = R_o + \frac{1}{j\omega C_o} \Rightarrow C_o(\omega) = \frac{1}{j\omega} * \frac{1}{\left(R_o + \frac{1}{j\omega C_o}\right)} \quad (1.24)$$

Kapacitu piezoelektrického aktuátoru  $C_s$  lze zjistit z náhradního obvodu piezoelektrického aktuátoru jenž je tvořen paralelním zapojením obvodu RC.



Obr. 1-17: Paralelní obvod RC

Opět můžeme ze vzorce pro výpočet impedance tohoto obvodu odvodit vztah pro kapacitu  $C_s$ :

$$Z_s(\omega) = \frac{1}{j\omega C_s(\omega)} \Rightarrow C_s(\omega) = \frac{1}{j\omega Z_s(\omega)} \quad (1.25)$$

kde impedance  $Z_s$  je rovna:

$$Z_s(\omega) = \frac{R_p * \frac{1}{j\omega C_{so}}}{R_p + \frac{1}{j\omega C_{so}}} \quad (1.26)$$

Celková kapacita piezoelektrického aktuátoru  $C_s$  bude tedy:

$$C_s(\omega) = \frac{1}{j\omega} * \frac{R_p + \frac{1}{j\omega C_{so}}}{R_p * \frac{1}{j\omega C_{so}}} \quad (1.27)$$

Při dosazení vypočtených vztahů pro kapacity obvodu se zápornou kapacitou (1.24) a piezoelektrického aktuátoru (1.27) do vztahu pro  $\alpha(\omega)$  (1.23) vyjde:

$$\alpha(\omega) = \frac{C(\omega)}{C_s(\omega)} = \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \alpha(\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega} * \left( R_o + \frac{1}{j\omega C_o} \right)}{\frac{1}{j\omega} * \left( \frac{R_p * \frac{1}{j\omega C_{so}}}{R_p + \frac{1}{j\omega C_{so}}} \right)} = \frac{R_o + \frac{1}{j\omega C_o}}{\frac{R_p * \frac{1}{j\omega C_{so}}}{R_p + \frac{1}{j\omega C_{so}}}} = \frac{\frac{R_o j\omega C_o + 1}{j\omega C_o}}{\frac{R_p}{j\omega C_{so} (R_p j\omega C_{so} + 1)}} \quad (1.28)$$

po úpravách dostaneme:

$$\alpha(\omega) = \frac{j\omega C_o R_p}{(R_o j\omega C_o + 1) * (R_p j\omega C_{so} + 1)} \quad (1.29)$$

což zbývá dosadit do vztahu 1.22 a dále pak do vztahu 1.21.

## Závěr

Závěrem této bakalářské práce můžeme říci, že se podařilo splnit cíle jenž byli stanoveny v zadání. Obvod realizující zápornou kapacitu pomocí zpětnovazebního obvodu s operačním zesilovačem byl realizován na nepájivém poli a byla ověřena jeho funkčnost.

Provedl jsem měření výchylky volného konce bimorfu v závislosti na frekvenci budícího signálu v okolí rezonanční frekvence piezoelektrického bimorfu bez a s připojeným obvodem se zápornou kapacitou. Pro rezonanční frekvenci 49,7Hz piezoelektrického bimorfu na kterou byl obvod se zápornou kapacitou naladěn bylo dosaženo vynikajícího téměř třetinového potlačení vibrací vzhledem k vibracím změřeným bez zapojeného obvodu se zápornou kapacitou. V bezprostředním okolí rezonanční frekvence (cca 1Hz) byly vibrace potlačeny asi na polovinu. Důvodem nižšího potlačení vibrací v okolí rezonance byla rozdílnost reálných a imaginárních složek kapacit piezoelektrického prvku a obvodu se zápornou kapacitou. Otázkou, na které by se dalo dále pracovat, zůstává jak zajistit shodu reálných a imaginárních částí, a tedy i větší potlačení vibrací na několika frekvencích. Řešení by mohlo poskytovat třeba řízení nastavování potenciometrů v obvodu se zápornou kapacitou počítačem.

Fitováním bylo zjištěno, že při odpojeném obvodu se zápornou kapacitou na piezoelektrický element je piezoelektrická konstanta rovna  $d = 0,00016$ , koeficient tlumení tlumiče  $B = 0,0028$  a efektivní tuhost bimorfu je  $K = 17,85$ . Při simulaci za připojeného obvodu se zápornou kapacitou na piezoelektrický element byl jasně naznačen postup výpočtu a odvozena teoretická frekvenční závislost výchylky volného konce bimorfu.

V práci by bylo možné pokračovat tak, že po změření frekvenčních závislostí kapacit piezoelektrické elementu a obvodu se zápornou kapacitou a po vypočtení těchto závislostí z mnou odvozených vztahů teoretické závislosti lze nakreslit křivky závislosti výchylky bimorfu při připojeném obvodu se zápornou kapacitou. To však již bylo nad rámec zadání bakalářské práce a tento problém může být zajímavým tématem navazující diplomové práce.

## Použitá literatura :

- [1] P. Půlpán, J. Erhart: Piezoelektrické „chytré“ materiály pro elektrotechniku, Elektro 11, 4-7 (2002)
- [2] P. Půlpán, J. Erhart: Parametry piezoelektrických bimorfů, Elektro 3, 4-7 (2002)
- [3] L. Raulímová: Návrh a realizace obvodu se zápornou kapacitou pro systém aktivního potlačení vibrací pomocí piezoelektrických materiálů, Diplomová práce, TU v Liberci 2006
- [4] J. Dostál: Operační zesilovače, Státní nakladatelství technické literatury, 1981
- [5] P. Neuman, J. Uhlíř: Elektronické obvody, Vydavatelství ČVUT, 1996
- [6] J. Punčochář: Operační zesilovače v elektronice, BEN, 2002
- [7] datasheet NE 5534 dostupné z <http://www.datasheetcatalog.com>
- [8] P.Mokrý – soukromé sdělení

## Seznam příloh:

**Příloha č. 1:-** Tabulka 1.1 – Naměřené hodnoty odchylky  $u$  volného konce piezoelektrického aktuátoru bez připojeného obvodu se zápornou kapacitou

**Příloha č.2:-** Tabulka 1.2 – Naměřené hodnoty odchylky  $u$  volného konce piezoelektrického aktuátoru včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou

**Příloha č.3:-** Tabulka 1.3 – Naměřené hodnoty odchylky  $u$  volného konce piezoelektrického aktuátoru bez připojeného obvodu se zápornou kapacitou v porovnání s hodnotami vypočtených z numerické simulace.

Přílohy :

Příloha č.1: Tabulka 1.1 – Naměřené hodnoty odchyly  $u$  volného konce piezoelektrického aktuátoru bez připojeného obvodu se zápornou kapacitou

f [ Hz ]	X1 [ mm ]	X2 [ mm ]	u2 [mm] pro x2	u1[mm] pro x1	u celkova
35	70	92	2,89	2,71	0,09
36	69	95	2,91	2,70	0,11
37	70	95	2,91	2,71	0,10
38	69	96	2,92	2,70	0,11
39	67	95	2,91	2,68	0,11
40	67	96	2,92	2,68	0,12
40,5	67	95	2,91	2,68	0,11
41	67	95	2,91	2,68	0,11
41,5	66	96	2,92	2,68	0,12
42	66	97	2,93	2,68	0,13
42,5	67	98	2,94	2,68	0,13
43	67	98	2,94	2,68	0,13
43,5	66	98	2,94	2,68	0,13
44	65	98	2,94	2,67	0,13
44,5	65	100	2,95	2,67	0,14
45	64	100	2,95	2,66	0,15
45,3	63	101	2,96	2,65	0,16
45,6	63	102	2,97	2,65	0,16
45,9	62	103	2,98	2,64	0,17
46,2	62	103	2,98	2,64	0,17
46,5	61	105	2,99	2,63	0,18
46,7	60	107	3,01	2,63	0,19
47	56	107	3,01	2,59	0,21
47,2	55	109	3,03	2,58	0,22
47,4	53	112	3,05	2,57	0,24
47,6	50	115	3,07	2,54	0,27
47,8	47	120	3,12	2,52	0,30
48	42	123	3,14	2,48	0,33
48,2	38	129	3,19	2,44	0,37
48,4	33	133	3,22	2,40	0,41
48,6	30	136	3,24	2,38	0,43
48,8	25	141	3,28	2,34	0,47
49	22	146	3,32	2,31	0,51
49,1	20	148	3,34	2,29	0,52

49,2	19	150	3,36	2,29	0,54
49,3	17	152	3,37	2,27	0,55
49,4	16	153	3,38	2,26	0,56
49,5	15	155	3,39	2,25	0,57
49,6	14	156	3,40	2,24	0,58
49,7	13	157	3,41	2,23	0,59
49,8	15	157	3,41	2,25	0,58
49,9	16	155	3,39	2,26	0,57
50	17	153	3,38	2,27	0,56
50,1	21	147	3,33	2,30	0,51
50,2	25	143	3,30	2,34	0,48
50,3	29	139	3,27	2,37	0,45
50,4	31	135	3,24	2,39	0,43
50,5	34	133	3,22	2,41	0,40
50,6	35	132	3,21	2,42	0,40
50,7	37	130	3,20	2,44	0,38
50,8	39	128	3,18	2,45	0,36
50,9	40	125	3,16	2,46	0,35
51	42	124	3,15	2,48	0,34
51,2	45	120	3,12	2,50	0,31
51,4	48	119	3,11	2,53	0,29
51,6	49	118	3,10	2,54	0,28
51,8	51	115	3,07	2,55	0,26
52	53	113	3,06	2,57	0,25
52,2	54	112	3,05	2,58	0,24
52,4	55	110	3,03	2,58	0,22
52,6	56	109	3,03	2,59	0,22
52,8	57	108	3,02	2,60	0,21
53	58	107	3,01	2,61	0,20
53,3	60	105	2,99	2,63	0,18
53,6	61	104	2,99	2,63	0,18
53,9	62	103	2,98	2,64	0,17
54,2	63	101	2,96	2,65	0,16
54,5	64	100	2,95	2,66	0,15
54,8	64	100	2,95	2,66	0,15
55	65	99	2,95	2,67	0,14
55,5	66	98	2,94	2,68	0,13
56	68	96	2,92	2,69	0,11
56,5	69	96	2,92	2,70	0,11

57	69	95	2,91	2,70	0,11
57,5	70	94	2,90	2,71	0,10
58	71	94	2,90	2,72	0,09
58,5	71	92	2,89	2,72	0,09
59	71	93	2,90	2,72	0,09
59,5	71	92	2,89	2,72	0,09
60	73	92	2,89	2,73	0,08
61	73	91	2,88	2,73	0,07
62	73	90	2,87	2,73	0,07
63	75	89	2,86	2,75	0,06
64	75	87	2,85	2,75	0,05
65	75	87	2,85	2,75	0,05
66	75	87	2,85	2,75	0,05



Příloha č.2: Tabulka 1.2 – Naměřené hodnoty odchylky  $u$  volného konce piezoelektrického aktuátoru včetně připojeného obvodu se zápornou kapacitou

f [ Hz ]	X1 [ mm ]	X2 [ mm ]	u2 [mm] pro x2	u1 [mm] pro x1	u celkova
35	69	103	2,98	2,70	0,14
36	67	102	2,97	2,68	0,14
37	66	102	2,97	2,68	0,15
38	66	103	2,98	2,68	0,15
39	66	104	2,99	2,68	0,16
40	65	104	2,99	2,67	0,16
40,5	65	104	2,99	2,67	0,16
41	65	105	2,99	2,67	0,16
41,5	65	105	2,99	2,67	0,16
42	64	105	2,99	2,66	0,17
42,5	63	104	2,99	2,65	0,17
43	63	105	2,99	2,65	0,17
43,5	62	105	2,99	2,64	0,18
44	62	107	3,01	2,64	0,18
44,5	62	108	3,02	2,64	0,19
45	61	108	3,02	2,63	0,19
45,3	61	109	3,03	2,63	0,20
45,6	60	109	3,03	2,63	0,20
45,9	60	110	3,03	2,63	0,20
46,2	58	110	3,03	2,61	0,21
46,5	58	111	3,04	2,61	0,22
46,7	58	113	3,06	2,61	0,22
47	63	119	3,11	2,65	0,23
47,2	63	121	3,12	2,65	0,24
47,4	63	122	3,13	2,65	0,24
47,6	63	124	3,15	2,65	0,25
47,8	62	124	3,15	2,64	0,25
48	62	125	3,16	2,64	0,26
48,2	62	125	3,16	2,64	0,26
48,4	61	126	3,16	2,63	0,26
48,6	61	126	3,16	2,63	0,26
48,8	61	125	3,16	2,63	0,26
49	60	124	3,15	2,63	0,26
49,1	60	122	3,13	2,63	0,25
49,2	60	121	3,12	2,63	0,25
49,3	59	119	3,11	2,62	0,24
49,4	59	119	3,11	2,62	0,24

49,5	59	118	3,10	2,62	0,24
49,6	59	116	3,08	2,62	0,23
49,7	58	115	3,07	2,61	0,23
49,8	57	113	3,06	2,60	0,23
49,9	57	110	3,03	2,60	0,22
50	57	107	3,01	2,60	0,20
50,1	56	107	3,01	2,59	0,21
50,2	55	107	3,01	2,58	0,21
50,3	55	106	3,00	2,58	0,21
50,4	55	107	3,01	2,58	0,21
50,5	55	109	3,03	2,58	0,22
50,6	54	109	3,03	2,58	0,22
50,7	54	109	3,03	2,58	0,22
50,8	53	110	3,03	2,57	0,23
50,9	54	110	3,03	2,58	0,23
51	53	112	3,05	2,57	0,24
51,2	52	112	3,05	2,56	0,25
51,4	52	113	3,06	2,56	0,25
51,6	51	114	3,07	2,55	0,26
51,8	50	115	3,07	2,54	0,27
52	50	115	3,07	2,54	0,27
52,2	51	114	3,07	2,55	0,26
52,4	51	114	3,07	2,55	0,26
52,6	51	114	3,07	2,55	0,26
52,8	52	113	3,06	2,56	0,25
53	53	113	3,06	2,57	0,25
53,3	53	112	3,05	2,57	0,24
53,6	55	111	3,04	2,58	0,23
53,9	56	109	3,03	2,59	0,22
54,2	57	108	3,02	2,60	0,21
54,5	58	108	3,02	2,61	0,20
54,8	59	106	3,00	2,62	0,19
55	60	105	2,99	2,63	0,18
55,5	62	105	2,99	2,64	0,18
56	63	104	2,99	2,65	0,17
56,5	64	102	2,97	2,66	0,16
57	65	100	2,95	2,67	0,14
57,5	67	99	2,95	2,68	0,13
58	67	98	2,94	2,68	0,13
58,5	67	97	2,93	2,68	0,12
59	70	96	2,92	2,71	0,11
59,5	71	96	2,92	2,72	0,10

60	71	96	2,92	2,72	0,10
61	72	93	2,90	2,72	0,09
62	73	93	2,90	2,73	0,08
63	74	91	2,88	2,74	0,07
64	75	90	2,87	2,75	0,06
65	75	89	2,86	2,75	0,06
66	76	88	2,86	2,76	0,05

Příloha č.3:- Tabulka 1.3 – Naměřené hodnoty odchyly  $u$  volného konce piezoelektrického aktuátoru bez připojeného obvodu se zápornou kapacitou v porovnání s hodnotami vypočtených z numerické simulace.

f [ Hz ]	$\omega$	$\omega r$	naměřeno	výsledek simulace
35	219,91	312,27	0,09	0,06
36	226,19	312,27	0,11	0,06
37	232,48	312,27	0,10	0,06
38	238,76	312,27	0,11	0,07
39	245,04	312,27	0,11	0,07
40	251,33	312,27	0,12	0,08
40,5	254,47	312,27	0,11	0,08
41	257,61	312,27	0,11	0,09
41,5	260,75	312,27	0,12	0,09
42	263,89	312,27	0,13	0,10
42,5	267,04	312,27	0,13	0,11
43	270,18	312,27	0,13	0,11
43,5	273,32	312,27	0,13	0,12
44	276,46	312,27	0,13	0,13
44,5	279,60	312,27	0,14	0,14
45	282,74	312,27	0,15	0,15
45,3	284,63	312,27	0,16	0,16
45,6	286,51	312,27	0,16	0,17
45,9	288,40	312,27	0,17	0,19
46,2	290,28	312,27	0,17	0,20
46,5	292,17	312,27	0,18	0,22
46,7	293,42	312,27	0,19	0,23
47	295,31	312,27	0,21	0,25
47,2	296,57	312,27	0,22	0,26
47,4	297,82	312,27	0,24	0,28
47,6	299,08	312,27	0,27	0,30
47,8	300,34	312,27	0,30	0,32
48	301,59	312,27	0,33	0,35
48,2	302,85	312,27	0,37	0,38
48,4	304,11	312,27	0,41	0,41
48,6	305,36	312,27	0,43	0,44
48,8	306,62	312,27	0,47	0,48
49	307,88	312,27	0,51	0,51

49,1	308,50	312,27	0,52	0,53
49,2	309,13	312,27	0,54	0,55
49,3	309,76	312,27	0,55	0,56
49,4	310,39	312,27	0,56	0,57
49,5	311,02	312,27	0,57	0,58
49,6	311,65	312,27	0,58	0,58
49,7	312,27	312,27	0,59	0,58
49,8	312,90	312,27	0,58	0,58
49,9	313,53	312,27	0,57	0,57
50	314,16	312,27	0,56	0,56
50,1	314,79	312,27	0,51	0,55
50,2	315,42	312,27	0,48	0,53
50,3	316,04	312,27	0,45	0,52
50,4	316,67	312,27	0,43	0,50
50,5	317,30	312,27	0,40	0,48
50,6	317,93	312,27	0,40	0,46
50,7	318,56	312,27	0,38	0,44
50,8	319,19	312,27	0,36	0,43
50,9	319,81	312,27	0,35	0,41
51	320,44	312,27	0,34	0,39
51,2	321,70	312,27	0,31	0,36
51,4	322,96	312,27	0,29	0,33
51,6	324,21	312,27	0,28	0,31
51,8	325,47	312,27	0,26	0,29
52	326,73	312,27	0,25	0,27
52,2	327,98	312,27	0,24	0,25
52,4	329,24	312,27	0,22	0,23
52,6	330,50	312,27	0,22	0,22
52,8	331,75	312,27	0,21	0,21
53	333,01	312,27	0,20	0,19
53,3	334,89	312,27	0,18	0,18
53,6	336,78	312,27	0,18	0,17
53,9	338,66	312,27	0,17	0,16
54,2	340,55	312,27	0,16	0,15
54,5	342,43	312,27	0,15	0,14
54,8	344,32	312,27	0,15	0,13
55	345,58	312,27	0,14	0,12
55,5	348,72	312,27	0,13	0,11
56	351,86	312,27	0,11	0,10

56,5	355,00	312,27	0,11	0,10
57	358,14	312,27	0,11	0,09
57,5	361,28	312,27	0,10	0,08
58	364,42	312,27	0,09	0,08
58,5	367,57	312,27	0,09	0,07
59	370,71	312,27	0,09	0,07
59,5	373,85	312,27	0,09	0,07
60	376,99	312,27	0,08	0,06
61	383,27	312,27	0,07	0,06
62	389,56	312,27	0,07	0,05
63	395,84	312,27	0,06	0,05
64	402,12	312,27	0,05	0,04
65	408,41	312,27	0,05	0,04
66	414,69	312,27	0,05	0,04