

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 DP 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 užít 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).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat Ing. Pavlovi Mokrému, Ph.D. za vedení diplomové práce a Ing. Tomáši Slukovi za jeho pomoc při realizaci. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat svým rodičům a sestře za podporu po celou dobu studia.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na vývoj systému aktivního potlačování vibrací, který využívá metody elektronického řízení elastických vlastností piezoelektrického materiálu. Systém se skládá z piezoelektrického převodníku, vyrobeného z keramiky PZT a připojeného ke zpětnovazebnímu elektronickému obvodu. Elektronickým obvodem jsou řízeny elastické vlastnosti keramiky, popsané pomocí Youngova modulu. Nastavením zpětnovazebního obvodu lze dosáhnout poklesu efektivní dynamické hodnoty Youngova modulu, což „změkčí“ piezoelektrický aktuátor. To má za následek útlum přenosu vibrací skrz piezoelektrický materiál. Tento zpětnovazební obvod obsahuje operační zesilovač, což způsobuje problémy se stabilitou obvodu.

Cílem této práce je shrnout dosavadní poznatky v oboru potlačování vibrací elektronicky řízenými vlastnostmi piezoelektrického materiálu. Zhodnotit nedostatky tohoto systému, tedy analyzovat jednotlivé součásti systému jako jsou operační zesilovač a reálný kondenzátor ve zpětné vazbě a z toho vyplývající problém stability obvodu. Při sestavování zpětnovazebního obvodu je nutné dbát na jeho variabilitu, která umožní další modifikace obvodu v následujícím výzkumu. To umožní navázat na výzkum probíhající v Kobayasi Institute of Physical Research, Japonsko a umožnit provádění dalšího vývoje této technologie na Technické univerzitě v Liberci.

Annotation

This thesis is focused on a research and development of a system for active vibration suppression using electronic control of elasticity of piezoelectric materials. The system consists of a piezoelectric transducer made of PZT ceramics connected to a feedback electronic circuit. Elastic properties described by Young's modulus are controlled by the feedback circuit. It is possible to achieve a reduction of the effective dynamic value of the Young's modulus by setting the proper feedback circuit parameters that results in softening the piezoelectric actuator. Finally, the transmission of vibrations through the piezoelectric actuator is decreased. This feedback circuit contains an operational amplifier and therefore the biggest problem is the circuit stability.

The main objective of this Thesis is to summarize the state-of-the-art knowledge in the field of vibration suppression by electronically controlled elasticity of piezoelectric materials. In particular, it is the evaluation of system drawbacks including the analysis of the individual parts of the system such as operational amplifier and real capacitor connected in feedback loop, which causes the stability problem of the system. In a realization of feedback circuit it is necessary to take notice of its variability, which makes further modifications in following research possible. It will help to establish a link to the research running in Kobayasi Institute of Physical Research, Japan and it enables further research of this technology at the Technical University of Liberec.

Obsah:

Seznam použitých symbolů	8
Úvod	11
0.1 Formulování cílů diplomové práce	13
1 Teoretická část	14
1.1 Systém potlačování vibrací	14
1.2 Přenos vibrací	14
1.3 Piezoelektrické materiály	17
1.3.1 Piezoelektrické materiály používané v systémech potlačení vibrací	19
1.4 Řízení Youngova modulu v piezoelektrických materiálech	20
1.4.1 Význam obvodu se zápornou kapacitou	22
1.5 Obvod „S“	23
1.5.1 Výpočet kapacity	24
1.5.2 Výpočet kapacity s přidaným odporem R_b	25
1.5.3 Frekvenční závislost negativní kapacity	26
1.6 Problematické aspekty realizace	29
1.6.1 Požadavek shody reálných a imaginárních částí	30
1.6.2 Vlastnosti operačních zesilovačů	30
1.6.3 Stabilita obvodu „S“	33
2 Praktická část	39
2.1 Výběr jednotlivých součástí	39
2.1.1 Zdroj	39
2.1.2 Operační zesilovač	39
2.1.3 Buffer	40
2.1.4 Napěťové sledovače	40
2.1.5 Odpory v obvodu	40
2.2 Popis nepájivého pole	41
2.3 Zapojení na pájivém poli	48
Závěr	49
Použitá literatura	51

Seznam použitých symbolů

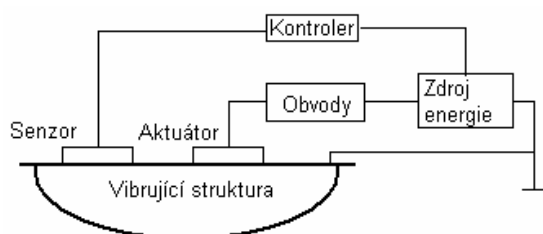
A	zesílení celého obvodu
A_u	zesílení operačního zesilovače
A_0	stejnoseměrné napěťové zesílení
C	kapacita elektronického zpětnovazebního obvodu
C_s	kapacita piezoelektrického vzorku
C_0	kondenzátor ve zpětné vazbě obvodu záporné kapacity
C_{0nest}	kondenzátor ve zpětné vazbě obvodu záporné kapacity na mezi stability
C_{snahr}	kondenzátor nahrazující piezoelektrikum při ověřování funkčnosti obvodu
C^*	kapacita obvodu se zápornou kapacitou v případě reálné impedance ve zpětné vazbě
c_{ijkl}	složky tenzoru elastických vlastností
D_i	složky elektrického posunutí
D_n	elektrického posunutí v normálovém směru
d_{ijk}	piezoelektrický modul
E_i	složky tenzoru elektrického pole ($i=1,2,3$)
e_{ijkl}	složky tenzoru piezoelektrického modulu
E_k	intenzita elektrického pole
f	kmitočet
F_b	budící síla
f_t	tranzitní kmitočet
F_t	tlumící síla
F_v	vratná síla
f_0	potlačovaná frekvence
f_1	kmitočet, při kterém zesílení klesne o 3dB
G	zesílení operačního zesilovače
GI	zesílení ideálního operačního zesilovače
I_b	proud procházející odporem R_b
I_{IN}	vstupní proud operačního zesilovače
I_Z	proud protékající kondenzátorem ve zpětné vazbě
I_2	Proud v kondenzátoru C_0
k	koeficient elektromechanické vazby
k	tuhost

m	hmotnost
OZ	operační zesilovač
PZT	piezoelektrická keramika na bázi tuhých roztoků oxidů olova (Pb), zirkonu (Zr) a titanu (Ti)
Q	náboj
Q	činitel jakosti
R_b	odpor připojený paralelně nebo sériově k piezoelektrickému vzorku
R_0	odpor kondenzátoru ve zpětné vazbě
R_{0nest}	odporu kondenzátoru ve zpětné vazbě obvodu „S“ na mezi stability
R_s	Odpor piezoelektrického vzorku použitý v systému
R_{snahr}	odpor nahrazující piezoelektrikum při ověřování funkčnosti obvodu
R_v	ztrátový odpor kondenzátoru
$R_1, R_2,$	odpory v obvodu se zápornou kapacitou
R_3, R_4	
S_{ij}	mechanická deformace (tenzor 2.řádu)
S_{ijkl}	elastický koeficient (tenzor 4. řádu)
T	přenos vibrací
T_{ij}	tenzor mechanického napětí
T_λ	složky tenzoru napětí (tenzor druhého řádu)
U	vnitřní energie systému
U_d	rozdílové diferenční napětí mezi vstupy operačního zesilovače
U_{in}	vstupní napětí operačního zesilovače
U_{out}	výstupní napětí operačního zesilovače
U_s	napájecí napětí operačního zesilovače
U_{R1}, U_{R2}	napětí na odporu R_1 , resp. R_2 ve zpětné vazbě v obvodu „S“
U_1, U_2	amplituda vibrací
u_1, u_2	okamžitá poloha aktuátoru při vibraci
X_C	jalový odpor kondenzátoru
Y	efektivní Youngův modul piezoelektrického vzorku
Y_0	Youngův modul piezoelektrického materiálu
Z_{IN}	vstupní impedance obvodu „S“
Z_s	impedance piezoelektrického vzorku
Z_0	impedance ve zpětné vazbě obvodu „S“

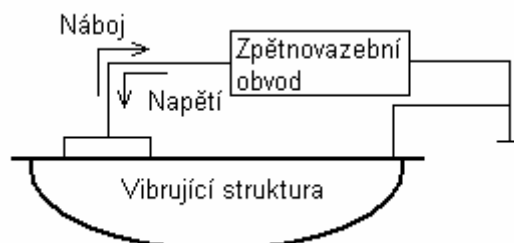
Z_{0nest}	impedance ve zpětné vazbě na mezi stability
α	poměr kapacity zpětnovazebního obvodu ku kapacitě piezoelektrického vzorku
β	činitel zpětné vazby
Δu_o	změna výstupního napětí na operačním zesilovači
Δu_d	změna rozdílového napětí na vstupech operačního zesilovače
ε_{ij}	permitivita při konstantní deformaci
ε_0	permitivita vakua $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m
ε_r	relativní permitivita (dielektrická konstanta)
ε_{nm}	permitivita při konstantním elastické napětí
φ	fázový posuv
Θ	termodynamická teplota; absolutní teplota
Θ_c	Currieova teplota
σ	entropie; Poissonova konstanta
ω	úhlová rychlost
ω_m	mechanická rezonanční úhlová rychlost
ξ	tlumení

Úvod

Díky rychlému rozvoji nových technologií žijí lidé v prostředí s velkou hlučností a vibracemi. V současnosti využívané pasivní systémy potlačování vibrací využívají mechanické součásti jako jsou pružiny, tlumiče nebo pryže s cílem mechanicky izolovat zdroj vibrací. Pasivní systémy jsou nejstarší a patří mezi cenově nejvýhodnější, ale mají mnoho nevýhod jako velká hmotnost a obtížné tlumení hluku a vibrací nízkých frekvencí. Proto se nyní začínají používat aktivní systémy (viz obrázek 0-1), které se skládají z elektroakustických převodníků (senzorů a aktuátorů) vibrací a řídicí elektroniky. Jejich základní funkce je založena na snímání vibrací pomocí sensorů a generování vibrací se stejnou amplitudou a opačnou fází než ty, které se snažíme potlačit. Velice výhodným prostředkem se jeví detekovat a budít mechanické vibrace pomocí piezoelektrických elektroakustických převodníků. Použití piezoelektrických materiálů v těchto systémech se vyznačuje značnými výhodami: jednoduché technologické provedení, malá hmotnost, rychlá odezva, vysoká efektivnost. I přes použití piezoelektrických materiálů jsou však „klasické“ systémy zobrazené na obrázku 0-1 velmi náročné na spotřebovanou energii, jsou nevýhodné kvůli složitosti elektroniky a mají malou účinnost při potlačování nízkých frekvencí tlumení.



Obrázek 0-1: V současnosti používané aktivní systémy pro potlačení vibrací



Obrázek 0-2: Systém s piezoelektrickým prvkem, který pracuje jako senzor a aktuátor současně

Diplomová práce je zaměřena na vývoj systémů aktivního tlumení vibrací. Tyto systémy mají mnohem jednodušší a výhodnější konstrukci (viz obrázek 0-2) odstraňující některé nevýhody „klasických systémů“. Je to proto, že v tomto novém systému pro aktivní potlačení vibrací se piezoelektrický element chová jako akční člen a detektor současně. Využívá se schopnosti piezoelektrických materiálů měnit svoje vlastnosti působením vnějších polí, což je řadí mezi tzv. inteligentní materiály. V tomto konkrétním případě se jedná o elektrickým polem řízené elastické vlastnosti piezoelektrického elementu.

Je velice reálné, že v budoucnosti budou používány tyto aktivní systémy potlačování hluku a vibrací díky jednoduché kombinaci piezoelektrického materiálu a zpětnovazební elektroniky. Budou schopné potlačovat hluk a vibrace způsobené dopravou, případně průmyslovými stroji v širokém frekvenčním spektru. Toto zlepšení by nejen zpříjemnilo mnoho lidských činností (stavebnictví, hornictví, strojírenství, hutnický a potravinářský průmysl), ale také umožnilo zvýšit přesnosti průmyslových výrobků.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je rozebrán systém potlačování vibrací s piezoelektrickým materiálem jako inteligentním prvkem (viz kapitola 1.3), tedy používané piezoelektrické materiály a zpětnovazební elektronický obvod. V kapitole 1.4.1 jsou rozebrány důvody pro použití záporné kapacity.

V praktické části (viz kapitola 2) je rozebrána volba jednotlivých součástek pro zpětnovazební obvod záporné kapacity. Dále popis realizace obvodu se zpětnou vazbou na nepájivém poli (viz kapitola 2.2) a na pájivém poli (viz kapitola 2.3)

0.1 Formulování cílů diplomové práce

Cílem diplomové práce je rozebrat dosavadní výsledky výzkumu systému potlačování vibrací využívajícího piezoelektrický materiál jako senzor a aktuátor v jednom. Provést analýzu negativních vlastností a omezujících prvků systému jako je reálný operační zesilovač, reálné vlastnosti kondenzátoru ve zpětné vazbě, teplotní změny vlastností piezoelektrického materiálu PZT (piezoelektrická keramika). Cílem je navázat na výzkum potlačování vibrací a hluku, který v Kobayasi Institute of Physical Research, Japonsko probíhá již 5 let. Rozebrat teoreticky chování zpětnovazebního obvodu pro řízení efektivní hodnoty Youngova modulu piezoelektrického prvku a vyřešit oblast stability systému pro potlačení vibrací. Následujícím krokem bude samotná realizace systému, kde bude možné měřit proudy a napětí v různých místech obvodu, případně na piezoelektrickém vzorku. Tímto krokem podpořit další rozvoj v tomto oboru.

Realizace je ovlivněna volbou součástek, které jsou v současnosti běžně dostupné na trhu, aby se udržela nízká cenová dostupnost systému. Další ovlivnění je způsobeno nutností dalších úprav v obvodu, které budou uskutečňovány v následném výzkumu na Technické univerzitě v Liberci.

1 Teoretická část

V teoretické části jsou rozebrány vlastnosti systému pro potlačování vibrací (viz kapitola 1.1). Základní princip systému, tedy řízení elastických vlastností (Youngova modulu) piezoelektrického materiálu, je vysvětlen v kapitole 1.4. Elektronický zpětnovazební obvod je rozebrán v kapitole 1.5. V kapitole 1.6 jsou nastíněny problémy při řešení potlačování vibrací jako je shoda reálných a imaginárních částí impedance piezoelektrického vzorku a elektronického obvodu a reálné vlastnosti operačních zesilovačů (viz kapitola 1.6.2).

1.1 Systém potlačování vibrací

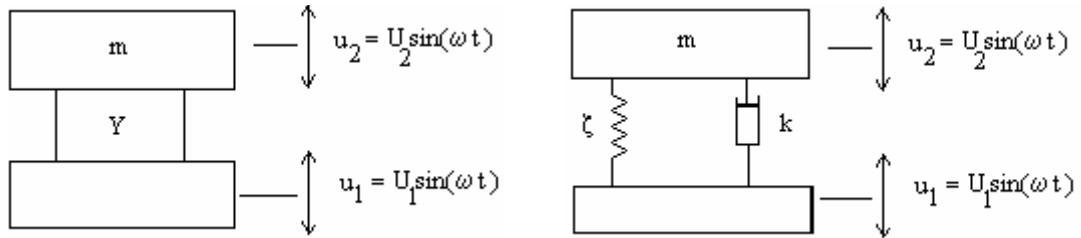
V současnosti používané systémy pro potlačení vibrací jsou velmi komplikované a náročné na spotřebovanou energii. Do řešení tohoto problému je nutné zahrnout komplexnost a časovou proměnnost všech veličin, včetně různých druhů kmitů vibrací. Systémy využívající piezoelektrického materiálu mají mnoho výhod jako je nízká spotřeba energie, jednoduché řízení a v neposlední řadě také potlačování nízkých frekvencí. Dále nevyžadují permanentní magnety jako v současnosti užívané dynamické systémy, což umožňuje výrazné zmenšení hmotnosti. V klasických aktivních systémech na potlačení vibrací je piezoelektrický materiál používán pouze jako senzor nebo jako aktuátor nezávisle na sobě. V systému analyzovaném v této diplomové práci je jeden a týž piezoelektrický prvek používán jako aktuátor i senzor současně. Při realizaci tohoto systému je využíván přímý i nepřímý piezoelektrický jev ve stejném okamžiku. Toho je docíleno pomocí externího obvodu připojeného ke vzorku. Řízení se děje pomocí změny napětí na piezoelektrickém vzorku podle generovaného náboje vyvolaném mechanickým namáháním. Jako piezoelektrický aktuátor se nejčastěji používá keramika PZT (viz kapitola 1.3.1), díky velké hodnotě elektromechanického koeficientu k . To umožní snazší realizaci elektronického řízení Youngova modulu.

1.2 Přenos vibrací

Přenos vibrací je termín, který vyjadřuje schopnost systému přenést vibrace z jedné části na druhou. Je snaha aby se vibrace ze zdroje nepřenášely na další části. Přenos vibrací je definovaný vztahem:

$$T = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| \quad (1-1)$$

Tedy poměrem amplitud výstupní (U_2) a vstupní (U_1) vibrace. Systém potlačování vibrací využívající piezoelektrický materiál je možné nahradit schématicky (viz obrázek 1-1). Elastické vlastnosti jsou řízeny pomocí Youngova modulu $Y = Y' + jY''$, kde reálnou část Y' nahradíme pružinou a imaginární Y'' tlumičem.



Obrázek 1-1: Schématické zobrazení systému potlačení vibrací Obrázek 1-2: Náhradní schéma systému pro potlačení vibrací

Základním předpokladem je buzený systém nucenými sinusovými kmity $u_1 = U_1 \sin(\omega t)$, tedy nucenou vnější silou, která během cyklu koná práce a mění vždy svůj směr, tak aby působila ve směru pohybu. Energie vytvořená touto silou se spotřebuje na přemáhání odporů, jimiž se kmitý tlumí. Díky působení vnější časově proměnné síly (označována jako budící síla) je příslušné kmitání nucené: [28]

$$F_b + F_v + F_t = m \cdot a \quad (1-2),$$

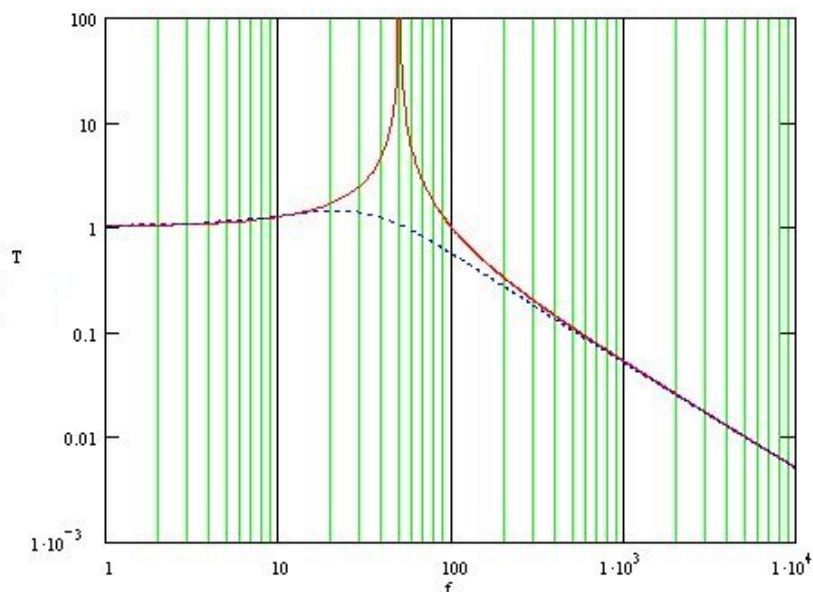
kde $F_b = m\ddot{u}_2$ je budící, $F_v = k(u_1 - u_2)$ je vratná (vyjádřená pružinou) a $F_t = \xi(\dot{u}_1 - \dot{u}_2)$ (vyjádřená tlumičem) je tlumící síla. Kde jednotlivé veličiny mají význam: m – hmotnost, k – tuhost pružiny, ξ - tlumení tlumiče. Po dosazení a vyřešení této lineární diferenciální rovnice 2.řádu je získán vztah:

$$T = \frac{u_2}{u_1} = \frac{1 + \left[2\xi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right) \right]^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \frac{\omega}{\omega_m} \right]^2}} \quad (1-3)$$

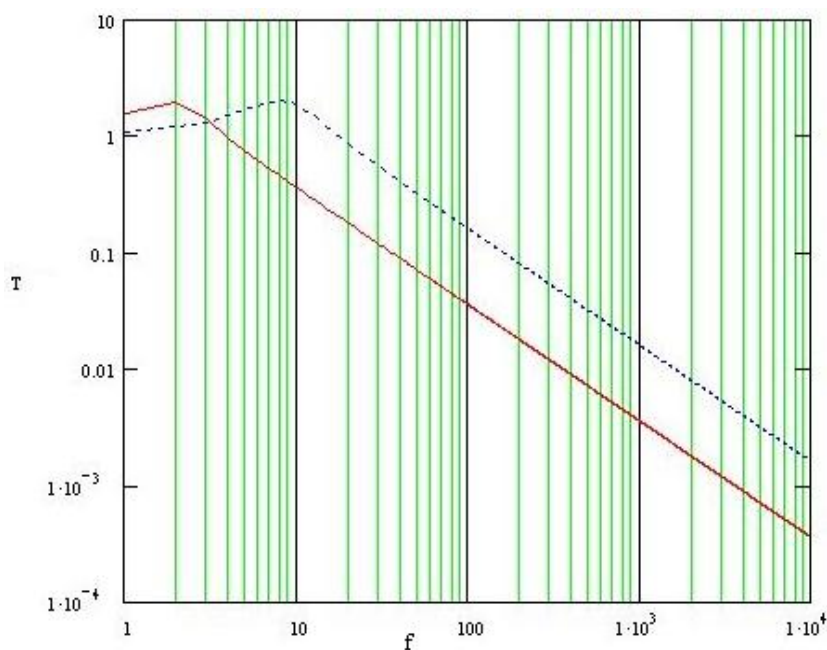
Pro mechanickou rezonanční frekvenci platí:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-4)$$

[24]



Obrázek 1-3: Závislost přenosu vibrací T na frekvenci f v systému zobrazeném na obrázku 1-2 pro hmotnost $m=100\text{kg}$, tuhost pružiny $k = 9,8 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-1}$ a dvě hodnoty tlumení $\xi=0,001$ (červená) a $\xi=1$ (modrá)



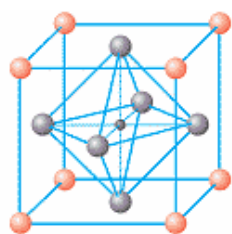
Obrázek 1-4: Závislost přenosu vibrací T na frekvenci f v systému zobrazeném na obrázku 1-2 pro hmotnost $m=100\text{kg}$, tlumení $\xi=0,001$ a dvě hodnoty tuhosti pružiny $k=10^6 \text{ Nm}^{-1}$ (červená) a $k=50 \cdot 10^3 \text{ Nm}^{-1}$ (modrá). Rezonanční frekvence vychází ze vztahu

$$2-12$$

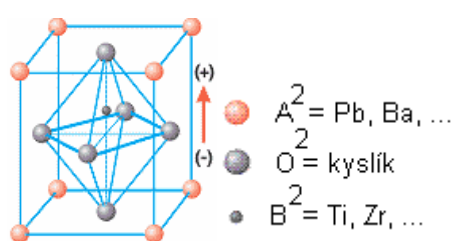
Velkou výhodou systému s piezoelektrickým materiálem je potlačování vibrací i pod jeho rezonanční frekvencí, a tedy i při velmi nízkých frekvencích na rozdíl od mechanických systémů.

1.3 Piezoelektrické materiály

V roce 1880 byla u monokrystalů turmalínu objevena bratry Pierrem a Jacquesem Curiovými lineární závislost mezi mechanickými a elektrickými vlastnostmi [3] a tento jev se nazývá piezoelektrický. Od tohoto okamžiku jsou piezoelektrické materiály využity v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti (lékařství – diagnostické přístroje, mikropumpa, vojenské účely – sonary, průmysl – vstřikovací systémy benzinových motorů [4], piezoelektrické motorky, nedestruktivní testy). Dále jsou použity ke stabilizaci kmitočtů přesných zdrojů frekvencí a času, a při konstrukci rezonančních snímačů neelektrických veličin. V systému pro potlačování vibrací jsou piezoelektrické materiály využívány jako senzor a aktuální jednotka najednou. V těchto systémech je využívána vlastnost materiálu vytvořit na povrchu elektrický náboj způsobený silovým namáháním, která se nazývá přímý piezoelektrický jev. Druhým jevem, který tento systém využívá je převrácený piezoelektrický jev. Kdy přiložením elektrického pole na piezoelektrický materiál dojde k jeho deformaci. Piezoelektrické látky patří do skupiny pevných látek. Krystalické materiály lze rozdělit do 32 krystalových tříd podle jejich krystalografické symetrie. Za materiál s piezoelektrickými vlastnostmi považujeme ten, který nemá střed symetrie, díky tomuto omezení je piezoelektrických pouze 20 (třída 432 nemá střed symetrie a nevykazuje známky piezoelektricity [8]). V současnosti se nejčastěji z piezoelektrických materiálů používají keramiky, obvykle s perovskitovou krystalovou strukturou. [6] Tyto krystaly se vyznačují významnou Curiovou teplotou θ_c , nad touto teplotou (viz obrázek 1-5) neexistuje v krystalu spontánní polarizace. [5] Tato fáze je paraelektrická, je charakterizována silným poklesem permitivity při vzdalování od Curierovy teploty. Při poklesu teploty pod Curieovu teplotu krystalová mříž ztrácí střed symetrie v buňce a kubická struktura přejde na tetragonální (viz obrázek 1-6).



Obrázek 1-5: Struktura krystalové mříže PZT nad Curieovou teplotou, kubická soustava [6]



Obrázek 1-6: Struktura krystalové mříže PZT pod Curieovou teplotou, krystal má elektrický dipól, tetragonální soustava [6]

Nejpodstatnější vlastností piezoelektrických látek je elektrická polarizace, která je vyvolána nejenom působením elektrického pole, ale také působením mechanického napětí nebo v důsledku deformace. Jev, kdy je vyvolána elektrická polarizace působením mechanického napětí (tlak, tah, ohyb, krut), je nazýván **přímým piezoelektrickým jevem** [3], matematicky je vyjádřen:

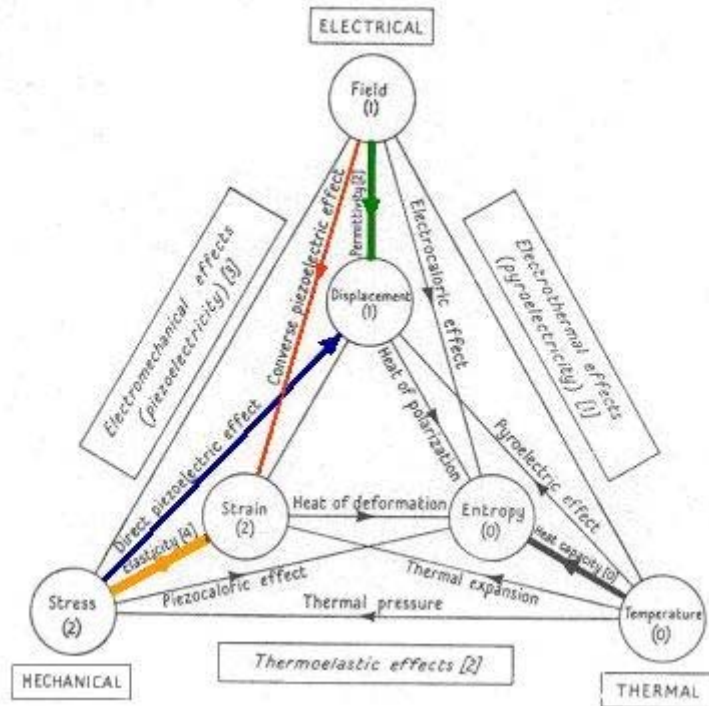
$$D_k = d_{ijk} \cdot T_{ij} + \varepsilon_{kj} \cdot E_j \quad \text{kde } i,j = 1,2,3 \quad (1-5)$$

Tato rovnice vyjadřuje vztah mezi elektrickou indukcí D_k , tenzorem mechanického napětí T_{ij} a elektrickým polem E_j . Tenzor třetího řádu d_{ijk} charakterizuje piezoelektrické vlastnosti materiálu, označován je jako tenzor piezoelektrických koeficientů, obsahuje 18 nezávislých prvků. Tenzor permitivity ε_{ij} vyjadřuje elektrické vlastnosti piezoelektrických materiálů, obsahuje 6 nezávislých prvků. Po aplikaci elektrického pole na piezoelektrický vzorek krystal nepatrně mění tvar. Tento jev je označován jako **převrácený (inverzní) piezoelektrický jev** [5]. Matematické vyjádření:

$$S_{ij} = s_{ijkl} \cdot T_{kl} + d_{ijk} \cdot E_k, \quad \text{kde } k,l = 1,2,3 \quad (1-6)$$

V předchozí rovnici je označeno: S_{ij} tenzor elastické deformace, T_{kl} tenzor mechanického napětí, s_{ijkl} je tenzor elastických poddajností. Rovnice (1-7) je označována jako piezoelektrická stavová rovnice převráceného jevu.

Obrázek 1-7 zobrazuje vztahy mezi stavovými veličinami v piezoelektrických materiálech. V jednotlivých rozích se nachází teplota Θ , elektrické pole E_i a mechanické napětí T_{ij} , které mohou být „aplikovány“ na piezoelektrický krystal. [5] Na obrázku jsou znázorněny přímý a převrácený piezoelektrický jev, které jsou využívány v systému potlačování vibrací. Při přímém piezoelektrickém jevu dojde vlivem mechanického napětí k polarizaci piezoelektrika (na obrázku 1-7 je vyznačen **modrou** barvou – Stress → Displacement). Naopak při převráceném jevu je na piezoelektrický materiál aplikováno elektrické pole, které způsobí mechanickou deformaci (na obrázku vyznačenou **červenou** barvou – Field → Strain). Pokud je nějakým způsobem realizována či ovlivněna vazba mezi polarizací elektrickým polem v piezoelektrickém materiálu (naznačeno na obrázku **zelenou** barvou – v případě systémů potlačování vibrací se jedná o zpětnovazební elektronický obvod – Field → Displacement), dojde k ovlivnění elastických vlastností (na obrázku 1-7 vyznačeno **oranžovou** barvou – Stess → Strain). [17]



Obrázek 1-7: Relace mezi tepelnými, elektrickými a mechanickými stavovými veličinami krystalů, *modrá* barva přímý piezoelektrický jev, *červená* barva převrácený piezoelektrický jev, *zelenou* barvou je vyznačeno ovlivnění elektrického pole polarizací, ovlivňování elastických vlastností je vyznačeno *oranžovou* barvou [17]

Velice užitečnou veličinou, která u piezoelektrického vzorku definuje efektivnost přeměny elektrické energie na mechanickou a naopak, je koeficient elektromechanické vazby $k_{i\lambda}$:

$$k_{i\lambda}^2 = \frac{e_{i\lambda}^2}{\epsilon_{ii}^S \cdot c_{\lambda\lambda}^E} \quad (1-7)$$

Typická piezoelektrická keramika dokáže přeměnit 30-75% dodávané energie na jinou. Při experimentálních měřeních bylo dosaženo až 90%. [6] Piezoelektrické materiály používané v systému aktivního potlačování vibrací jsou popsány v následující kapitole.

1.3.1 Piezoelektrické materiály používané v systémech potlačení vibrací

Dnes je nejrozšířenějším piezoelektrickým materiálem feroelektrická keramika PZT. Její chemický vzorec je $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, krystalová mříž v jednotlivých keramických zrnech má perovkitovskou strukturu. Keramika se upravuje malým množstvím příměsí (železo, niob, wolfram) pro ovlivnění materiálových vlastností a přizpůsobení dané aplikaci. Piezoelektrické keramiky jsou používány tam, kde je nutná

vysoká generující síla, přesné posunutí (deformace) a rychlá časová odezva. Dosahuje se u ní výrazně vyšších hodnot piezoelektrických koeficientů, než je tomu u krystalů. Další výhodou keramiky PZT je velký koeficient elektromechanické vazby k , který usnadňuje zpětnovazební řízení. Nevýhodou keramiky PZT je její křehkost a dlouhodobá nestabilita materiálových konstant způsobená samovolnou depolarizací výlisku v průběhu času. Depolarizace se zvětšuje s rostoucí teplotou. [30]

Piezoelektrický efekt byl nalezen také v polymerech. Většina polymerů ovšem nevykazuje velký náboj vznikající na elektrodách, dále jsou velmi nestabilní. Jedním ze stabilních polymerů je PVDF (polyvinylidifluorid) [20], používá se v aplikacích vyžadujících větší plochu a malou tloušťku aktuátoru. V současné době se používá jako aktuátor v systému potlačování hluku, díky jeho dobré akustické impedanci, malé hmotnosti, možnosti vytvoření různých tvarů a nízké ceně. Ovšem jeho piezoelektrické koeficienty jsou nižší než keramiky PZT. Vyrábí se v tenkých filmech tloušťky 10 až 760 μm [20]. Další využití našly ve sluchátkách a reproduktorech.

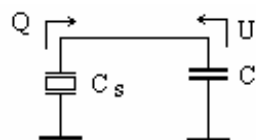
1.4 Řízení Youngova modulu v piezoelektrických materiálech

Hlavní myšlenkou nové metody potlačování vibrací je řízení elastické tuhosti piezoelektrických materiálů pomocí elektrického pole, kdy je využito přímého a nepřímého piezoelektrického jevu. V kapitole 1.4.1 jsou vysvětleny důvody pro použití záporné kapacity.

Piezoelektrický vzorek připojený k elektronickému obvodu se chová jako akční člen a detektor současně. Řízení elastické tuhosti (vyjadřujeme je pomocí komplexního Youngova modulu $Y = Y' + jY''$ [11]) piezoelektrického materiálu probíhá následujícím způsobem: náboj Q , který se objeví na elektrodách vzorku při působení mechanického napětí, je přiveden do paralelně připojené externí kapacity (viz obrázek 1-8). Tímto nábojem Q se kondenzátor nabije a mezi elektrodami kondenzátoru se vytvoří elektrické napětí

$$U = -\frac{Q}{C} \quad (1-8)$$

Toto napětí je přivedeno zpět na elektrody vzorku, což vyvolá díky převrácenému piezoelektrického jevu mechanickou deformaci, která se sečte s deformací vzniklou přiloženým mechanickým napětím díky Hookovu zákonu. Celková elastická deformace je součtem deformací vyvolané mechanickým namáháním a deformace způsobené elektrickým polem. [11]



Obrázek 1-8: Princip aktivního řízení elastických koeficientů, pomocí externí kapacity C připojenému k piezoelektrickému aktuátoru C_s .

Youngův modul, který je roven podílu přiloženému mechanickému napětí ku celkové deformaci, je dán poměrem kapacity externího kondenzátoru lomeno kapacitou piezoelektrického vzorku: $\alpha = C/C_s$. Poměr efektivní hodnoty Youngova modulu piezoelektrického vzorku s připojeným elektrickým obvodem (Y) a hodnoty Youngova modulu bez připojeného obvodu (Y_0) je dán vztahem [19]:

$$\frac{Y}{Y_0} = \frac{1}{1 - \frac{k^2}{1 + \alpha}} \quad (1-9)$$

Po úpravě :

$$Y = Y_0 \left(1 + \frac{k^2}{1 - k^2 + C/C_s} \right) \quad (1-10)$$

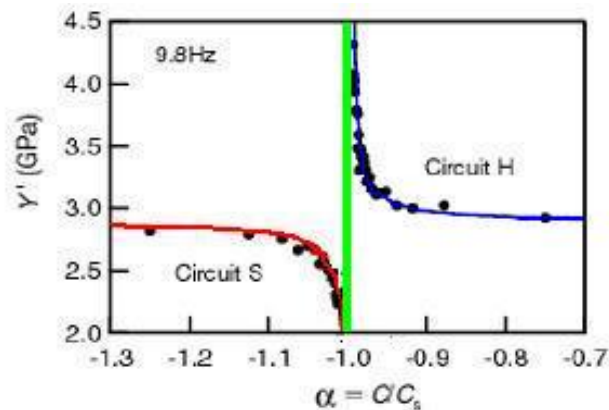
kde k je koeficient elektromechanické vazby ($0 < k < 1$). V závislosti na poměru hodnot kondenzátorů C a C_s existují tři základní režimy aktivního řízení efektivní dynamické hodnoty Youngova modulu:

$$Y < Y_0 \quad -\infty < C/C_s < -1 \quad (1-11)$$

$$Y < 0 \quad -1 < C/C_s < -(1 - k^2) \quad (1-12)$$

$$Y > Y_0 \quad -(1 - k^2) < C/C_s < \infty \quad (1-13)$$

[21] Na obrázku 1-9 jsou tyto režimy zobrazeny graficky.



Obrázek 1-9: Závislost Youngova modulu na poměru C/C_s , (materiál PZT byl měřen při frekvenci 9,8Hz), červenou barvou je naznačen stav zmenšení Youngova modul (obvod „S“ – potlačování vibrací), modrou barvou je naznačeno zvyšování Youngova modulu (obvod „H“ – potlačování hluku), zelenou barvou je označena oblast $Y < 0$ [15]

Pro potlačování vibrací a hluku se využívají pouze dva režimy (1-11 a 1-13). V případě, že je $C/C_s < -1$ je efektivní hodnota Y menší než hodnota Y_0 , tím se materiál stane měkký. Tento způsob řízení elastických vlastností se používá v systémech potlačování vibrací. V případě, že je $C/C_s > -1 + k^2$, efektivní hodnota Y je větší než původní hodnota Youngova modulu Y_0 , tím se materiál stane tvrdší. Tento režim je využíván v systémech potlačování hluku. [17]

1.4.1 Význam obvodu se zápornou kapacitou

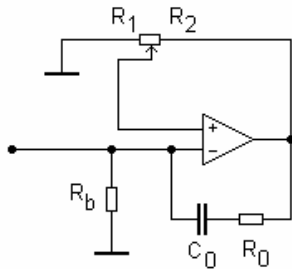
Pokud je na piezoelektrický materiál připojen kladný kondenzátor ($C > 0$), efektivní hodnota Youngova modulu Y se příliš neliší od hodnoty Y_0 . V případě připojení kondenzátoru se zápornou hodnotou ($C < 0$) je možné docílit významných změn hodnot tohoto materiálového parametru.

Pro úplné řízení elastických vlastností navrhl Dr. Munehiro Date aktivní zpětnovazební obvod, jehož kapacita je záporná. Z důvodů dvou režimů (viz kapitola 1.4) byli navrženy dva elektronické obvody označované jako „H“ (Hardering) a „S“ (Softening) (viz obrázek 1-10 a obrázek 1-11). Obvod „H“ se používá pro zvýšení Youngova modulu pro systémy potlačování vibrací. Je stabilní ve stavu $C/C_s > -1 + k^2$. Snížení Youngova modulu se dosahuje pomocí obvodu „S“ a proto se používá pro systémy potlačení vibrací, tento obvod je stabilní při $C/C_s < -1$. V obou případech je zvýšení, resp. snížení Youngova modulu velmi výrazné (asi 20krát).

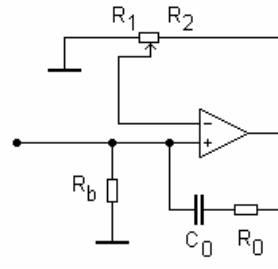
Obvody jsou charakterizovány vztahem:

$$C = -C_0 \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (1-14)$$

[14]



Obrázek 1-10: Obvod se zápornou kapacitou typu „S“

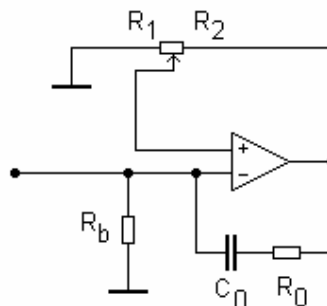


Obrázek 1-11: Obvod se zápornou kapacitou typu „H“

1.5 Obvod „S“

V této kapitole budou rozebrány vlastnosti elektronického obvodu se zápornou kapacitou, který se používá pro řízení elastických vlastností piezoelektrického materiálu. Jeho frekvenční závislost záporné kapacity (viz kapitola 1.5.3) a také celková kapacita obvodu při použití vyrovnávacího odporu R_b (viz kapitola 1.5.2).

Výhodou systému potlačování vibrací, které využívají piezoelektrické materiály jako senzory a aktuátory současně, je velmi jednoduchá elektronika při současném dosažení dobrých výsledků. Pro potlačování vibrací se používá negativní kapacita typu „S“ (viz obrázek 1-12), která snižuje hodnotu Youngova modulu. Tento obvod je proudově regulovatelný. [19]



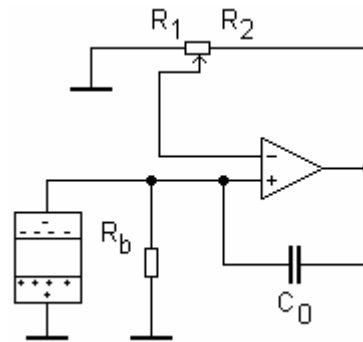
Obrázek 1-12: Obvod se zápornou kapacitou typu „S“

Ke stavbě obvodu negativní kapacity se používají operační zesilovače. Piezoelektrický element je připojen na invertující vstup OZ. Do OZ vstupuje záporné napětí vznikající při stlačení elementu. Díky invertujícímu zapojení operačního zesilovače je výstupní napětí otočené o 180° , proto je náboj vznikající na kondenzátoru

C_0 kladný. Po vodiči je „posílán“ tento náboj na piezoelektrický aktuátor, kde se využívá nepřímý piezoelektrický jev. Celková kapacita obvodu je vyšší, než je hodnota kondenzátoru C_0 ve zpětné vazbě.[13]

1.5.1 Výpočet kapacity

Postup výpočtu kapacity obvodu je shodný pro oba obvody, jak pro obvod „H“ (viz obrázek 1-11) tak pro obvod „S“ (viz obrázek 1-12). Pouze je rozdíl ve směru proudu, který je vytvořen nábojem na piezoelektrickém vzorku.



Obrázek 1-13: Obvod „S“ připojený na piezoelektrický element

Z definice operačního zesilovače se výstupní napětí počítá ze vztahu: $U_{out} = G(U_{IN}^+ - U_{IN}^-)$, kde U_{IN}^+ a U_{IN}^- jsou vstupní napětí do neinvertujícího, respektive do invertujícího vstupu operačního zesilovače. Veličina G značí zesílení samotného operačního zesilovače ($G \gg 10^5$). Protože je operační zesilovač považován za ideální, napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem je rovno nule $U_{IN}^+ - U_{IN}^- = 0$. Vstupní napětí U_{IN}^+ a U_{IN}^- je považováno za velmi malé v porovnání s výstupním napětím. Proto volíme napětí stejné.

$$U_{IN}^+ = U_{IN}^- = U_{IN} \quad (1-15)$$

$$U_{OUT} = G \cdot U_{IN} \quad (1-16)$$

Po vytvoření náboje dQ na elektrodách piezoelektrického vzorku, se vytvoří proud I_2 protékající kondenzátorem C_0 , což vyvolá změnu výstupního napětí odpovídající:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{OUT} = - \frac{dQ}{C_0} \quad (1-17)$$

Vyvolaná změna na výstupu se projeví na invertujícím vstupu operačního zesilovače, díky připojenému odporovému děliči ($R_1 - R_2$):

$$dU_{IN} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OUT} \quad (1-18)$$

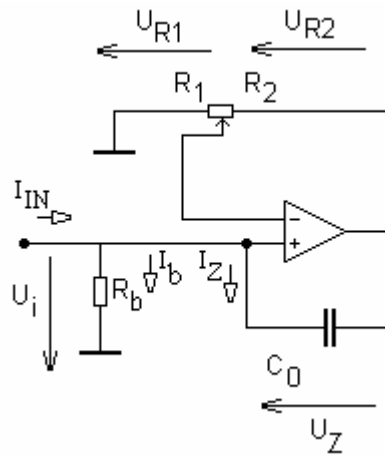
Ze vztahů 1-17 a 1-18 lze vypočítat celkovou kapacitu:

$$C = \frac{dQ}{dU_{IN}} = -C_0 \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (1-19)$$

Výraz 1-19 je celková kapacita obvodu, a protože se jedná o zápornou hodnotu je nazýván **negativní (záporná) kapacita**.

1.5.2 Výpočet kapacity s přidaným odporem R_b

Odpor R_b se do obvodu zapojuje k piezoelektrickému senzoru sériově nebo paralelně dle zvoleného materiálu, na vyrovnání ztrátového úhlu kapacity piezoelektrického aktuátoru. Je nutné aby se kapacita piezoelektrického elementu rovnala kapacitě elektronického obvodu (až na znaménko), v reálné i imaginární části.



Obrázek 1-14: Obvod „S“ doplněný o vyrovnávací odpor R_b

O připojení odporu R_b paralelně nebo sériově rozhodují vlastnosti piezoelektrického materiálu. Pro výpočet vstupní impedance obvodu (viz obrázek 1-14) platí následující

$$\begin{aligned} I_{IN} &= I_b + I_Z \\ \frac{U_{R2}}{U_{R1}} &= \frac{R_2}{R_1} = \frac{U_Z}{U_i} \\ U_Z &= I_Z \cdot Z_0 \\ U_i &= I_b \cdot R_b \end{aligned} \quad (1-20)$$

Vstupní impedance obvodu je vypočítána ze vztahu

$$Z_{IN} = U_i / I_{in} \quad (1-21)$$

Veličina U_i je považována za vstupní proměnou. Vstupní impedance:

$$Z_{IN} = \frac{R_1^2 \cdot R_b}{R_1^2 + C_0^2 \cdot R_2^2 \cdot R_b^2 \cdot \omega^2} - i \cdot \frac{C_0 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b^2 \cdot \omega}{R_1^2 + C_0^2 \cdot R_2^2 \cdot R_b^2 \cdot \omega^2} \quad (1-22)$$

Výraz 1-22 neobsahuje pouze imaginární část impedance jako v případě bez odporu R_b , ale i reálnou část. Protože reálná část impedance odpovídá imaginární části kapacity, je možné volit hodnotu R_b tak, aby byl kompenzován ztrátový úhel kapacity piezoelektrického aktuátoru.

Při volbě reálného kondenzátoru C_0 , jeho impedance je rovna: $Z_0 = R_0 - i \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_0}$, kde R_0 je hodnota sériového odporu náhradního obvodu reálného

kondenzátoru. Výslednou vstupní impedanci vypočítáme z rovnic 1-20 a 1-21:

$$Z_{IN} = \frac{R_1 \cdot R_b (R_1 + C_0^2 \cdot R_0 (R_2 \cdot R_b + R_1 \cdot R_0) \cdot \omega^2)}{R_1^2 + C_0^2 (R_2 \cdot R_b + R_1 \cdot R_0)^2 \cdot \omega^2} + j \cdot \frac{C_0 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b^2 \cdot \omega}{R_1^2 + C_0^2 \cdot (R_2 \cdot R_b + R_1 \cdot R_0)^2 \cdot \omega^2} \quad (1-23)$$

Pokud by měla být impedance čistě imaginárního charakteru hodnota kondenzátoru C_0 by měla mít hodnotu:

$$C_0 = \pm \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{-R_2 R_b R_0 \omega^2 - R_1 R_0^3 \omega^2}} \quad (1-24)$$

Z předchozích výrazů (1-24 a 1-22) vyplývá, že má impedance obvodu komplexní charakter a také závislost na frekvenci vstupního napětí, odpor R_b tedy negativně ovlivňuje zápornou kapacitu obvodu.

1.5.3 Frekvenční závislost negativní kapacity

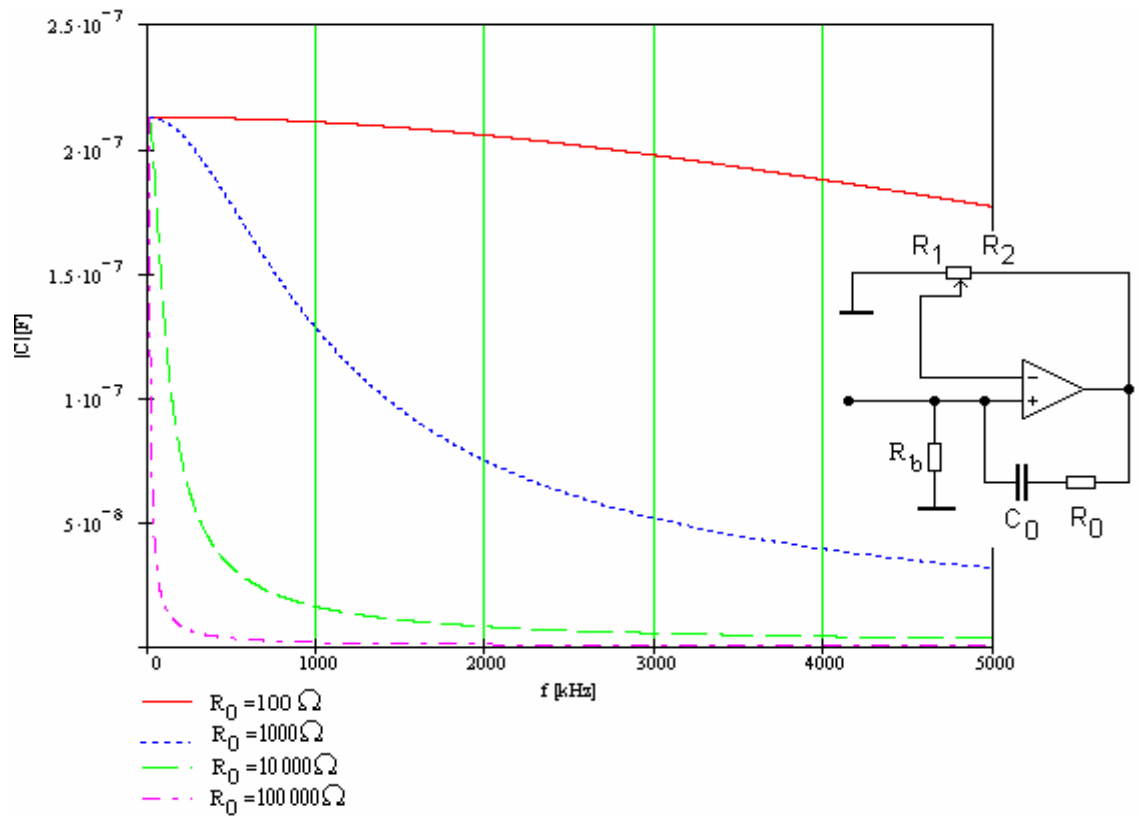
Grafy zobrazují frekvenční závislost obvodu negativní kapacity s proměnnou hodnotou sériového odporu kondenzátoru.

Na obrázku 1-15 je bráno v úvahu, že kondenzátor ve zpětné vazbě je reálná impedance (sériové zapojení kondenzátoru a odporu). Celková hodnota obvodu se zápornou kapacitou je ovlivněna hodnotou odporu R_0 . Položíme impedanci ideálního kondenzátoru C^* rovnu reálné hodnotě impedance.

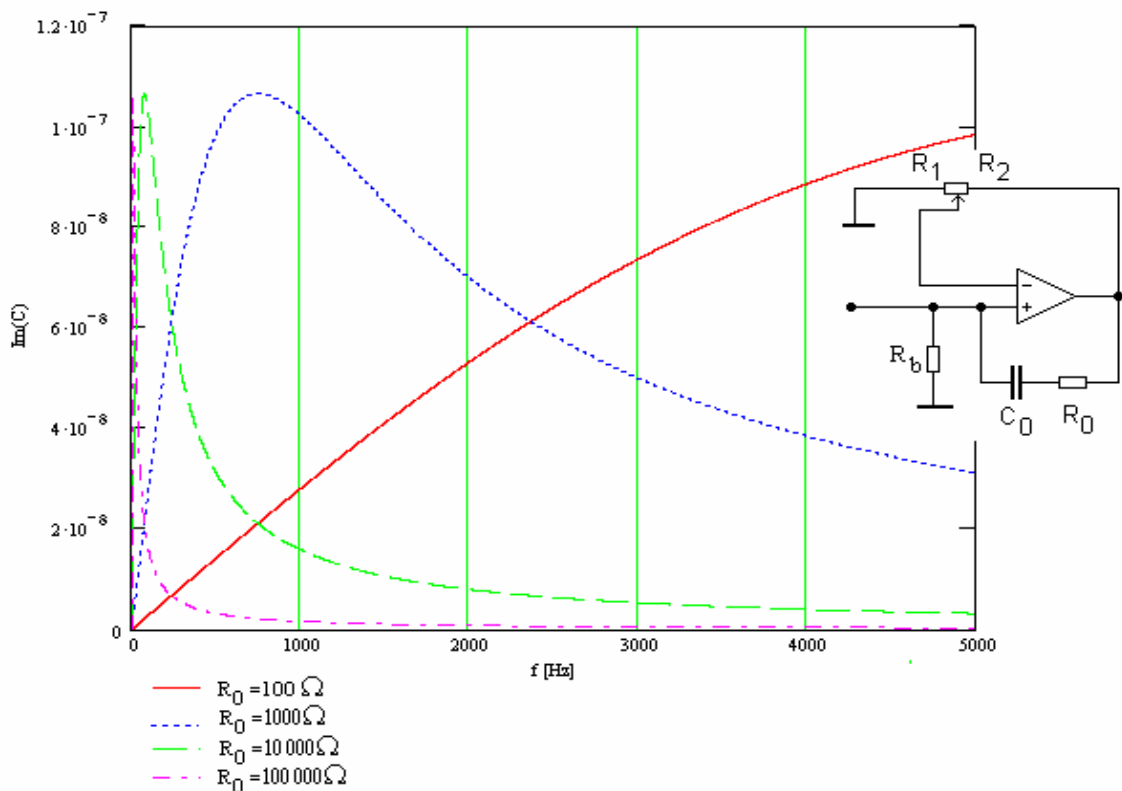
$$\frac{1}{j\omega C^*} = R_0 - j \frac{1}{\omega C_0} \quad (1-25)$$

Z tohoto vztahu je vypočítán ideální kondenzátor:

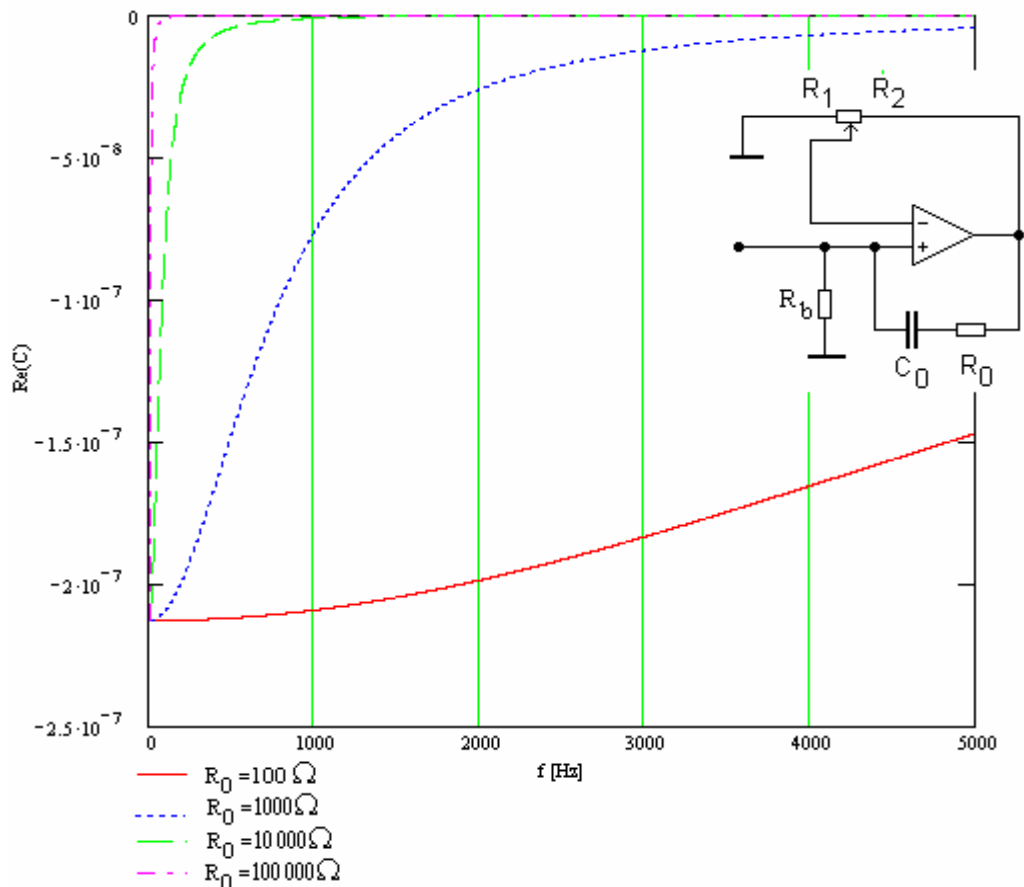
$$C^* = \frac{C_0}{1 + j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot R_0} \quad (1-26)$$



Obrázek 1-15: Frekvenční závislost kapacity zpětnovazebního obvodu typu „S“ pro hodnoty $R_1=R_2$, $C_0=213\text{nF}$, $R_b=100\Omega$ a pro různé hodnoty odporu R_0 .



Obrázek 1-16: Frekvenční závislost imaginární části záporné kapacity, pro $R_1=R_2$, $C_0=213\text{nF}$, $R_b=100\Omega$ a pro různé hodnoty odporu R_0 .

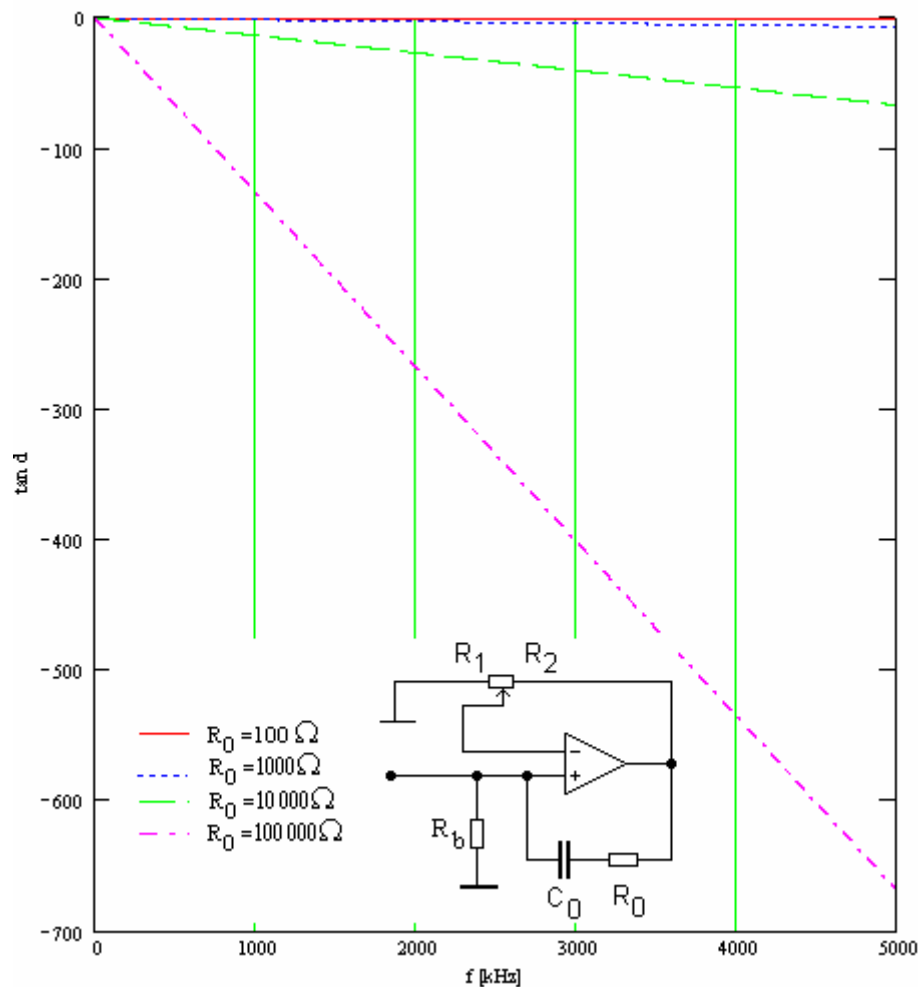


Obrázek 1-17: Frekvenční závislost reálné části kapacity záporného kondenzátoru, pro $R_1=R_2$, $C_0=213\text{nF}$, $R_b=100\Omega$ a pro různé hodnoty odporu R_0

Zobrazení ztrátového činitele $\tan \delta$ pro různé hodnoty vnitřního obvodu kondenzátoru C_0 je zobrazeno na obrázku 1-18. V každém kondenzátoru dochází při provozu ke ztrátám vznikajícím v dielektriku. Všechny ztráty v kondenzátoru se zahrnují v náhradním zapojení do ztrátového odporu R_v paralelně připojeného k jalovému kapacitnímu odporu X_c . [29] Ztrátový činitel se posuzuje jako měřítko kvality obvodu při určitém kmitočtu. Ztrátový činitel $\tan \delta$ je tangens doplňkového úhlu k fázovému posuvu φ . [25] Vyjadřuje se vztahem:

$$\tan \delta = \frac{X_c}{R_v} \quad (1-27)$$

Převrácená hodnota ztrátového činitele se nazývá činitel jakosti Q . [29]



Obrázek 1-18: Zobrazení závislosti ztrátového činitele $\tan \delta$ na frekvenci f pro $R_1=R_2$, $C_0=213\text{nF}$, $R_b=100\Omega$ a pro různé hodnoty odporu R_0 . Projevuje se výrazný vliv odporu R_0 .

1.6 Problematické aspekty realizace

Při realizaci tohoto systému se vyskytuje několik problémů. Jedním z nich je nutnost shody reálných a imaginárních částí kapacity piezoelektrického vzorku a externího kondenzátoru, což představuje základní kritérium pro správnou funkci systému pro potlačení vibrací, zejména v širokém frekvenčním pásmu. Dalším problémem je výběr operačního zesilovače. Je nutné si uvědomit, že při výpočtu obvodu je považována za ideální, ale reálné vlastnosti jsou v některých případech výrazně vzdáleny od ideálního operačního zesilovače.

Oba tyto aspekty jsou analyzovány v následujících odstavcích.

1.6.1 Požadavek shody reálných a imaginárních částí

Kapacita piezoelektrického vzorku C_s a kapacita zpětnovazebního obvodu C jsou komplexní veličiny. Proto je také poměr $\alpha = C/C_s$ komplexní veličina. Protože je požadováno zvětšení poměru Youngova modulu Y/Y_0 , hodnota poměru $\alpha = C/C_s$ se musí blížit hodnotě -1 (viz obrázek 1-9). Proto se musí rovnat reálné a imaginární části kapacity vzorku C_s a zpětnovazebního obvodu. Piezoelektrický materiál a zpětnovazební obvod jsou frekvenčně závislé. Díky různým materiálovým vlastnostem je frekvenční závislost kapacit piezoelektrického vzorku a zpětnovazebního elektronického obvodu různá. Proto je možné dosáhnout poměru $\alpha = C/C_s = -1$ pouze pro jednu frekvenci f_0 . Z obrázku 1-9 vyplývá, že poměr C/C_s musí být ve velice úzké vzdálenosti od hodnoty -1 , protože v této oblasti dochází k velkým změnám Youngova modulu. Je možné ho zvětšovat, resp. zmenšovat Youngův modul 10 až 20 krát.

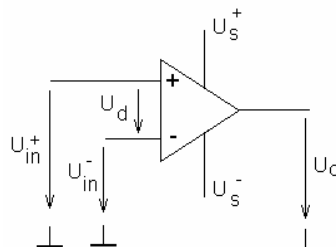
Změna poměru Y/Y_0 silně ovlivňuje citlivost potlačovaných vibrací, jak je demonstrováno na následujícím příkladu. Pokud označíme změnu kapacity zpětnovazebního obvodu $\Delta C = C_s(1 - k_{31}^2) + C$, pro malé změny ΔC je přibližně $Y/Y_0 \approx k_{13}^2 \cdot C_s / \Delta C$. Při poklesu přenosu o 20dB se zvětší Youngův modul desetkrát. Pak je relativní změna kapacity zpětnovazebního obvodu $\delta C = \Delta C / C_s$, vyplývající z hodnot $k_{31} = 0,1$ musí být menší než 0,1%. [14] Proto jsou v současné době tyto obvody schopné potlačit vibrace pouze v úzkém frekvenčním pásmu. Šířka frekvenčního pásma je dána takovou frekvenční oblastí, ve které jsou shodné reálné a imaginární složky kapacity piezoelektrického prvku a obvodu se zápornou kapacitou.

1.6.2 Vlastnosti operačních zesilovačů

Ve zpětnovazebním obvodu systému pro potlačování vibrací je nejdůležitější součástí operační zesilovač. Ovšem jeho vlastnosti nejsou ideální. V tomto zapojení je nejdůležitější počítat s frekvenčně závislým zesílením, vstupním proudovým offsetem.

První operační zesilovač zkonstruoval v roce 1938 G. A. Philbrick. Původně byl určen k vytváření matematických operací (sčítání, odčítání) na analogovém počítači, kdy jednotlivé operace bylo nutné simulovat elektrickými veličinami, napětím a proudem. [9] Dnes za operační zesilovač je považován za stejnosměrný zesilovač s velkým zesílením a malým vlastním rušením schopný stabilní činnosti v uzavřené

zpětnovazební smyčce. [1] Díky svým výborným vlastnostem, možnosti přizpůsobit si jeho parametry dané aplikaci a nízké ceně, výrazně ovlivnil konstrukci nečíslíkových systémů. Operační zesilovač je nelineární aktivní elektronický obvod, ale je možné zavést linearizaci, která ovlivní výsledný systém jenom při výpočtu chyb. [1]



Obrázek 1-19: Schématická značka OZ. Směr signálu je v operačním zesilovači naznačen jeho značkou

U_d – rozdílové (diferenční) napětí	U_o – jmenovité výstupní napětí
U_{IN}^+ – vstupní napětí na neinvertujícím vstupu	U_s^+ – kladné napájecí napětí
U_{IN}^- – vstupní napětí na invertujícím vstupu	U_s^- – záporné napájecí napětí

Ideální operační zesilovač lze považovat za ideální zdroj napětí řízený napětím, má nulový vstupní proud, nekonečnou vstupní impedanci, nulovou výstupní impedanci, nekonečné zesílení naprázdno. Dále pak je ideální operační zesilovač bez omezení lineární, kmitočtově nezávislý, bez parazitních proudů a úbytků napětí. [9] Přestože ideální operační zesilovač neexistuje, využívají se tyto vlastnosti pro výpočet obvodu. V úvahu je třeba brát pouze šířku frekvenčního pásma reálného operačního zesilovače. Zesílení operačního zesilovače je definováno jako: „záporně vzatý poměr změny výstupních napětí naprázdno a změny diferenčního vstupního napětí při nulovém souhlasném vstupním napětí“. Při této definici je zesílení kladné číslo. [1]

$$A_u = - \frac{\Delta u_o}{\Delta u_d} \quad (1-28)$$

Pro napájení operačních zesilovačů se používají dvě vzájemně opačná napětí, ve většině případů se používá +15V a –15V (U_s^+ , resp. U_s^-). Není nutné používat dvojici napájecích napětí, ale toto zapojení v mnohém zjednodušuje funkčnost operačního zesilovače. Zátěž připojená na výstup operačního zesilovače může být aktivní i pasivní. Výrazná přenosová vlastnost operačních zesilovačů je jejich velká citlivost na rozdíl napětí na obou vstupech a zároveň necitlivost k jejich absolutní velikosti. Operační zesilovače jsou součástí obvodu jehož celkovou funkčnost určuje vnější zpětnovazební

obvod, je možné aby obsahoval aktivní i pasivní elektronické a elektromechanické součástky [1].

V literatuře [10] lze nalézt nevystižnější definici funkce operačních zesilovačů:

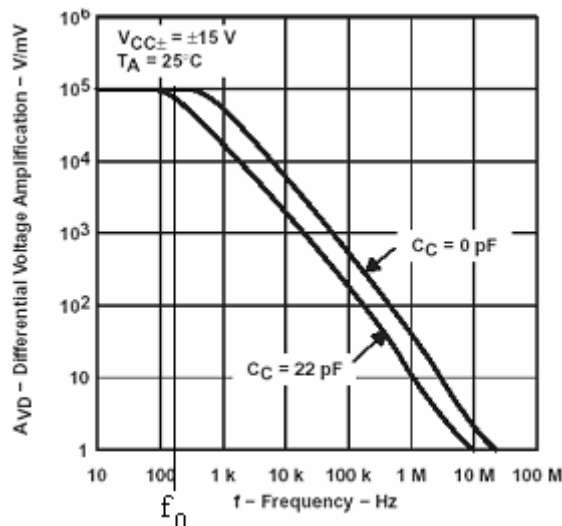
1. **Operační zesilovač se snaží udržet stejné napětí pomocí zpětné vazby na obou vstupech** – změna na jednom ze vstupů se díky zpětné vazbě projeví i na druhém vstupu, projevuje se u operačních zesilovačů mimo saturaci.
2. **Pokud to tak není, výstupní napětí má polaritu kladnějšího ze vstupů** – pravidlo se projevuje u operačních zesilovačů v saturaci, kdy na jednom ze vstupů je větší napětí (v absolutní hodnotě) a výstupní napětí získá „znaménko“ tohoto vstupu. [12]

Chování operačních zesilovačů v jakémkoliv zapojení lze zjednodušit právě do těchto dvou pravidel. [10] Běžně se ale funkce operačních zesilovačů vysvětluje pomocí nulových vstupních proudů a tím i nulovém diferenciálním napětí U_d .

Amplitudová charakteristika operačního zesilovače je znázorněna na obrázku 1-20, obě osy jsou znázorněny v logaritmické stupnici, frekvence f v dekadách a zesílení A v decibelech. Většina operačních zesilovačů má zesílení závislé na frekvenci, které se aproximuje vztahem:

$$A(jf) = \frac{A_o}{1 + j \frac{f}{f_0}} \quad (1-29)$$

Používá se pro dynamickou analýzu celkového zapojení operačních zesilovačů.



Obrázek 1-20: Amplitudová charakteristika operačního zesilovače NE5534

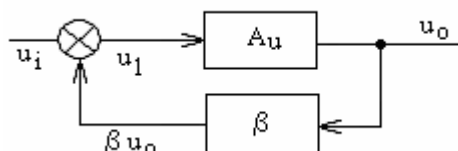
f_0 – mezní výkonový kmitočet – největší kmitočet nezkráceného sinusového výstupního napětí jmenovité amplitudy U_o , při jeho dosažení vzroste chyba zesílení na -3dB [22]

V současné době existuje mnoho typů operačních zesilovačů, které se od sebe liší nepatrnými detaily. Použitelnost této elektronické součástky pro danou aplikaci se posuzuje podle mezních hodnot uváděných v katalogích výrobcem. Za standardní operační zesilovače lze považovat nejlevnější typy vyráběné ve větších sériích. [9] Pro systém potlačování vibrací není možné použít tyto nejlevnější součástky, protože mají příliš nízké zesílení a malou frekvenční šířku.

1.6.3 Stabilita obvodu „S“

V této kapitole je zodpovězeno, zda je navržený systém piezoelektrického vzorku a zpětnovazebního obvodu s operačním zesilovačem stabilní a kdy. Velkou nevýhodou tohoto obvodu je operační zesilovač, který má obecně tendenci nacházet se v nestabilním stavu.

Stabilita obvodů s operačními zesilovači úzce souvisí se zpětnou vazbou. Protože má tento systém tendenci ke generování autooscilací, při kterých aplikace ztratí původní smysl, je nutné analyzovat parametry systému, při kterých k autooscilacím nebude docházet. [1] Zpětná vazba snižuje celkové zesílení a operační zesilovač se stává méně závislý na zesílení otevřené smyčky. Při matematickém řešení stability obvodu zjednodušíme některé okolnosti, nelze do něj započítat všechny nelinearity obvodu.



Obrázek 1-21: Formální model zpětnovazebního systému

Na obrázku 1-21 je zobrazen formální model zpětnovazebního systému. Platí vztahy:

$$\bar{u}_1 = u_i + \bar{\beta} \cdot \bar{u}_o \text{ a } \bar{u}_o = \bar{A} \cdot \bar{u}_1 \quad (1-30),$$

kde $\bar{\beta}$ je činitel zpětné vazby (dává míru přenosu z výstupu na vstup). Ze vztahu 1-29 lze určit celkový zisk systému se zpětnou vazbou:

$$\bar{A} = \frac{\bar{u}_o}{u_i} = \frac{\bar{A}u}{1 - \bar{\beta} \cdot \bar{A}u} \quad (1-31),$$

Aby byl systém stabilní musí platit: $1 - \bar{\beta} \cdot \bar{A}u \neq 0$, z toho plyne podmínka pro zisk zpětnovazební smyčky:

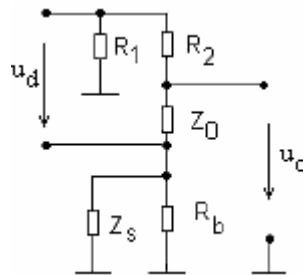
$$\bar{\beta} \cdot \bar{A}u \neq 1 \quad (1-32)$$

Tento výraz se nazývá **Nyquistovo kritérium stability** [2], používá se pro návrh oscilátorů.

Pro řešení Nyquistova kritéria je nutné stanovit zpětnovazební poměr. Výpočet této veličiny je podle úplného náhradního zapojení dost obtížné, proto je použito zjednodušení. Zpětnovazební poměr je poměr diferenčního vstupního napětí OZ u_d k jeho výstupnímu napětí u_o

$$\beta = \frac{u_d}{u_o} \quad (1-33)$$

Zpětná vazba je často pasivní a tedy jeho zesílení zpravidla menší než 1. Zpětnovazební poměr je podstatný, rozhoduje o stabilitě a o dynamických chybách. [1] Čím větší je rozdíl $1 - \bar{\beta} \cdot \bar{A}u$ (tedy čím menší je zesílení $1/\beta$), tím širší je přenášené pásmo a tím více se blíží OZ se zpětnou vazbou k nestabilnímu stavu. V zapojení s napět'ovým vstupem a napět'ovým výstupem je převrácený zpětnovazební poměr $1/\beta$, blízký nebo rovný ideálnímu zesílení $|GI|$.



Obrázek 1-22: Výpočet zpětnovazebního poměru

Při výpočtu zpětnovazebního poměru je operační zesilovač považován za ideální, jsou zanedbány pasivní vlastnosti, výsledný zpětnovazební obvod je roven:

$$\beta = \frac{R_1}{R_2 + R_1} - \frac{Z_0}{\frac{R_b + Z_s}{R_b \cdot Z_s} + Z_0} \quad (1-34)$$

V případě úvahy reálných vlastností operačních zesilovačů, je zesílení nahrazeno vztahem:

$$Au = \frac{A_0}{1 + j \cdot \frac{f}{f_0}} \quad (1-35),$$

kde A_0 je stejnosměrné napěťové zesílení, f_0 je kmitočet prvního zlomu při poklesu zesílení A_0 o 3dB, pro moderní operační zesilovače nad úrovní 0dB je pouze jeden zlom. [2] Jsou zde zanedbány některé veličiny, jako vstupní rušivé napětí a proud, případně napěťová a proudová symetrie. [1] Ve zpětné vazbě je použit reálný kondenzátor, tedy sériová kombinaci kondenzátoru a odporu $Z_0 = R_0 - j1/\omega C_0$.

Na obrázku 1-20 je znázorněno zesílení otevřené smyčky, které se většinou zobrazuje jako 6dB/oktáva. Fáze operačního zesilovače dosahuje maximálně 120°. Pokud fáze dosáhne 180°, vytvoří se záporná zpětná vazba. Veličinu označenou f_t nazýváme tranzitní kmitočet, je definován vztahem $f_t = A_0 \cdot f_0$. Chyby, které provázejí se aproximace skutečného operačního zesilovače lineárním modelem, se zvětšují se vstupním a s výstupním vybuzením. [1]

Z Nyquistova kritéria stability lze získat impedanci Z_0 na mezi stability, tedy impedanci kondenzátoru ve zpětné vazbě elektronického zpětnovazebního obvodu. Ve stavu, kdy systém neustále kmitá a kmitý jsou netlumené. [7] Na Nyquistovu grafu křivka prochází bodem (1,0j) (viz Obrázek 1-23).

$$Z_{0_{nest}} = \frac{(-j + C_s(R_b + R_s)\omega)((R_1 + R_2)\omega - j(R_1 - A_0R_1 + R_2)\omega_0)}{R_b(-j + C_sR_s\omega)((R_1 + R_2)\omega - j(R_1 + R_2 + A_0R_2)\omega_0)} \quad (1-36)$$

Reálná část impedance na mezi stability odpovídá odporu.

$$R_{0_{nest}} = \frac{(R_1 + R_2)^2 \omega^2 \cdot (-1 - C_s^2 R_s (R_b + R_c) \cdot \omega^2)}{R_b (1 + C_s^2 R_s^2 \omega^2) ((R_1 + R_2)^2 \omega^2 + (R_1 + R_2 + A_0 R_2)^2 \omega_0^2)} + \frac{A_0 C_s (R_1 + R_2)^2 R_b \omega^2 \omega_0 + ((-1 + A_0 R_1 - R_2)(R_1 + R_2 + A_0 R_2)(1 + C_s^2 R_s (R_s + R_b)))}{R_b (1 + C_s^2 R_s^2 \omega^2) ((R_1 + R_2)^2 \omega^2 + (R_1 + R_2 + A_0 R_2)^2 \omega_0^2)} \quad (1-37)$$

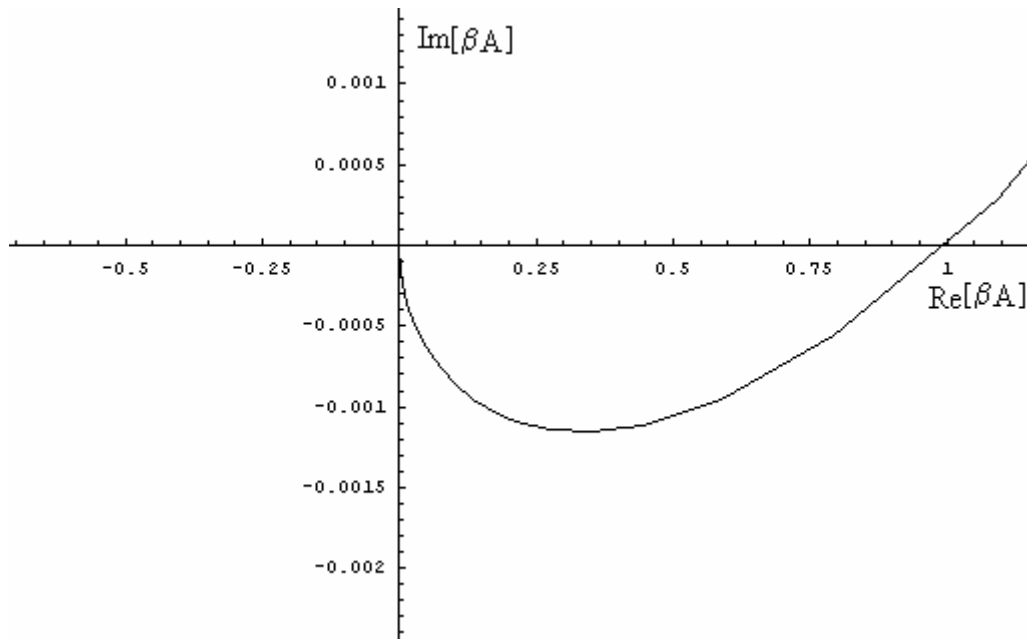
Imaginární část impedance na mezi stability je rovna impedanci kondenzátoru:

$$\text{Im}[Z_{0_{nest}}] = 1/\omega C_0 \quad (1-38)$$

Ze vztahu 1-38 lze vypočítat vztah pro mezní hodnotu kondenzátoru:

$$C_{0_{nest}} = \frac{R_b (1 + C_s^2 R_s^2 \omega^2) ((R_1 + R_2)^2 \omega^2 + (R_1 + R_2 + A_0 R_2)^2 \omega_0^2)}{\omega (-C_s (R_1 + R_2)^2 R_b \omega^2 - A_0 (R_1 + R_2^2) \omega (1 + C_s^2 R_s (R_b + R_s) \omega^2) \omega_0 + C_s ((-1 + A_0) R_1 - R_2) (R_1 + R_2 + A_0 R_2) R_b \omega \omega_0^2)} \quad (1-39)$$

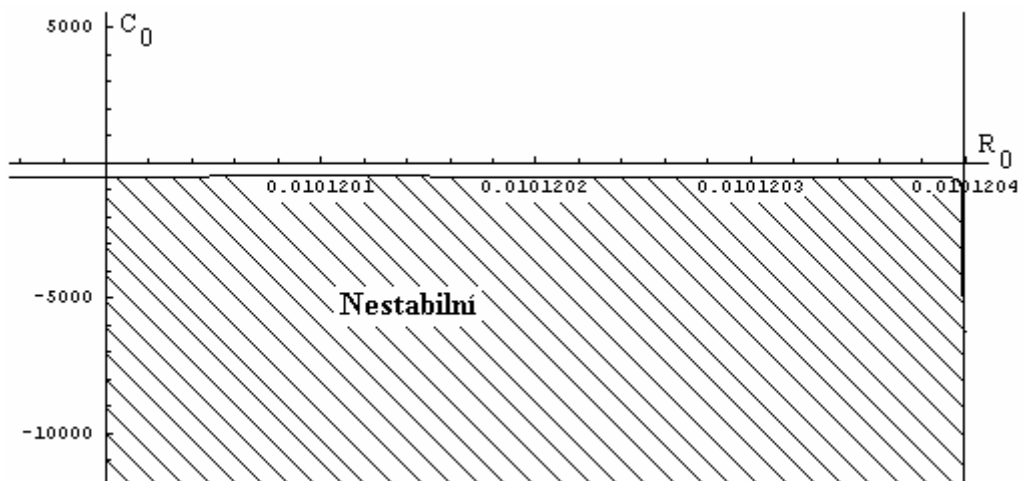
Výrazy 1-37 a 1-39 jsou hodnoty reálného odporu, resp. kondenzátoru na mezi stability. Nyquistova charakteristika prochází bodem (1,0j), tedy Nyquistovým bodem. [7]



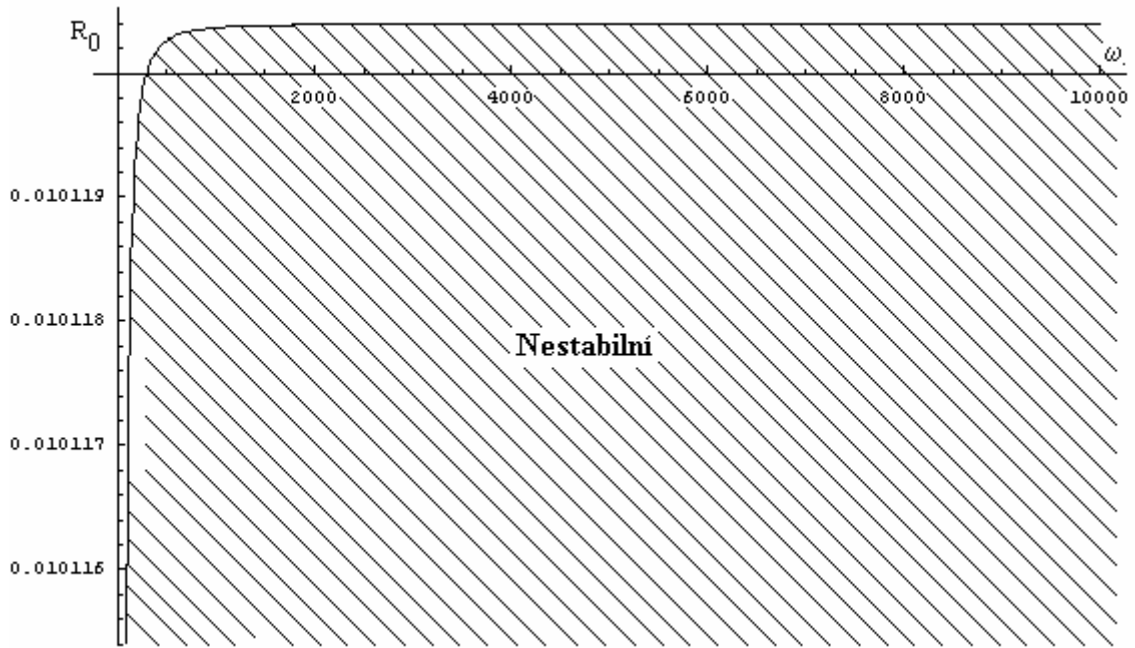
Obrázek 1-23: Nyquistův graf, zobrazení meze stability obvodu se zápornou zpětnou vazbou na mezi stability, proto prochází bodem $(1,0j)$, hodnoty součástek jsou reálné:

$$R_s=8302,89\Omega, C_s=7,099\mu F, R_1=R_2=50000k\Omega, A_0=10^5, f_t=150\text{Hz}, R_b=100\Omega$$

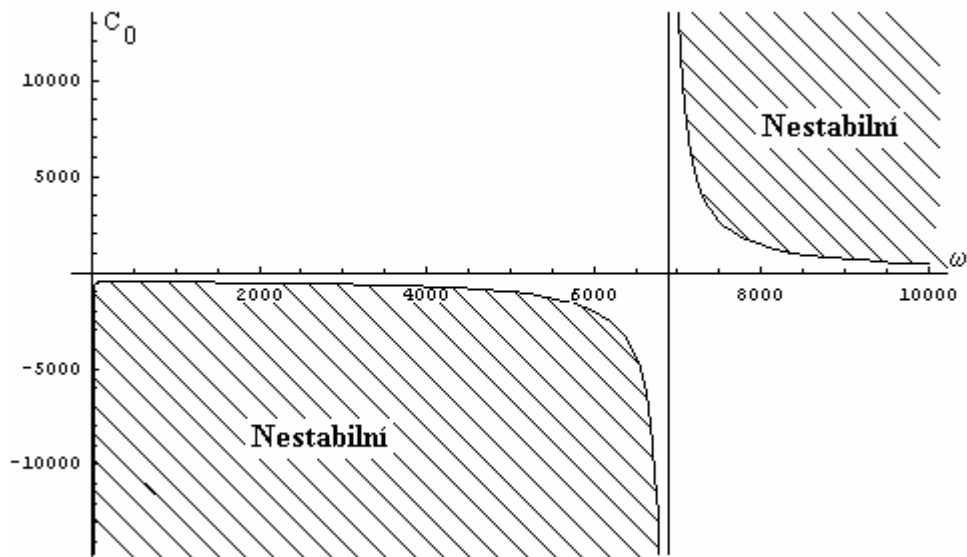
Při realizaci zpětnovazebního obvodu typu „S“ je piezoelektrický materiál vybírán dle jednotlivé aplikace. Zatímco vhodný kondenzátor je možné vybrat pomocí závislosti odporu R_0 na kondenzátoru C_0 (viz obrázek 1-24).



Obrázek 1-24: Zobrazení závislosti R_0 na C_0 s proměnnou úhlovou rychlostí, $R_s=8302,89\Omega, C_s=7,099\mu F, R_1=R_2=50000k\Omega, A_0=10^5, f_t=150\text{Hz}, R_b=100\Omega$, frekvence f je v rozmezí 0 až 5kHz



Obrázek 1-25: Zobrazení závislosti R_0 na úhlové rychlosti ω , $R_s=990.099\Omega$, $C_s=6.88\mu F$, $R_1=R_2=50000k\Omega$, $A_0=10^5$, $f_i=150\text{Hz}$, frekvence f je v rozmezí 0 až 10kHz



Obrázek 1-26: Závislost kondenzátoru C_0 na úhlové rychlosti ω , $R_s=990.099\Omega$, $C_s=6.88\mu F$, $R_1=R_2=50000k\Omega$, $A_0=10^5$, $f_i=150\text{Hz}$, frekvence f je v rozmezí 0 až 10kHz

Z analýzy zpětnovazebního obvodu typu „S“ vyplývají rovnice 1-36, 1-37 a 1-39, které popisují parametry obvodu na mezi stability. Obrázky 1-24, 1-25 a 1-26 zobrazují parametry obvodu C_0 a R_0 na mezi stability pro další pevně zvolené parametry R_1 , R_2 , C_s , R_s , A_0 a f_0 použité v systému potlačení vibrací, který byl realizován při řešení této diplomové práce (viz kapitola 2). Hodnoty C_s a R_s jsou dány použitým piezoelektrickým aktuátorem z keramiky PZT, a hodnoty A_0 a f_i jsou dány použitým

operačním zesilovačem NE5534. Pomocí potenciometrů R_1 a R_2 je kontrolována celková hodnota záporné kapacity zpětnovazebního obvodu. Ze závislostí na obrázcích 1-24 až 1-26 vyplývá, volba pevných parametrů zpětnovazebního obvodu poskytuje dostatečný prostor pro volbu hodnot zpětnovazebního kondenzátoru C_0 a R_0 . Díky tomu jsme se při nastavování parametrů systému pro potlačování vibrací neobjevily problémy se stabilitou celého systému.

Z obrázků 1-24, 1-25 a 1-26 vyplývá, že některé hodnoty součástek jsou záporné, ty není možné použít díky reálným vlastnostem. Dalším omezením jsou reálné hodnoty kondenzátoru pohybující se od μF až po nF. Stabilitu celého obvodu lze také ovlivnit poměrem odporů R_1 a R_2 . Proto je možné „naladit“ obvod i při nevhodné volbě kondenzátoru pro poměr $R_1/R_2 = 1$. Charakteristiky se změni při jiném poměru odporů R_1 a R_2 .

2 Praktická část

V této kapitole je rozebrána volba reálných součástek pro zpětnovazební obvod typu „S“ (viz kapitola 2.1), a také ověření jeho vlastností v testovacím obvodu (viz kapitola 2.2). Poslední krokem je připojení zpětnovazebního obvodu k namáhaného piezoelektrickému vzorku (viz kapitola 2.2).

2.1 Výběr jednotlivých součástek

Zapojení obvodu negativní kapacity typu „S“ je na obrázku 1-14. Funkčnost tohoto obvodu lze výrazně ovlivnit výběrem jednotlivých součástek.

2.1.1 Zdroj

Jako všechny elektronické zařízení i toto zapojení potřebuje napájení. Po rozboru jsou vlastností spínaného napájecího zdroje: vstup zdroje je síťové napětí (230V) a tím i frekvence 50Hz, výstupní napětí duální +15V a -15V stejnosměrných, jako nejběžněji používané napájecí napětí operačních zesilovačů. Dalším požadavkem bylo přídavné výstupní napětí +5V, v případě dalšího rozšíření obvodu o elektronické součástky nebo součástky využívající Booleovu algebru [18].

Z předcházejících požadavků byl zvolen spínaný zdroj LPT25 od firmy ASTEC. Jedná se o 25W spínaný zdroj, se třemi výstupy (+15V, -15V, +5V), maximální proud ze zdroje 3A. Zdroj má ochranu proti zkratování. Nevýhoda tohoto obvodu je nutnost zatížení výstupního napětí 5V, proto je nutné připojit 20Ω výkonový odpor. [16] V případě připojení zátěže na napětí +5V, je tento odpor zbytečný a je nutné ho odstranit.

2.1.2 Operační zesilovač

Výběr operačního zesilovače byl nejdůležitější položkou celého elektronického obvodu pro systém potlačování vibrací. Operační zesilovač v tomto zapojení má mít následující vlastnosti: velké napěťové zesílení (A_u) a velké frekvenční pásmo (Bandwith). Dalším parametrem byla vysoká tranzitivní frekvence f_t . Díky zvolenému zdroji má mít operační zesilovač duální napájení $\pm 15V$. V neposlední řadě bylo nutné uvažovat také pouzdro, aby bylo možné v případě zničení integrovaného obvodu OZ (např. na piezoelektrickém materiálu se generuje příliš velké napětí) ho jednoduše vyměnit. [18] Nejvhodnějším pouzdem je DIP8 (nebo DIP14 – se dvěma operačními zesilovači v jednom integrovaném obvodu).

Jako operační zesilovač byl zvolen typ NE5534, protože má velké zesílení ($A_u=10^5$) a vysokou tranzitivní frekvenci $f_i=150$ Hz, Dále pak má duální napájení v rozmezí ± 3 až ± 18 V. [22]

2.1.3 Buffer

Buffer je proudový zesilovač, který bylo nutné zařadit za operační zesilovač, protože jeho výstupní proud byl velmi nízký a neumožnil by dostatečně nabýt kondenzátor C_0 . Výběr bufferu byl omezen jeho rychlostí a proudovým zesílením. Bylo vyžadováno napájecí napětí ± 15 V, aby odpovídalo napájecí napětí zdroje. Dalším parametrem bylo pouzdro integrovaného obvodu, bylo vyžadováno pouzdro DIP8 nebo DIP 14.

Jako buffer byl zvolen OPA633 od firmy Texas Instruments s výstupní proudem 100mA a rychlostí 2500V/ μ s. S napájecím rozsahem ± 2 až ± 20 V [23], což umožňuje použít zdroj LPT25.

2.1.4 Napěťové sledovače

V požadovaných místech měření obvodu bylo nutné použít operační zesilovače v zapojení napěťového sledovače pro galvanické oddělení. Při připojení sond osciloskopu by byl obvod ovlivněn připojenou impedancí sondy. Z těchto podmínek vyplývá, že zvolený operační zesilovač musí mít velkou vstupní impedanci a napájení $+15$ a -15 V.

Byl zvolen LF356 od firmy Texas Instruments. Vstupní impedance je $10^{12}\Omega$, napájení je ± 15 V až ± 22 V.

2.1.5 Odpor v obvodu

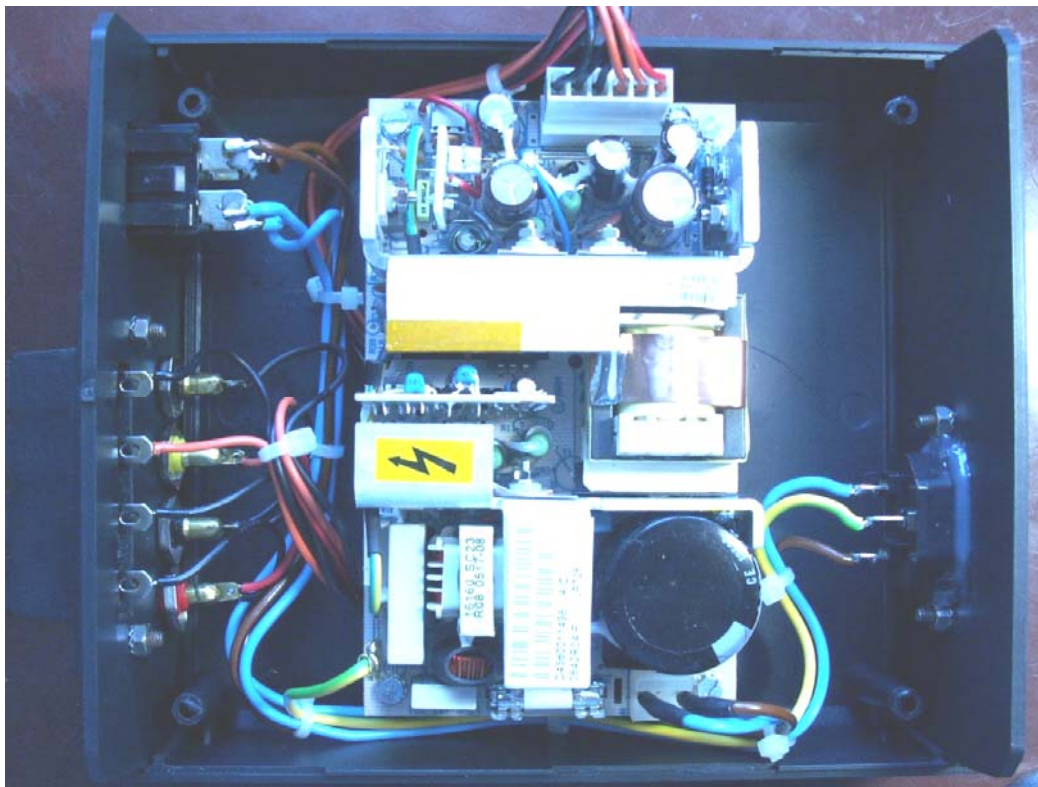
Odpor v obvodu měly hodnotu maximální $100\text{k}\Omega$ pro „hrubé“ ladění obvodu, pro jemnější ladění bylo nutné zvolit odpory o maximální hodnotě 100Ω . Pro jednoduché naladění obvodu jsou zvolené 25-ti otáčkové odpory.



Obrázek 2-1: Použité potenciometry v zapojení, $100\text{k}\Omega$ a 100Ω

2.2 Popis nepájivého pole

Prvním krokem realizace bylo vytvoření zdroje napájení. Tedy vytvoření konektorů pro připojení síťového napájení a také výstupních konektorů (pro jednoduchou obsluhu byly zvoleny 4 repro konektory a 4 „banánky“). Aby bylo možné zdroj LPT25 použít případně i v jiných aplikacích, byla deska tištěného spoje se zdrojem napájení umístěna do krabičky a všechny kabely připojeny pomocí faston konektorů. Bylo přihlédnuto k případné jednoduché výměně desky tištěného spoje se samotným zdrojem, tedy použití různých konektorů na vstupy a výstupy.

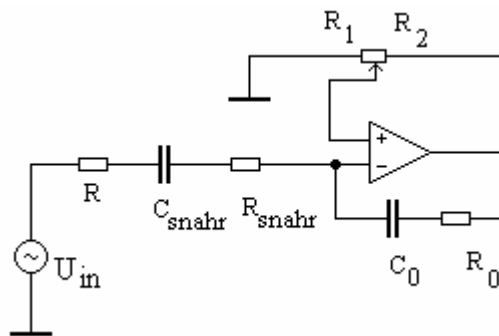


Obrázek 2-2: Zdroj napájení $\pm 15V$, $+5V$ a \perp umístěný do krabičky



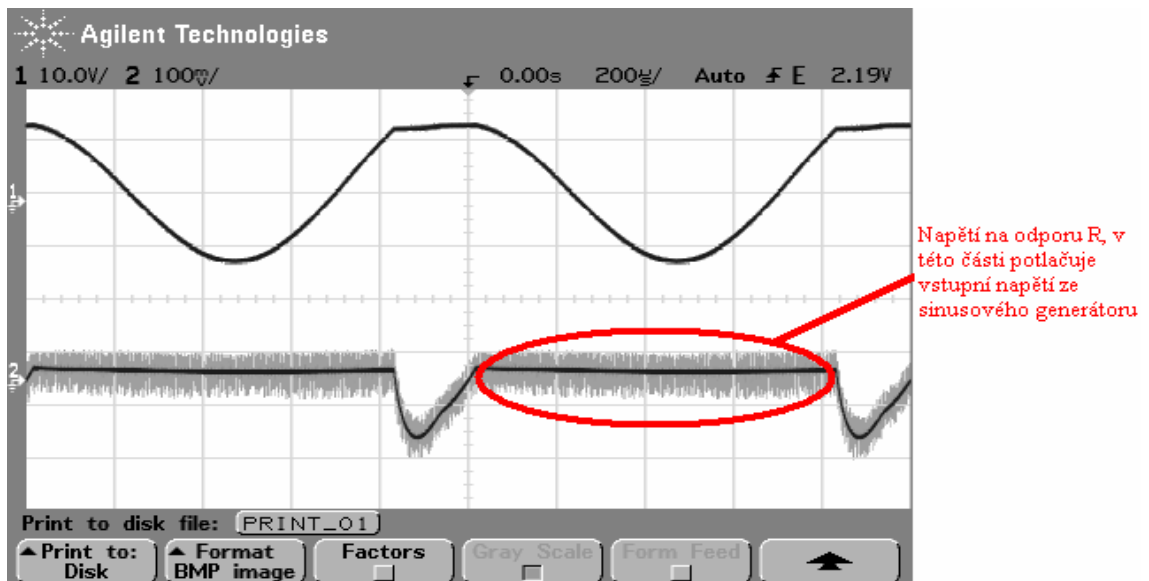
Obrázek 2-3: Čelní panel zdroje napájení se čtyřmi reprokonektory a čtyřmi banánky pro jednoduché připojení k napájenému obvodu

Dalším bodem bylo sestavení zpětnovazebního obvodu na nepájivé pole a ověření jeho funkčnosti. V tomto případě byl mechanicky namáhaný piezoelektrický materiál nahrazen generátorem sinusového signálu a sériovou kombinací kondenzátoru s odporem (viz obrázek 2-4)



Obrázek 2-4: Obvod pro ověření funkčnosti obvodu se zápornou kapacitou v základním zapojení.

Pokud obvod pracuje ideálně, napětí na sériové kombinaci a na obvodu záporné kapacity mají stejnou hodnotu, pouze fázově otočené o 180° . Při nezapojení filtrovacích kondenzátorů na piny napájecího napětí, dochází k zvlnění výstupního napětí na operačním zesilovači. Tím také dochází ke zkreslení signálu na odporu R .

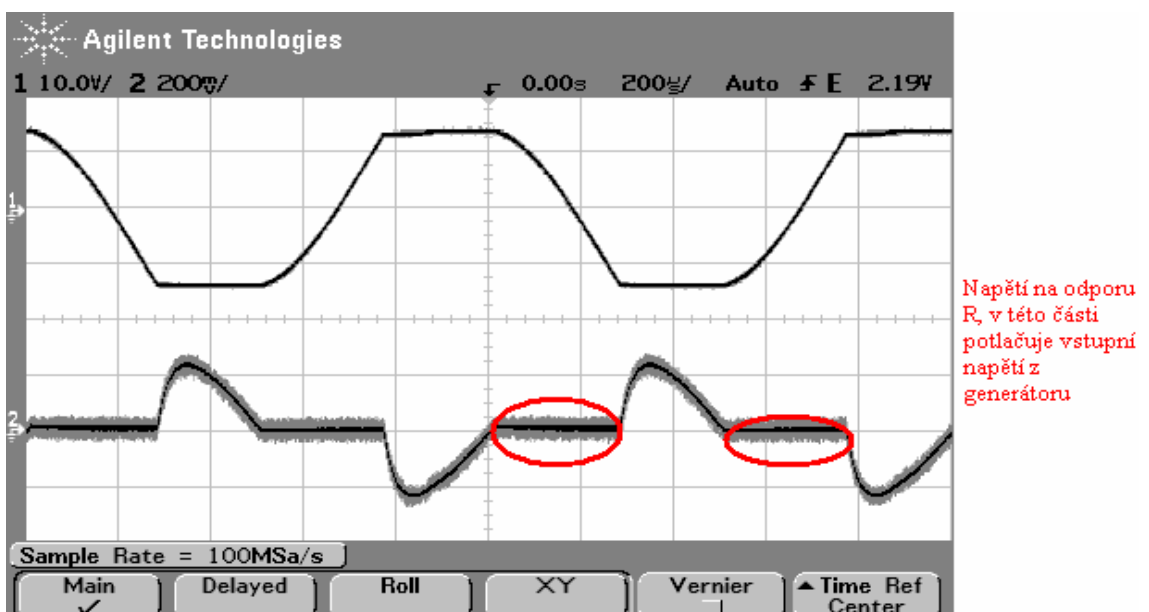


Obrázek 2-5: Výstupní napětí operačního zesilovače (Chanel 1) a napětí na odporu R (Chanel 2) z osciloskopu, nastaveno pomocí poměru R_2/R_1 , vstupní napětí – sinusoida

$$U_{in}=2V, U_R=0,248V$$

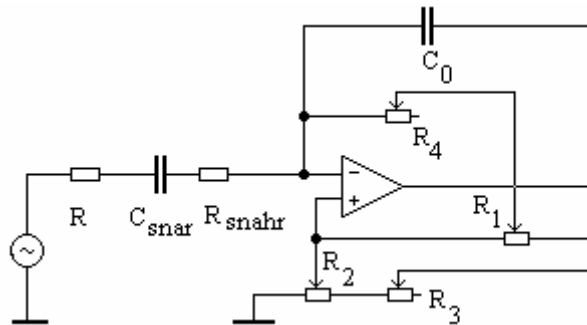
Výstupní napětí na odporu R je na obrázku 2-5, v části vyznačené červeně je potlačováno vstupní napětí z generátoru. Výstupní signál obsahuje stejnosměrnou složku o velikosti 18mV. Toto je způsobeno vstupním proudovým offsetem operačního zesilovače.

Při zvětšení vstupního napětí vyššího než 2,9V se obvod dostává do saturace. To se projevilo zkreslením výstupního signálu operačního zesilovače a zmenšením oblasti potlačování vibrací.



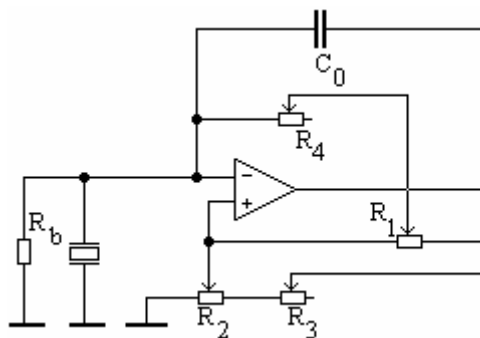
Obrázek 2-6: Výstupní napětí operačního zesilovače (Chanel 1) a napětí na odporu R (Chanel 2) z osciloskopu, vstupní napětí – sinusoida $U_{in}=10V, U_R=0,752V$

Zapojení podle obrázku 2-4 potlačuje vstupní napětí z generátoru, ale výstupní napětí má stejnosměrnou složku. Proto bylo zvoleno rozšířené zapojení na obrázku 2-7. Toto zapojení nemá na výstupu stejnosměrnou složku napětí na výstupu.

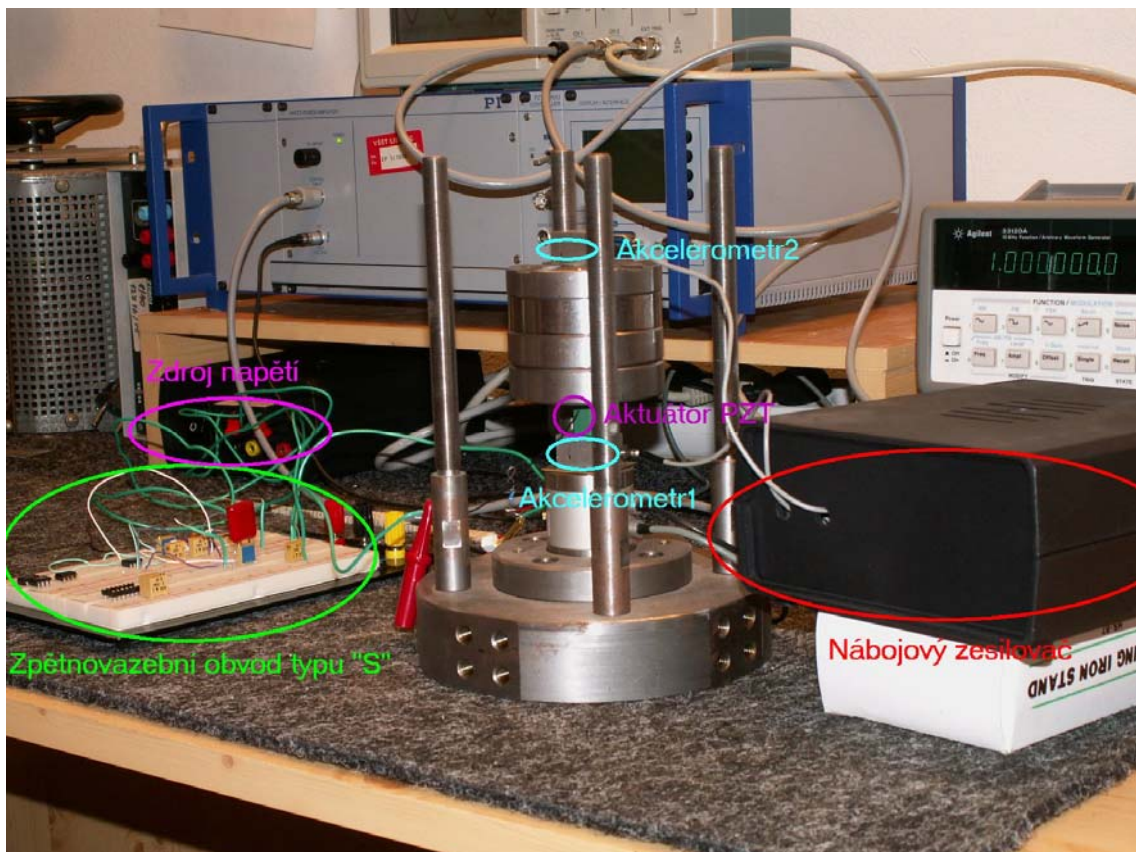


Obrázek 2-7: Schéma zpětnovazebního obvodu v rozšířeném zapojení s potlačením stejnosměrné složky napětí na výstupu.

Při tomto zapojení se výrazně neprojevoval proudový offset operačního zesilovače jako v předcházejícím základním zapojení. Tento obvod umožňoval potlačit vstupní signál až do 4V bez projevu saturace operačního zesilovače. Při připojení rozšířeného zapojení obvodu „S“ z obrázku 2-7 k piezoelektrickému materiálu namáhaném mechanickým napětím v měřicím přípravku dle obrázku 2-9.

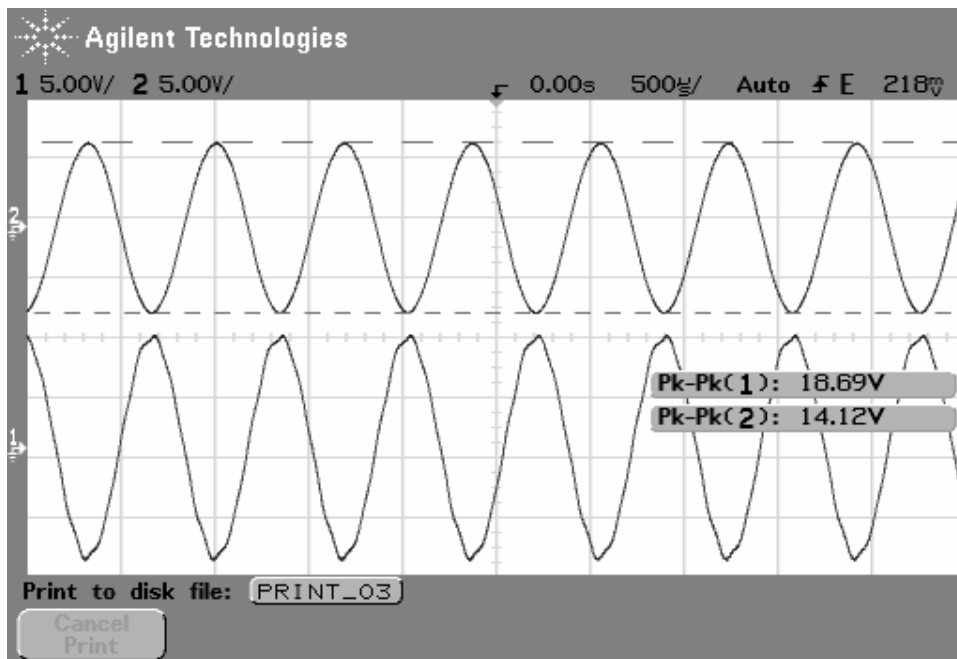


Obrázek 2-8: Obvod záporné kapacity typu „S“ v rozšířeném zapojení připojený k namáhanému piezoelektrickému materiálu PZT



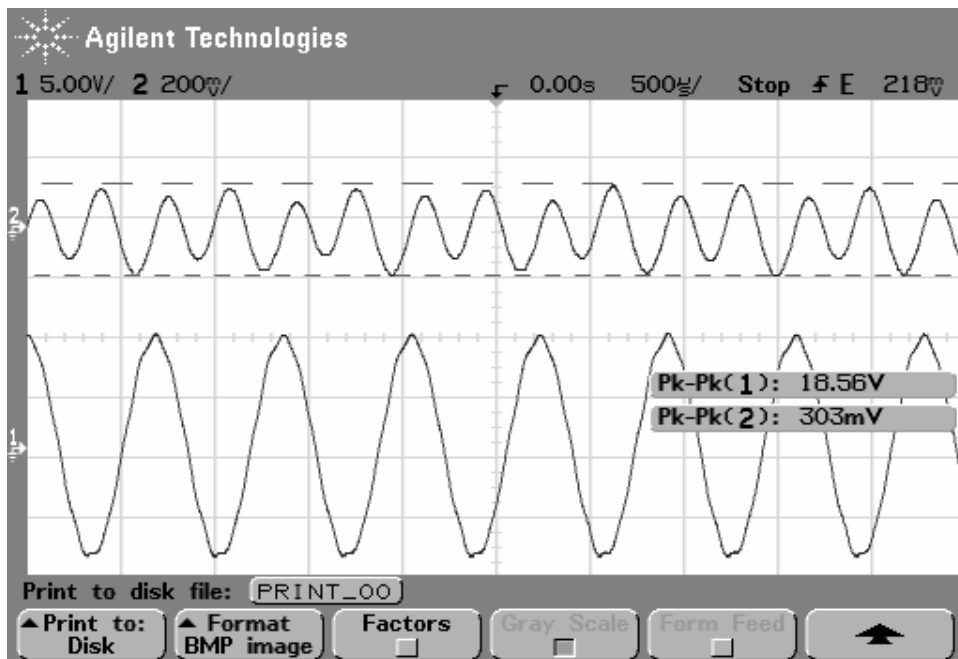
Obrázek 2-9: Rozšířené zapojení zpětnovazebního obvodu pro otláčování vibrací k měřicí soustavě

V tomto zapojení bylo velmi těžké obvod „naladit“, protože se projevovaly teplotní změny piezoelektrického elementu a přechodové odpory jednotlivých součástek umístěných na desce nepájivého pole. Hodnota potenciometrů se nastavuje pomocí šroubku, i přitlačení potenciometru při nastavování ovlivňovalo naladitelnost obvodu. V případě naladění obvodu na frekvenci 1kHz došlo k výraznému potlačení, ale po hodinovém měření se tato frekvence posunula na 1080Hz. Měřicí soustava byla vytvořena v práci. [26]



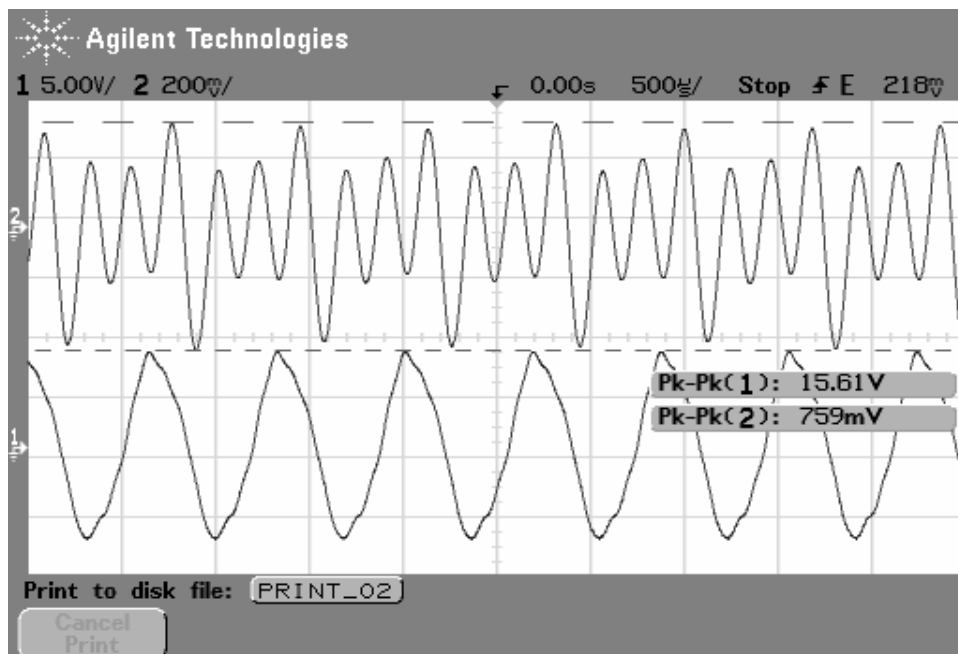
Obrázek 2-10: Napětí na akcelerometru 1 (chanel 1) a na akcelometru 2 (chanel 2) při vypnutém elektronickém zpětnovazebním obvodu (není zapnuté napájení operačního zesilovače)

Na obrázku 2-10 je znázorněn piezoelektrický element, na který působí mechanické namáhání, ale není připojen ke zpětnovazebnímu obvodu. Amplituda vibrací z akcelerometru 2 (chanel 2) je menší díky tlumení způsobené pasivním tlumením přenosu vibrací skrz piezoelektrický element. Jedná se o potlačení o 5dB. Po připojení zpětnovazebního elektronického obvodu záporné kapacity k piezoelektrickému aktuátoru PZT došlo k potlačení vibrací (viz obrázek 2-11). Obvod byl naladěn na frekvenci 1465Hz, protože původní zvolená frekvence 1000Hz byla příliš blízká rezonanční frekvenci měřící soustavy. Z měření vyplynulo, že došlo k poklesu o 35,44dB (v dalším měření bylo dosaženo poklesu 35,91dB) absolutně. Výstupní signál měl potlačenou pouze jednu frekvenci, na které byly namodulovány vyšší harmonické. V tomto případě se jednalo o pokles o 55,82dB (dalším měření bylo dosaženo poklesu o 56,17dB).



Obrázek 2-11: Zpětnovazební obvod je zapnutý (zapnuté napájení operačního zesilovače), $C_0=482nF$

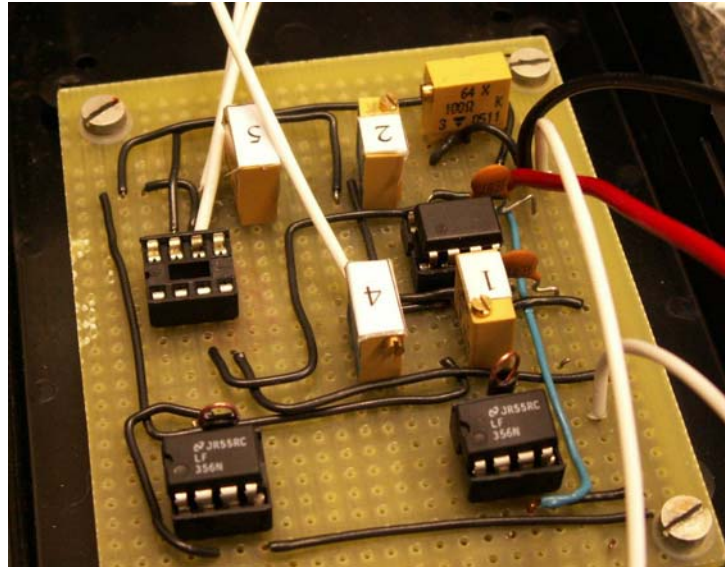
V současné době je velkým problémem tohoto systému potlačování širšího spektra frekvencí. Tedy při trojúhelníkovém vstupní signálu nedošlo k potlačení vyšších harmonických (viz obrázek 2-11).



Obrázek 2-12: Vibrace mají trojúhelníkový signál (chanel 1), z hodnot na akceleometru je patrné, že je potlačena vstupní frekvence ($f=1440Hz$)

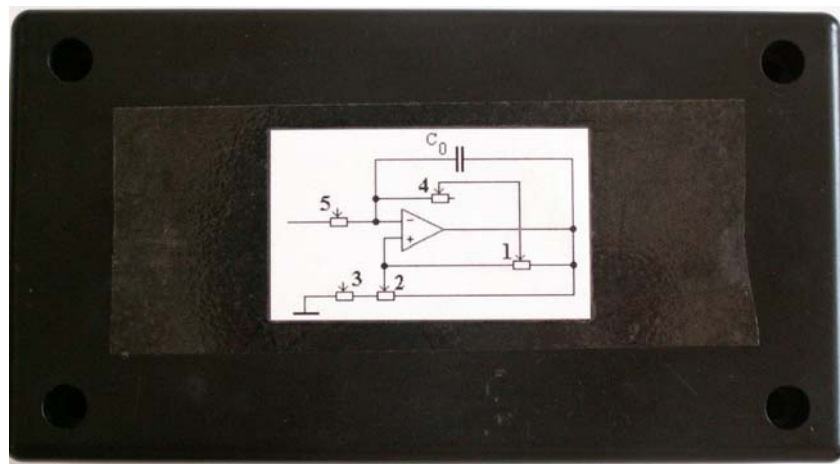
2.3 Zapojení na pájivém poli

Protože bylo nutné při realizaci dbát na možné následující změny, obvod byl realizován na pájivé pole. V tomto zapojení byly dosaženy stejné hodnoty jako u testovacího zapojení (viz kapitola 2.2). Neprojevily se tolik přechodové jevy jako u zapojení na nepájivém poli. K měření proudů a napětí slouží dva operační zesilovače s vysokým vstupní odporem a rychlou odezvou [27], které jsou zapojené jako napěťové sledovače.



Obrázek 2-13: Zapojení obvodu záporné kapacity na pájivém poli

Celý obvod byl umístěn do rozebíratelné krabičky s označením jednotlivých potenciometrů. Na čelní panelu bylo vyznačeno pouze základní zapojení.



Obrázek 2-14: Rozebíratelná krabička do níž je umístěn obvod záporné kapacity na pájivém poli

Závěr

V diplomové práci byly rozebrány dosavadní výsledky výzkumu systému potlačování vibrací využívajícím metodu elektrického řízení elastických vlastností piezoelektrického aktuátoru. Bylo teoreticky analyzováno chování zpětnovazebního obvodu pro řízení efektivní hodnoty Youngova modulu piezoelektrického prvku a realizovány návrhové prostředky pro analýzu stability systému pro potlačení vibrací ve formě programu pro softwarové produkty Mathematica a Mathcad. Na základě měření dielektrických vlastností dostupného piezoelektrického aktuátoru a s pomocí vytvořených návrhových prostředků byl proveden návrh systému pro potlačení přenosu vibrací. Tento systém byl realizován a byla ověřena jeho funkčnost.

V průběhu práce byly analyzovány kritické podmínky pro funkčnost celého systému: nutnost shody reálných a imaginárních částí piezoelektrického prvku a zpětnovazebního elektronického obvodu záporné kapacity. Tato podmínka může být zatím splněna pouze pro jednu potlačovanou frekvenci. Další nevýhodou zpětnovazebního elektronického obvodu jsou reálné vlastnosti jednotlivých součástek. Toto se převážně projevuje u operačního zesilovače v konečném napěťovém zesílení a jeho frekvenční závislosti. Operační zesilovač bylo také nutné doplnit na výstupu proudovým zesilovačem, bufferem, protože výstupní proud je nízký a nevytvoří dostatečně velký náboj na kondenzátoru C_0 . Bez jeho použití se operační zesilovač lehce dostane do saturace. Další omezení bylo způsobeno použitím reálného kondenzátoru ve zpětné vazbě, jedná se o sériovou kombinaci kondenzátoru s odporem. Teplotní změny piezoelektrické keramiky se projevily rozladěním obvodu a následným velmi komplikovaným opětovným naladěním. Základní zapojení potlačuje vibrace stejně jako složitější, ale výstupní signál obsahuje stejnosměrnou složku, která se odstraní právě složitějším zapojením.

V základním zapojení je stabilita obvodu ovlivněna piezoelektrickým materiálem a poměrem odporů R_1 a R_2 . V rozšířeném zapojení je stabilita obvodu nejvíce ovlivněna odpory označenými R_2 a R_4 .

Zlepšení zpětnovazebního obvodu může nastat výběrem kvalitnějšího operačního zesilovače a bufferu. Tím se ovšem změní cenová dostupnost celého obvodu. Operační zesilovač by měl mít vyšší zesílení a vyšší transitivity frekvenci. Buffer s vyšším proudovým zesílením, aby bylo možné zvýšit náboj vytvářený na kondenzátoru C_0 ve zpětné vazbě. Zlepšení obvodu je také možné připojením několika

paralelních kondenzátorů ve zpětné vazbě. Tím dojde k potlačení několika frekvencí najednou, počet potlačených frekvencí se rovná počtu připojených kondenzátorů. [19] Toto vylepšení je omezeno reálně vyráběnými kondenzátory. Další zlepšení lze dosáhnout připojením potenciometrů řízených počítačem.

Použitá literatura

- [1] DOSTÁL, J., *Operační zesilovače*, Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1981, 480s
- [2] PUNČOCHÁŘ, J., *Operační zesilovače v elektronice*, 5.vydání, Praha, BEN – technická literatura, 2002, 496s, ISBN 80-7300-059-8
- [3] ZELENKA, J., *Piezelektrické rezonátory a jejich použití*, Praha, ACADEMIA – nakladatelství Československé akademie věd, 1983, 260s
- [4] Přednášky z předmětu Elektrické převodníky fyzikálních veličin prof. Jaroslav Nosek
- [5] NYE, J.F., *Physical Properties of Crystals, Their Representation by Tensors and Matrices*, Vydání 21., Oxford University Press, Oxford, 2004, ISBN 0-19-851165-5
- [6] APC International LTD., *Piezoelectricity* [online]. [Cit. 7.2.2006] Dostupné z: http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/index.html
- [7] Přednášky z předmětu Základy spjitého řízení, Josef Janeček
- [8] IKEDA, T., *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford University Press, New York, 1990, ISBN 0-19-856339-6
- [9] NEUMANN,P., UHLÍŘ,J., *Elektronické obvody*, Vydavatelství ČVUT, Praha,
- [10] Elliot R., *Amplifier Basics - How Amps Work* [online]. [Cit 21.2.2006] Dostupné z: <http://sound.westhost.com/amp-basics.htm>
- [11] DATE, M., KUTANI, M., SAKAI, S., *Electrically controlled elasticity utilizing piezoelectric coupling*, Journal of Applied Physics, 15.1.2000
- [12] OKUBO, T., KODAMA, H., KIMURA, K., YAMAMOTO, K., *Sound-insulation and Vibration-isolating Efficiency od Piezoelectric Materials Connected with Negative Capacitance Circuits*, Journal of Applied Physics,
- [13] FUKADA, E., DATE, M., KIMURA, K., OKUBO, T., KODAMA, H., MOKRÝ,P., YAMAMOTO,K., *Sound isolation by piezoelectric polymer films connnected with negative capacitance circuits*,
- [14] MOKRÝ, P. FUKADA, E., YAMAMOTO, K., *Noise shielding system utilizing a thin piezoelectric membrane and elsticity control*, Journal of applied physics, 28.4.2003
- [15] FUKADA,E., DATE, M., KODAMA, H., *Recent Trend on Application of Piezoactive Polymers to Acoustics – Low Frequency Sound Barrier*, Kobayasi Institute of Physical Research, Tokyo, Japan
- [16] datasheet LPT25 od firmy ASTEC

- [17] P. Mokřý (soukromé sdělení)
- [18] T. Sluka (soukromé sdělení)
- [19] KODAMA, H., OKUBO, T., DATE, M., *Sound Reflection and Absorption by Piezoelectric Polymer Films*, 2002
- [20] VINOGRADOV, A., SCHMIDT V., TUTHILL, G., BOHANNAN, G., *Damping and electromechanical energy losses in the piezoelectric polymer PVDF* [online], [Cit. 8.3.2006] dostupné z: http://www.physics.montana.edu/eam/publications/2004_10_MechMat_36_10.pdf
- [21] MOKRÝ, P. *Habilitační práce*, Liberec
- [22] datasheet NE5534 [CD-ROM], [Cit. 8.3.2006]
- [23] datasheet opa633 [CD-ROM], [Cit. 8.3.2006]
- [24] HERZAN, *Vibration and Acoustic Isolation*, [online], [Cit. 25.4.2006], dostupné z: <http://www.herzan.com/herz3.htm>
- [25] LÁNÍČEK, R., *Elektronika – obvody – součástky – děje*, Praha, BEN – technická literatura, 1998, 480s, ISBN 80-86056-25-2
- [26] MIKOLANDA, T., *Diplomová práce*, Liberec, 2003, Diplomová práce na Fakultě mechatroniky a mezipředmětových inženýrských studií Technické univerzity v Liberci
- [27] datasheet LF [CD-ROM], [Cit. 8.3.2006]
- [28] HORÁK, Z., KUPKA, F., *Fyzika – Příručka pro vysoké školy technického směru*, Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981, 1136s
- [29] TKOTZ, K., *Příručka pro elektrotechniku*, Brno, Europa-Sobotáles cz, 2002, 564s, ISBN 80-86706-00-1
- [30] PANDAY, S.K. THAKUR, O.P., *Study of Piezoelectric Properties of La³⁺ Substituted PZT Ceramics Prepared at Different Sintering Temperatures, PVDF* [online], [Cit. 8.3.2006] dostupné z: http://www.nal.res.in/issconf/finalisss/70_PS-17.pdf

Přílohy:

Příloha č. 1: Zdroj LPT25

Příloha č. 2: Zdroj LPT25 umístěný do krabičky

Příloha č. 3: Deska pálivého pole umístěná do krabičky

Příloha č. 4: Krabička se zpětnovazebním obvodem

Příloha č. 5: Datasheet LPT25 (na přiloženém CD – lpt25.pdf)

Příloha č. 6: Datasheet NE5534 (na přiloženém CD – ne5534.pdf)

Příloha č. 7: Datasheet OPA633 (na přiloženém CD – opa633.pdf)

Příloha č. 8: Datasheet LF356 (na přiloženém CD – LF155.pdf)

Příloha č. 9: Datasheet potenciometrů (na přiloženém CD – potenciometr.pdf)

Příloha č.10: Program Mathcad - grafy obvodu „S“ (na přiloženém CD – grafy-obvods.mcd)

Příloha č.10: Program Mathcad - grafy obvodu „S“ (na přiloženém CD – grafy-obvods.mcd)

Příloha č.11: Program Mathcad – přenos vibrací (na přiloženém CD – prenosvibraci.mcd)

Příloha č.12: Program Mathematica – stabilita ideálního operačního zesilovače (na přiloženém CD – stabilitaidealop.nb)

Příloha č.13: Program Mathematica – stabilita reálného operačního zesilovače (na přiloženém CD - stabilitarealnyop.nb)

Příloha č.14: Program Mathematica – stabilita reálného operačního zesilovače s použitými součástkami z kapitoly 2 (na přiloženém CD - dosazeno10kHz.nb)