



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# ADAPTIVNÍ METODY POTLAČOVÁNÍ PŘENOSU VIBRACÍ: ŘEŠENÍ REZONANČNÍCH A ŠIROKOFREKVENČNÍCH ÚLOH

ADAPTIVE VIBRATION CONTROL METHODS: SOLUTION  
OF SINGLE-MODE AND BROAD FREQUENCY BAND PROBLEMS

## AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Miloš Kodejška

STUDIJNÍ PROGRAM: P2612 Elektrotechnika a informatika  
STUDIJNÍ OBOR: 2612V045 Technická kybernetika  
PRACOVNÍŠTĚ: Ústav mechatroniky a technické informatiky  
Fakulta mechatromiky, informatiky a mezioborových studií  
Technická univerzita v Liberci  
Studentská 2, 461 17, Liberec  
ŠKOLITEL: doc. Ing. Pavel Mokřý, Ph.D.

LIBEREC 2013

## Abstrakt

Disertační práce se zabývá návrhem a výzkumem adaptivních metod pro potlačování přenosu vibrací v širokém frekvenčním pásmu pomocí piezoelektrických aktuátorů. Je známo, že přenos vibrací přes rozhraní dvou tuhých objektů závisí na poměru jejich mechanických impedancí. Hodnota mechanické impedance je přímo úměrná elastické tuhosti materiálu. Proto dochází po vložení extrémně měkkého elementu mezi dva tuhé objekty k redukci přenosu vibrací mezi těmito objekty. Tento extrémně měkký element lze realizovat připojením libovolného piezoelektrického aktuátoru k aktivnímu elektrickému bočníku (NC-obvodu), který realizuje záporně kapacitní impedanci. Jedná se tedy o semiaktivní PSD metodu, jejíž princip je založen na aktivním řízení elastických vlastností piezoelektrických aktuátorů. Tato metoda potenciálně umožňuje návrh jednoduchých, efektivních, levných a dokonale kolokovaných systémů, čímž kombinuje výhody a eliminuje nevýhody pasivních a konvenčních aktivních metod. Tato disertační práce se zabývá dalším vývojem a optimalizací tohoto přístupu, tak aby prezentované metody umožňovaly návrh systémů potlačujících přenos vibrací s vlastnostmi, které odpovídají požadavkům reálných aplikací.

V této práci jsou shrnuty a analyzovány doposud dosažené výsledky. Mezi hlavní nedostatky, kterými je metoda v základní konfiguraci zatížena patří malá šířka frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací. Z toho vyplývá neschopnost takového systému efektivně potlačovat vibrace s obecnou časovou závislostí. Práce prezentuje nástroje pro rozšíření frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací, která spočívá v přizpůsobení tzv. referenční impedance NC-obvodu danému piezoelektrickému aktuátoru. Výhodou této modifikace je, že NC-obvod optimálně nastavený pro jednu frekvenci je současně optimálně nastaven pro její široké okolí. V této konfiguraci lze uvnitř daného frekvenčního pásma efektivně potlačovat přenos vibrací s libovolně komplikovaným časovým průběhem výchylky.

Dalším problémem, který je v práci řešen, je modifikace adaptivního systému, která umožňuje automatické nastavení NC-obvodu nejen pro speciální případ harmonických vstupních vibrací, ale naopak také pro vibrace s obecným časovým průběhem výchylky. Spektrum těchto vibrací může obsahovat náhodné složky (šum) a několik harmonických složek. Tato modifikace vyžadovala návrh zpracování signálů (výpočet FFT přenesených vibrací a analýza jejich spektra), které lze implementovat do počítače, mikroprocesoru, signálového procesoru a podobně.

Současným skloubením těchto dvou prezentovaných přínosů vzniká adaptivní systém pro širokospektrální potlačování přenosu vibrací obecného charakteru, založený na principu řízení elastických vlastností piezoelektrického aktuátoru. Přenosová funkce systému je v důsledku adaptivního řízení parametrů NC-obvodu automaticky tvarována

tak, aby potlačení přenosu okamžitých vstupních vibrací bylo maximální v širokém frekvenčním pásmu.

**Klíčová slova :** Piezoelektrický aktuátor, vibrace, Potlačování přenosu vibrací, Aktivní řízení elasticity, Piezoelectric Shunt Damping, NC-obvod, záporná kapacita

## **Abstract**

This dissertation thesis deals with the design and research of adaptive methods for the vibration transmission suppression using piezoelectric actuators in the broad frequency range. It is well known that the transmission of vibrations through an interface between two solid objects is controlled by the ratio of their mechanical impedances. Since the mechanical impedance of a material is proportional to its stiffness, an extremely soft element placed between two solid objects works as an interface with a high transmission loss of vibrations. This extremely soft element can be constructed by connecting of the arbitrary piezoelectric actuator to the active electric circuit (NC-circuit) that has negative effective capacitance. Therefore, it is a semiactive PSD method, whose principle is based on the active elasticity control of the piezoelectric actuators. This method potentially allows the design of simple, efficient, cheap and ideally collocated systems, and thus combines the advantages and eliminates the disadvantages of conventional passive and active methods. This dissertation deals with the further development and optimization of this approach so that the presented methods enable designing systems for vibration transmission suppression having characteristics that meet the requirements of real applications.

In this dissertation, there are compiled and analyzed the state-of-the-art achievements in the field. The small band-width of the efficiently suppressed vibrations belongs to the most severe drawbacks of the method in the basic configuration. It follows from this drawback that such a system cannot efficiently suppress the transmission of vibration with general time dependence. The dissertation presents tools for broadening the frequency range of the efficiently suppressed vibrations, which is achieved by an enhancement of matching the piezoelectric actuator and the NC-circuit capacitances. An advantage of such a modification is the fact that the NC-circuit optimally tuned for a single frequency is at the same time optimally tuned for a broad frequency range around the tuning frequency. In such a configuration of the system, it is possible to efficiently suppress the vibration transmission with arbitrarily complicated time dependence of the vibration displacement.

Another problem that is solved in the dissertation is the modification of the adaptive system, which allows the automatic self-tuning of the NC-circuit not only for the special case of harmonic vibrations, but also for vibrations with general time dependence. Frequency spectrum of such vibrations may contain noise and several harmonic components. The modification of the vibration suppression system presented in this dissertation required a design of signal processing tools (computation of FFT of transmitted vibrations and the analysis of their spectrum), which can be implemented in a personal computer, microprocessor, digital signal processor, etc.

The simultaneous combination of the two aforementioned contributions to the state-of-the-art, which are the main results of the presented dissertation, a novel adaptive system for the suppression of vibration transmission in the broad frequency range is constructed. As a result of the adaptive control of the NC-circuit parameters, the transfer function of the system is shaped in such a way that the suppression of the incident vibrations in the broad frequency range was maximal.

**Key Words :** Piezoelectric actuator, vibrations, vibration control, active elasticity control, piezoelectric shunt damping, negative capacitance, negative capacitance circuit

## Obsah

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod .....</b>  | <b>6</b>  |
| 1.1      | Cíle disertační práce .....  | 10        |
| <b>2</b> | <b>Semiaktivní metoda tlumení přenosu vibrací pomocí piezoelektrického aktuátoru .....</b> | <b>11</b> |
| 2.1      | Vliv konstanty tuhosti na přenos vibrací .....   | 11        |
| 2.1.1    | Metoda aktivního řízení elasticity piezoelektrického aktuátoru .....                       | 12        |
| 2.1.2    | Obvod se záporně kapacitní impedancí – NC-obvod .....                                      | 13        |
| 2.2      | Příklady realizací tlumení přenosu vibrací .....   | 15        |
| 2.3      | Definování a analýza problémů .....  | 17        |
| <b>3</b> | <b>Adaptivní řízení elastických vlastností piezoelektrických aktuátorů .....</b>           | <b>23</b> |
| 3.1      | Algoritmus pro adaptivní řízení NC-obvodu .....  | 23        |
| 3.2      | Odhad argumentu efektivní konstanty tuhosti .....  | 25        |
| 3.3      | Princip řízení – elektrické a mechanické uspořádání .....                                  | 25        |
| <b>4</b> | <b>Rozšíření frekvenčního pásma potlačování přenosu vibrací.....</b>                       | <b>28</b> |
| 4.1      | Optimální nastavení NC obvodu z hlediska impedancí.....                                    | 28        |
| 4.2      | Princip rozšíření frekvenčního pásma .....   | 32        |
| 4.3      | Experimentální metoda určení parametrů referenční impedance .....                          | 35        |
| 4.4      | Analytická metoda určení parametrů referenční impedance .....                              | 35        |
| 4.5      | Experiment.....  | 37        |
| <b>5</b> | <b>Realizace adaptivního řízení NC-obvodu – obecné vibrace.....</b>                        | <b>38</b> |
| <b>6</b> | <b>Automatické nastavení NC-obvodu bez senzoru síly .....</b>                              | <b>43</b> |
| <b>7</b> | <b>Závěr/Diskuse.....</b>  | <b>47</b> |
|          | POUŽITÁ LITERATURA .....   | 49        |
|          | PUBLIKACE AUTORA .....   | 52        |

# 1 Úvod

Vibrace jsou obecně definovány jako pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Jedná se tedy o mechanické kmitání a chvění prostředí. Vibrace provázejí člověka na každém jeho kroku. Jejich důsledky nejsou přitom vždy záporné. Příkladem může být vibrační vyzvánění telefonů, reprodukce zvuku vibrující membránou reproduktoru, využití vibrací v některých technologických procesech, například elektrická a pneumatická kladiva, vibrační hutnicí zařízení ve stavebnictví, prosévací zařízení pro rozdělení materiálu dle frakce a podobně.

Tato práce je však cílena na potlačování záporných důsledků výskytu vibrací, které vznikají působením lidské činnosti a mají zpětně neblahé účinky na člověka a na kvalitu životního prostředí obecně. Mezi záporné důsledky výskytu vibrací patří jejich nepříznivý vliv na komfort a zdraví člověka, nepříznivý vliv na kvalitu životního prostředí, snížení životnosti, přesnosti, spolehlivosti a mnohdy i bezpečnosti strojů, jejich negativní dopady v pokročilých optických technologiích a další.

Zvláštní požadavky v oblasti potlačování přenosu vibrací jsou kladeny v oborech nanotechnologie, mikroskopie, interferometrie, spektroskopie atp. V těchto aplikacích je nutné dosáhnout obzvláště efektivního potlačení přenosu vibrací, protože sebemenší vibrace veškeré výsledky optických měření maří. Mezi hlavní zdroje vibrací patří chvění budov, chůze (1-3Hz), a buzení stroji (kmitočty odvozené od síťové frekvence) [1]. Potřeba precizního izolování optických soustav od těchto vibrací vytváří poptávku na vývoj nových sofistikovaných metod potlačování přenosu vibrací, které lze uplatnit při návrhu antivibračních a optických stolů. Tato zařízení dnes využívají pro tlumení přenosu vibrací elektrické případně pneumatické pohony nebo aktivní antivibrační piezoelektrické systémy.

Fyziologicky mají vibrace na člověka nepříznivý vliv. Dlouhodobé vystavení vibracím a hluku je pro člověka nebezpečné. Způsobuje únavu, podráždění, nepohodlí, v extrémním případě poškození zdraví. [2]

Výskyt vibrací je úzce spjat se vznikem a šířením hluku. Hluk vzniká přeměnou části kinetické energie mechanického kmitání konstrukcí na změny akustického tlaku vzduchu. Vibrace a huk vznikají jako vedlejší, nechtěný důsledek v mnoha odvětvích lidského působení, jako je např. stavitelství, těžký průmysl, doprava, letecký průmysl, strojní průmysl a podobně.

Obecně můžeme říci, že u strojů jsou zdrojem vibrací zejména rotující a kmitající části. Přenos těchto vibrací na konstrukci stroje a ostatní části způsobuje snížení výkonu stroje, výrazné dynamické namáhání uzlů stroje, urychluje opotřebování dílů, zvyšuje hlučnost zařízení a snižuje životnost nástrojů. Zvláště nebezpečné jsou rezonance, tj. stav, kdy se téměř všechn mechanický výkon vibrací, které se šíří strojem, přenáší na jeho určitou část bez jakéhokoli odrazu nebo útlumu. To má potom za následek rychlý nárůst mechanické energie (tj. kinetické a potenciální energie napjatosti) v dané části stroje, což je spojeno s rychlým nárůstem její amplitudy kmitání. Tento jev nastává, pokud je frekvence přenášených vibrací shodná s tzv. vlastní frekvencí části dané konstrukce. V takových případech může dojít k poškození stroje. Měřením vibrací a analýzou signálů lze dokonce diagnostikovat (dle rezonančních frekvencí) příčiny a závady na zařízeních. Těmto rezonancím je však nutno předcházet vhodným uspořádáním konstrukce, tedy

vhodným rozložením hmot, vhodnou tuhostí konstrukce a účinným izolováním přenosové cesty mezi zdrojem vibrací a konstrukcí stroje.

V současnosti používané metody potlačování přenosu vibrací jsou buď pasivní, které jsou levné avšak málo účinné, nebo aktivní, které jsou v jistých speciálních podmínkách účinné, avšak často jsou nákladné a složité. Proto je velmi žádoucí navrhnout a analyzovat nové, jednoduché a levnější metody, při zachování účinnosti potlačování přenosu vibrací.

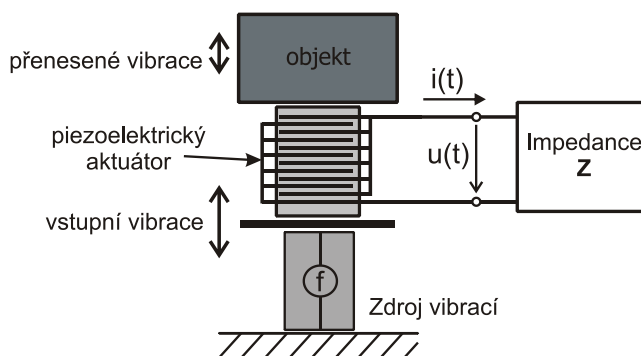
V současnosti jsou pro tlumení přenosu vibrací používány systémy, které jsou založeny nejčastěji na pasivních metodách využívajících mechanických prvků, jako jsou visko-elastické tlumiče a pružiny nebo na konvenčních aktivních zpětnovazebních metodách využívajících různých aktuátorů. Pasivní metody jsou poměrně levné a nevyžadují externí zdroj energie, ale jejich použití pro potlačení vibrací nízkých frekvencí obvykle vyžaduje instalace objemných a hmotných vibroizolačních prvků, což může být v některých zařízeních nebo situacích nemožné. Konvenční aktivní metody dosahují vysoké účinnosti potlačení přenosu vibrací zejména nízkých frekvencí, ovšem obvykle za cenu velké technické náročnosti, vysokých realizačních a provozních nákladů a nižší spolehlivosti.

Při porovnání vlastností konvenčních pasivních a aktivních metod pro tlumení přenosu vibrací vzniká otázka, zda neexistuje přístup, který by kombinoval výhody obou metod, zejména vysokou účinnost (i při nízkých frekvencích) a nízké náklady. Velmi nadějným se jeví přístup využívající tzv. semi-aktivních metod, které využívají tzv. *inteligentních materiálů*.

V posledních třiceti letech jsme mohli být svědky vývoje pokročilých materiálů, s jejichž pomocí lze dosáhnout opto-mechanické, chemo-mechanické, termo-mechanické nebo elektromechanické transformace energií. Materiály s těmito vlastnostmi se souhrnně nazývají *inteligentní (chytré) materiály*. Mezi inteligentní elektromechanické měniče patří piezoelektrické měniče, které lze využívat jako senzory nebo jako aktuátory. Tyto měniče lze výhodně využít v aplikacích tlumení hluku a vibrací, díky jejich rychlé odezvě. Tlumicího efektu je zde dosaženo, zaprvé vložением piezoelektrického elektromechanického převodníku mezi vibrující strukturu a izolovaný objekt, a zadruhé paralelním připojením piezoelektrického členu k externímu (pasivnímu nebo aktivnímu) elektronickému bočníku. Tuto metodu pro potlačení přenosu vibrací poprvé představili Hagood a von Flotow [3] a později byla nazvána *Piezoelectric Shunt Damping* (PSD) [4]. Metoda je založena na snížení mechanického výkonu vibrací procházejících piezoelektrickým převodníkem pomocí konverze části mechanické energie na energii elektrickou a její následnou disipaci na pasivních impedancích v připojeném elektrickém bočníku. Existuje celá řada modifikací metody PSD, které jsou založeny na tomto principu, kdy jediný piezoelektrický element zprostředkovává elektromechanické interakce mechanické struktury s aktivním nebo pasivním elektrickým obvodem. Přehledný souhrn a rozdělení hlavních typů metod PSD (do roku 2005) můžeme nalézt v článku Mohiemaniho [5] a v disertační práci Niederbergera [6]. Další podrobnosti lze nalézt v knize „Piezoelectric transducers for vibration control and damping“ [4]. Další rešeršní práci publikovali v roce 2012 Wang a Inman. V této práci jsou představeny jednotlivé přístupy metody (přehledně členěné na ryze-pasivní, semi-pasivní, semi-aktivní a aktivní) a jejich vývoj během posledních let [7].

Systémy založené na principu PSD metod jsou jednoduché z hlediska řízení, případně nevyžadují žádný druh řízení, nejsou energeticky náročné, jsou účinné, využívají

jednoduchých a levných analogových obvodů, které po připojení k piezoelektrickému měniči mají výrazný vliv na šíření přenosu vibrací skrz systém. Hlavní výhody těchto metod lze shrnout následujícím způsobem. Metody PSD umožňují realizovat konstrukčně **jednoduché, kompaktní a účinné** systémy potlačující přenos vibrací, při **žádných nebo malých nárocích na externí zdroje energie**.



Obr. 1. Základní princip metody PSD v systému pro potlačení přenosu vibrací. Piezoelektrický aktuátor je implementován do systému, kde je vystaven do přenosové cesty vstupním vibracím. Piezoelektrický aktuátor zde plní úlohu rozhraní mezi systémem a paralelně připojeným obvodem.

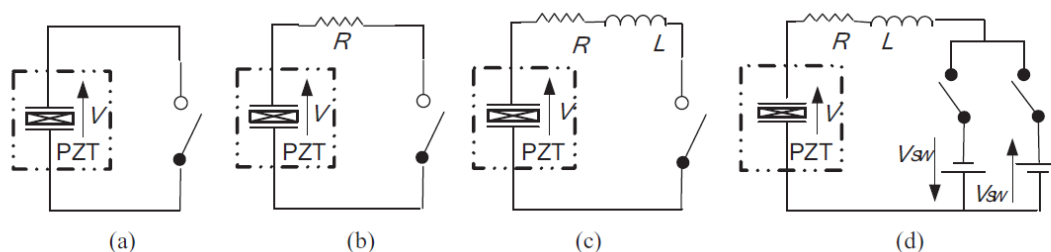
Pokud je bočník piezoelektrického měniče tvořen pasivním obvodem (impedancí), jedná se o pasivní PSD metody. V literatuře se setkáváme s dalším dělením na ryze-pasivní (*purely-passive*) a semi-pasivní (*semi-passive*). Ryze-pasivní metody se vyznačují tím, že nevyžadují zdroj napájení a připojené impedance nedodávají do systému energii. U semi-pasivních metod rovněž platí, že paralelně připojený obvod nedodává žádnou energii do systému, ovšem metoda vyžaduje pro svou funkci externí zdroj energie (pro spínání impedancí, případně adaptivní přeladování pasivního obvodu apod.). Nespornou výhodou je zaručená stabilita celého systému a minimální, nebo žádné nároky na napájení. Pasivní PSD metody jsou v principu rozdělovány na lineární a nelineární.

Mezi pasivní **lineární** PSD metody patří tzv. metoda **Resistive shunts**, kterou představili Hagood a von Flotow [3]. Jedná se o jednoduchý a levný způsob, kterým lze snadno dosáhnout mírného potlačení přenosu vibrací, bez potřeby zdroje energie. Nevýhodou je však velmi malá, v některých aplikacích zanedbatelná účinnost potlačení přenosu vibrací. Dalším příkladem je tzv. **Capacitive shunts**, kdy paralelním připojením piezoelektrického aktuátoru ke svorkám kondenzátoru dochází k mírnému snížení jeho efektivní tuhosti. Tímto způsobem lze například požadovaným způsobem ovlivnit rezonanční frekvenci systému, do kterého je piezoelektrický měnič implementován. Tento přístup však není příliš vhodný pro tlumení přenosu vibrací, právě z důvodu malé účinnosti, což je pro ryze-pasivní metody typické. Významnou roli hrají tzv. **Resonant shunts**, kde připojením rezonančního obvodu k piezoelektrickému aktuátoru dochází k elektromechanické vazbě mezi mechanickým stavem aktuátoru a elektrickým stavem rezonančního obvodu. Pokud je rezonanční frekvence elektrického obvodu vhodně nastavena na některou z modálních frekvencí struktury, ve které je piezoelektrický aktuátor implementován, dochází k výraznému potlačení přenosu vibrací odpovídajícího módu [8], [9], [5], [10]. Pasivní lineární rezonanční PSD metody se dále dělí na *single mode* (tlumí pouze jeden strukturální mód) a *multi mode* (tlumí více strukturálních módů pomocí jednoho aktuátoru). Obecně lze k ryze pasivním metodám říci, že k jejich



výhodám patří zaručená stabilita systému a fakt, že pracují bez externího zdroje energie. Naproti tomu stojí ovšem řada nevýhod, jako je malá účinnost tlumení přenosu vibrací a jejich nepraktičnost, zejména pokud je vyžadováno tlumení větších amplitud vibrací, pokud je vyžadováno více-modální širokopásmové tlumení, pokud není známo frekvenční složení vstupních vibrací, nebo pokud jsou rezonanční frekvence struktury nízké. U lineárních rezonančních obvodů (*resonant shunts*) vychází pro nízkofrekvenční strukturální módy optimální hodnoty indukčností příliš vysoké, což je v praxi z důvodů velkých rozměrů a hmotností velmi nepraktické. Tento fakt byl motivací pro návrh nelineárního přístupu k potlačování přenosu vibrací s využitím spínačů a celé řady řídicích algoritmů spínání.

**Pasivní nelineární PSD** metody jsou založeny zejména na spínaných impedancích, tj. na synchronizovaném spínání pasivního obvodu k piezoelektrickému aktuátoru. V principu lze tyto metody charakterizovat jako semi-pasivní. Jedná se o tzv. *Switching shunts* - na Obr. 2 můžeme vidět čtyři nejčastěji používané konfigurace: (a) state switch: dle řídicího algoritmu dochází k přepínání piezoelektrického aktuátoru mezi stavy naprázdno a nakrátko; (b) synchronizované spínání (SSD - synchronized switch damping) odporové impedance (SSDS); (c) synchronizované spínání induktivní impedance (SSDI); (d) Synchronizované spínání aktivní impedance (SSDV) – protože využívá zdroje napětí, patří do kategorie aktivního tlumení. V případě SSDI je, ve srovnání s lineárními rezonančními obvody, vyžadována velmi malá indukčnost pro potlačení strukturálního módu o stejné frekvenci. Tyto metody vyžadují pouze minimální energii, která je nezbytná pro spínací obvody. Trendem poslední doby je výzkum a vývoj tzv. *self powered* systémů, napájených z části energie potlačovaných vibrací. Cílem těchto systémů je část energie vibrací ukládat ve formě náboje (power harvesting) a získanou energii použít pro spínací obvody optimalizované pro minimální spotřebu [7] ,[11].



**Obr. 2.** Principy nelineárního semi-pasivního tlumení přenosu vibrací pomocí tzv. Switching shunt: state switch (a), SSDS (b), SSDI (c) a princip nelineárního aktivního tlumení přenosu vibrací: SSDV(d) - (převzato z [7]).

Aktivními PSD metodami jsou nazývány takové metody, u nichž paralelně připojené obvody (impedance) dodávají energii do systému. V případě aktivních metod není zaručena stabilita systému a zpravidla je vyžadován externí zdroj energie. Toto jsou nevýhody, ve srovnání s pasivními metodami. Na druhou stranu, aktivní přístup nabízí větší účinnost potlačování přenosu vibrací a umožňuje realizaci elektrických obvodů, jako je například obvod se zápornou kapacitou, který umožňuje řízení elastických vlastností piezoelektrického aktuátoru v širokém frekvenčním pásmu. Aktivní PSD metody lze dle základního dělení rozčlenit na lineární a nelineární. Příkladem **nelineárních** aktivních metod je například zmíněná metoda *Switching shunts-SSDV* [12]. Příkladem **lineárních** metod je například realizace tzv. řízených syntetických impedancí [13], nebo realizace obvodů se záporně kapacitní impedancí.

V roce 2000, byla vyvinuta semiaktivní varianta metody PSD, která je založena na původní myšlence dr. Dateho. Metoda je založena na aktivním (elektrickém) řízení efektivní tuhosti piezoelektrického převodníku (Active Elasticity Control, AEC) pomocí připojeného aktivního elektrického bočnicku, který má efektivní záporně kapacitní impedanci. Toto aktivní uspořádání připojeného bočnicku umožňuje řízení efektivní tuhosti piezoelektrického převodníku v extrémním rozsahu nula až nekonečno [14]. Pokud je aktuátor vložen mezi vibrující strukturou a objektem, který má být od vibrací izolován, rezonanční frekvence a přenos vibrací přes systém pružina-hmota závisí na tuhosti aktuátoru a hmotnosti objektu. V důsledku zmenšení konstanty tuhosti dojde ke snížení rezonanční frekvence systému a k potlačení přenosu vibrací ve frekvenčním pásmu nad rezonancí. Fyzikální podstata dosažení tlumicího efektu je tedy u této metody v principu shodná s mechanickými pasivními metodami (systém pružina-tlumič). Optimálním nastavením obvodu se zápornou kapacitou lze však dosáhnout teoreticky nulové tuhosti aktuátoru. Tento nekonečně měkký element (v určité frekvenční oblasti frekvencí větších než 0 Hz), vložený mezi vibrující strukturu a tlumenou hmotu, se chová jako rozhraní potlačující přenos vibrací.

První aplikace potlačování hluku a vibrací pomocí této metody prezentovali Okubo [15] a Kodama [16]. Další práce, které se zabývaly tímto jednoduchým přístupem [17], [18], [19], [20], [21] prokázaly velký potenciál této semi-aktivní metody, který spočívá (i) v jednoduchosti systémů pro tlumení vibrací, jež se skládá z jediného piezoelektrického (self-sensing) aktuátoru s paralelně připojeným aktivním elektrickým obvodem, (ii) v realizaci aktivního elektrického obvodu, jehož hlavním prvkem je jediný lineární operační zesilovač, což umožňuje snížení spotřeby energie, (iii) v šířce frekvenčního pásma (10 Hz až 100 kHz), ve kterém je systém schopen efektivně potlačovat vibrace. Metoda je přitom velmi efektivní (běžně lze dosáhnout potlačení přenosu vibrací o 40 dB) a není náročná na spotřebu energie, jak publikovali Václavík a Mokřý [22]. Na druhou stranu, limitujícím faktorem této metody je fakt, že k efektivnímu potlačení přenosu vibrací dochází tehdy, když se obvod realizující zápornou kapacitu nachází právě na mezi stability, jak publikovali Date [14], nebo Sluka [23]. Později byly různé PSD metody porovnány z hlediska stability v práci Preumonta a spol. [24]. Dalším limitujícím faktorem je velká citlivost účinnosti potlačování přenosu vibrací na přesnosti nastavení obvodu se zápornou kapacitou. Tato citlivost je způsobena především citlivostí kapacity piezoelektrického měniče na okolních podmínkách, zejména na změny teploty.

## 1.1 Cíle disertační práce

Částečné eliminace výše popsaných nevýhod bylo dosaženo pomocí adaptivně řízeného obvodu se zápornou kapacitou [23], [25]. Adaptivní řízení však bylo možné pouze ve speciálním případě potlačování harmonických vibrací a prezentované systémy dosahovaly stabilního a efektivního potlačení přenosu vibrací pouze ve velmi úzkém frekvenčním rozsahu, což je významná nevýhoda. Tato disertační práce si klade za cíl v tomto bodě navázat a modifikovat metodu tak, aby byla schopna potlačovat současně více harmonických složek vibrací (které nemusí být stacionární), v širokém frekvenčním rozsahu, včetně stochastických složek (šumu). Posunutím vývoje do tohoto bodu se výrazně zlepší vyhlídky aplikačního využití metody v reálných systémech.

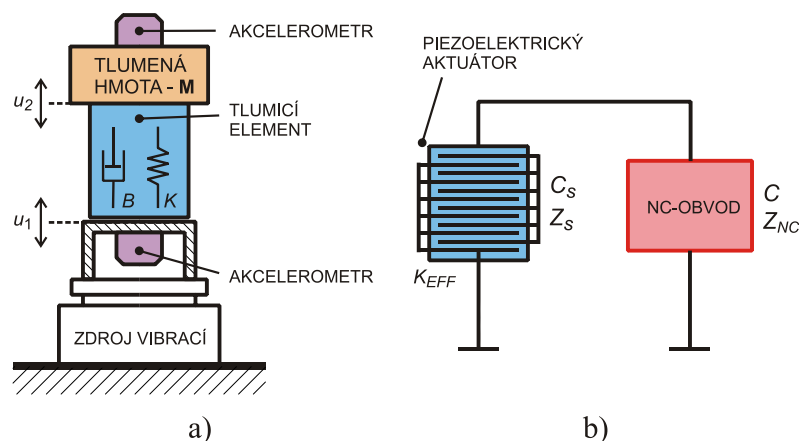
Při vývoji tohoto přístupu pro potlačení přenosu vibrací je nutno zaměřit se na 1) studium vlivu změny elasticity aktuátoru na přenos vibrací 2) rozšíření frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací 3) implementaci adaptivních procesů pro obecné vibrace s deterministickými i náhodnými složkami. 4) další principy adaptivního řízení záporně kapacitní impedance.

## 2 Semiaktivní metoda tlumení přenosu vibrací pomocí piezoelektrického aktuátoru

Je známo, že přenos vibrací přes rozhraní dvou tuhých objektů závisí na poměru jejich mechanických impedancí. Hodnota mechanické impedance je přímo úměrná elastické tuhosti materiálu. Proto dochází po vložení extrémně měkkého elementu mezi dva tuhé objekty k redukci přenosu vibrací mezi těmito objekty. V následující části je prezentován teoretický model, který popisuje vliv elasticity v mechanickém systému na přenos vibrací skrz systém. Dále je prezentována metoda řízení elastických vlastností piezoelektrického aktuátoru paralelně připojeným elektronickým obvodem, kterou lze velmi výhodně aplikovat v systému potlačujícím přenos vibrací.

### 2.1 Vliv konstanty tuhosti na přenos vibrací

Systém pro potlačení přenosu vibrací je schematicky zobrazen na Obr. 3(a). Tlumicí element s konstantou tuhosti  $K$  a s koeficientem tlumení  $B$  je vložen mezi zdrojem vibrací a objektem o hmotnosti  $M$ , který má být od vibrací izolován. Vstupní vibrace  $u_1$  a přenesené vibrace  $u_2$  jsou měřeny pomocí akcelerometrů. Tlumicí element je tvořen piezoelektrickým aktuátorem, jež je připojen k obvodu, který realizuje nastavitelnou zápornou kapacitu [dále NC-obvod (z Negative Capacitance circuit)], viz Obr. 3(b).



**Obr. 3.** Schéma systému pro potlačení přenosu vibrací. Tlumicí element s konstantou tuhosti  $K$  a koeficientem tlumení  $B$  je vložen mezi zdroj vibrací a tlumenou hmotu  $M$ , která má být od zdroje vibrací izolována. Vstupní vibrace s amplitudou  $u_1$  a přenesené vibrace s amplitudou  $u_2$  jsou měřeny pomocí akcelerometrů (výchylku  $u$  získáváme dvojnásobnou integrací naměřeného zrychlení  $a$ ). Jako tlumicího elementu je v této práci využíváno libovolného piezoelektrického aktuátoru o impedanci  $Z_S$ , ke kterému je paralelně připojen obvod se zápornou kapacitou (NC-obvod) o komplexní impedanci  $Z_{NC}$ .

Přenos vibrací  $TR$  skrze uvažovaný systém je definován jako poměr amplitud přenesených a vstupních vibrací vzhledem k referenčnímu bodu zdroje:

$$TR = |u_2/u_1|. \quad (1)$$

Přenos vibrací je funkcí materiálových parametrů, které určují dynamickou odezvu mechanického systému. Dynamická odezva systému je popsána následující pohybovou rovnicí:

$$M \frac{d^2 u_2}{dt^2} + B \frac{du_2}{dt} + K u_2 = B \frac{du_1}{dt} + K u_1. \quad (2)$$

V nejjednodušším případě přenosu harmonických vibrací o úhlové frekvenci  $\omega$  získáváme řešením rovnice (2) vztah pro přenos vibrací  $TR$ :

$$TR = \omega_0 \sqrt{\frac{\omega^2 + Q^2 \omega_0^2}{\omega^2 \omega_0^2 + Q^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}}, \quad (3)$$

kde symboly  $Q$  a  $\omega_0$  představují mechanický činitel jakosti  $Q = \sqrt{KM}/B$  a rezonanční frekvenci  $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ . Jak je vidět, čím menší je konstanta tuhosti  $K$ , tím nižší je rezonanční frekvence  $\omega_0$  a tím menší je hodnota přenosu vibrací  $TR$ , pro harmonické vibrace o úhlové frekvenci  $\omega > \omega_0$ .

### 2.1.1 Metoda aktivního řízení elasticity piezoelektrického aktuátoru

Jak můžeme vidět na Obr. 3(b), element pro tlumení přenosu vibrací užitý v prezentované práci je tvořen paralelní kombinací piezoelektrického aktuátoru s kapacitou  $C_S$  a NC-obvodu se zápornou kapacitou  $C$ . Tento systém je příkladem tzv. metody aktivního řízení elasticity, která byla představena v roce 2000 Datem a spol. [14]. Efektivní konstantu tuhosti piezoelektrického aktuátoru  $K_{eff}$  lze odvodit z rovnice pro náboj  $Q$  a z rovnice pro změnu délky elementu  $\Delta l = u_2 - u_1$ .

$$Q = dF + C_S V \quad (4)$$

$$\Delta l = \left(\frac{1}{K_S}\right) F + dV \quad (5)$$

kteří platí zároveň s rovnicí pro napětí  $V$  vzniklé na svorkách paralelně připojeného záporného kapacitou s kapacitou  $C$ .

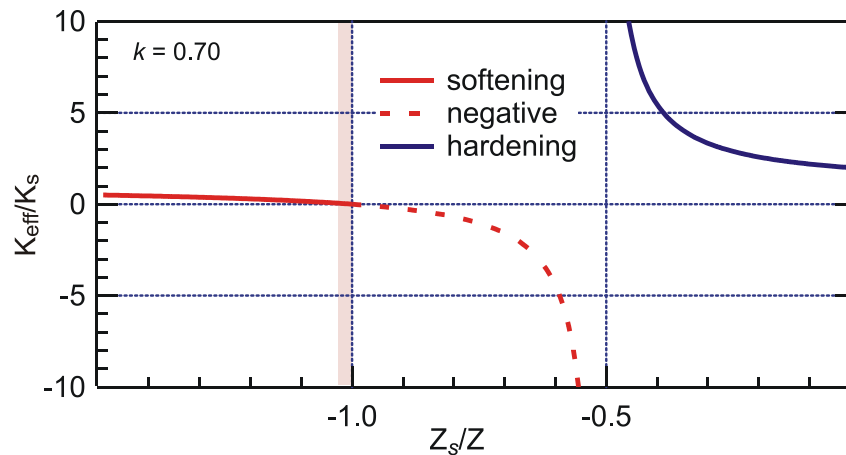
$$V = -\frac{Q}{C} \quad (6)$$

kde  $d$ ,  $C_S$  a  $K_S$  jsou piezoelektrický koeficient, kapacita a konstanta tuhosti mechanicky volného piezoelektrického aktuátoru.

Kombinací rovnic (4), (5), (6) a užitím vztahu mezi kapacitou a impedancí kondenzátoru  $Z = 1/(j\omega C)$ , získáváme rovnici pro efektivní konstantu tuhosti piezoelektrického aktuátoru s paralelně připojeným externím obvodem s elektrickou impedancí  $Z$ :

$$K_{eff} = \frac{F}{\Delta l} = K_S \left( \frac{1 + Z_S/Z}{1 - k^2 + Z_S/Z} \right) \quad (7)$$

kde  $k^2 = d^2 K_S/C_S$  je koeficient elektromechanické vazby piezoelektrického aktuátoru ( $0 < k < 1$ ) a  $Z_S$  je elektrická impedance mechanicky volného piezoelektrického aktuátoru. Z rovnice (7) vyplývá, že pokud bude impedance paralelně připojeného obvodu  $Z$  rovna hodnotě  $-Z_S$ , efektivní konstanta tuhosti  $K_{eff}$  piezoelektrického aktuátoru dosahuje nuly, jak můžeme vidět na Obr. 4.



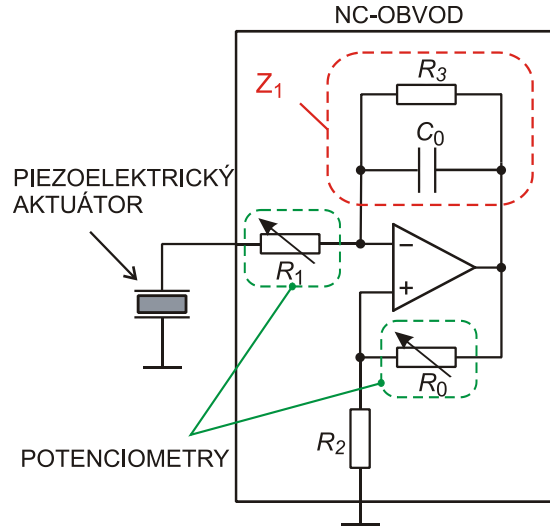
**Obr. 4.** Závislost  $K_{eff}/K_S$  (efektivní tuhost aktuátoru s připojenou externí impedancí  $Z$  / tuhost aktuátoru se svorkami naprázdno) na poměru impedancí  $Z_S/Z$  (impedance samotného aktuátoru / připojená externí impedance  $Z$ ) dle rovnice (7), pro  $k = 0,7$ .

Na Obr. 4 vidíme závislost  $K_{eff}/K_S$  na poměru impedancí  $Z_S/Z$ , dle rovnice (7), pro  $k = 0,7$ . Z obrázku je zřejmé, že dle průběhu  $K_{eff}/K_S$  lze graf rozdělit na tři oblasti. Na intervalu  $Z_S/Z \in (-\infty, -1)$  dochází ke snižování efektivní tuhosti  $K_{eff}$  až na nulu. V této oblasti dochází k potlačování přenosu vibrací. Na intervalu  $Z_S/Z \in (-1; -0,51)$  je efektivní tuhost  $K_{eff}$  záporná. V této oblasti dochází k jevu, kdy se piezoelektrický aktuátor vlivem působící síly deformuje více, než jako nekonečně měkký a vykazuje tak zápornou elasticitu. V praxi to znamená, že při zvyšování poměru  $Z_S/Z$  nad hodnotu -1 dochází k prudkému nárůstu amplitudy s opačnou fází přenesených vibrací, které vede k nestabilitě systému. Nastavit pracovní bod do této oblasti je proto nežádoucí. Na intervalu  $Z_S/Z \in (-0,51; \infty)$  dochází ke zvyšování efektivní tuhosti  $K_{eff}$  teoreticky až k nekonečnu. V praxi to znamená, že vlivem působící síly se piezoelektrický aktuátor nedeformuje vůbec. Velikost poměru  $Z_S/Z$  lze měnit řízením parametrů negativního imedančního měniče se zápornou kapacitou  $C$ , kterému je věnována následující část.

### 2.1.2 Obvod se záporně kapacitní impedancí – NC-obvod

Efektivní tuhost piezoelektrického aktuátoru  $K_{eff}$  lze řídit paralelně připojeným aktivním obvodem, který z hlediska externích svorek vykazuje záporně kapacitní impedanci. Tento aktivní obvod v této práci nazýváme „NC-obvod“. NC obvod existuje

ve dvou variantách. Rozlišujeme NC-obvod typu H (**H**ard), který se používá pro zvyšování efektivní tuhosti aktuátoru (viz modrá křivka na Obr. 4) a NC-obvod typu S (**S**oft), který používáme pro snižování efektivní tuhosti piezoelektrického aktuátoru (viz červená křivka na Obr. 4). Tato část se nadále zabývá analýzou NC-obvodu typu S, který lze výhodně použít pro tlumení přenosu vibrací a můžeme jej vidět a Obr. 5.



**Obr. 5.** Elektrické schéma piezoelektrického aktuátoru s paralelně připojeným NC-obvodem (obvod se zápornou kapacitou).

Efektivní impedance NC-obvodu, který je zobrazen na Obr. 5, je rovna:

$$Z(\omega) = R_1 + \frac{R_0 + R_2 + A_u(\omega)R_2}{R_0 + R_2 - A_u(\omega)R_0} Z_1(\omega) \approx R_1 - \frac{R_2}{R_0} Z_1(\omega), \quad (8)$$

kde  $A_u$  je napěťové zesílení operačního zesilovače a

$$Z_1(\omega) = \frac{R_3}{1 + j\omega C_0 R_3} = \frac{R_3 - j\omega C_0 R_3^2}{1 + \omega^2 C_0^2 R_3^2} \quad (9)$$

je tzv. referenční impedance NC-obvodu. Na pravé straně rovnice (8) získáváme aproximovaný vztah impedance NC-obvodu pro případ ideálního operačního zesilovače, tj. pro případ  $A_u \rightarrow \infty$ .

Je známo, že reálná a imaginární část kapacity piezoelektrického aktuátoru prakticky nejsou v oblasti pod rezonanční frekvencí frekvenčně závislé. V tomto případě lze kapacitu piezoelektrického aktuátoru s velkou přesností aproximovat výrazem  $C'_S(1 - j \tan \delta_S)$ , kde  $C'_S$  a  $\tan \delta_S$  jsou reálná část a ztrátový činitel kapacity piezoelektrického aktuátoru. Impedance piezoelektrického aktuátoru je potom vyjádřena vztahem:

$$Z_S(\omega) = \frac{1}{j\omega C'_S(1 - j \tan \delta_S)} = \frac{\tan \delta_S - j}{\omega C'_S(1 + \tan^2 \delta_S)}. \quad (10)$$

Frekvenční závislost impedance piezoelektrického aktuátoru je výhodné aproximovat frekvenční závislostí sériového zapojení kondenzátoru a rezistoru o kapacitě  $C_S$  a odporu  $R_S$ :

$$Z_S(\omega) \approx R_S + \frac{1}{j\omega C_S} \quad (11)$$

Na dané kritické frekvenci  $\omega_0$  je možné nastavit NC-obvod takovým způsobem, že platí:

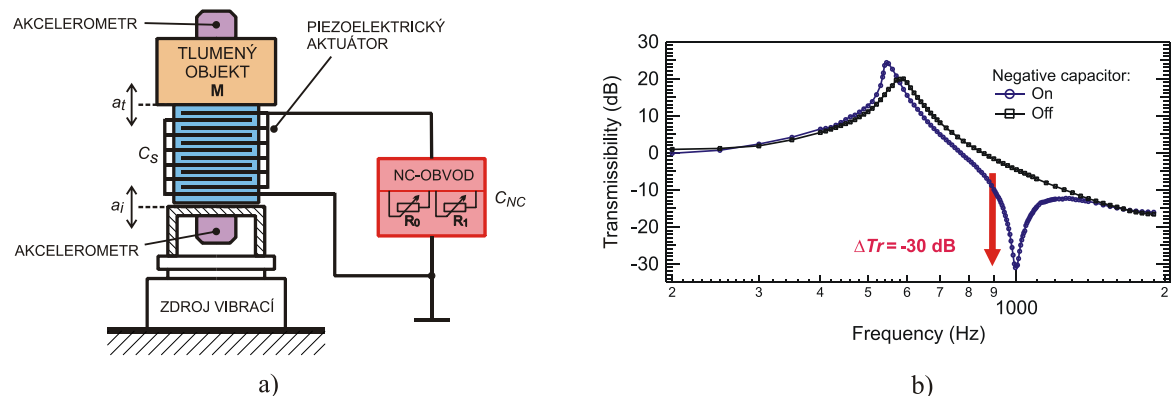
$$|Z|(\omega_0) = |Z_S|(\omega_0) \quad (12a)$$

$$\arg[Z(\omega_0)] = -\arg[Z_S(\omega_0)] \quad (12b)$$

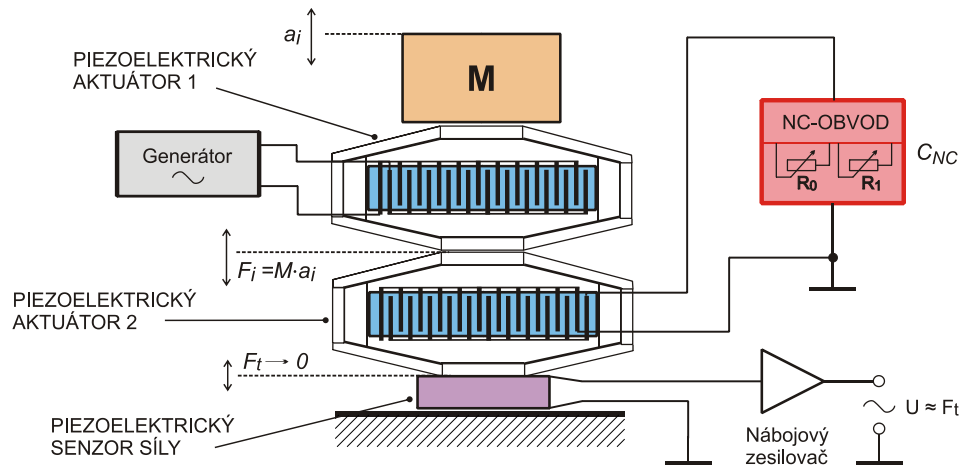
Tato situace je charakterizována poměrem  $Z_S(\omega_0) / Z(\omega_0) = -1$ , kdy podle rovnice (7) dosahuje  $K_{eff}$  nulové hodnoty a přenos vibrací se nachází v minimu.

## 2.2 Příklady realizací tlumení přenosu vibrací

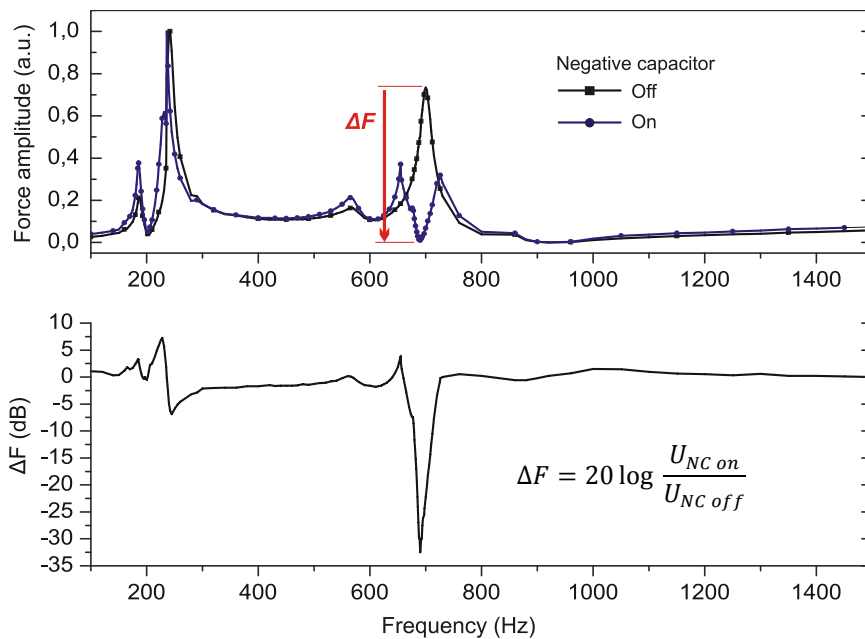
Výše popsanou metodu řízení efektivní tuhosti piezoelektrických aktuátorů lze obecně aplikovat na libovolný piezoelektrický aktuátor. V této části jsou uvedeny některé realizace této metody, které se vzájemně liší koncepcí a užitým piezoelektrickým aktuátorem. Tato část si klade za cíl poukázat na variabilitu možností, které skýtá použití této metody, přičemž ve všech prezentovaných případech jde pouze o demonstraci základního principu. Definování problémů a jejich řešení je předmětem následujících kapitol. Tato řešení jsou však obecně platná pro všechny modelové příklady, které prezentují následující obrázky.



**Obr. 6.** Příklad užití metody pro izolování tlumeného objektu od vstupních vibrací. Systém byl vybuzen harmonickými vibracemi o frekvenci  $f=1kHz$ . Paralelně k piezoelektrickému aktuátoru je připojen NC-obvod, který byl manuálně nastaven pomocí trimrů  $R_0$ ,  $R_1$  (a). Pomocí akcelerometrů je měřen přenos vibrací. Černá křivka zobrazuje přenos s odpojeným NC-obvodem, modrá zobrazuje přenos s připojeným, manuálně nastaveným NC-obvodem. Na úzkém frekvenčním okolí frekvence  $f=1kHz$  zaznamenáváme pokles přenosu vibrací  $\Delta Tr = -30dB$  (b).

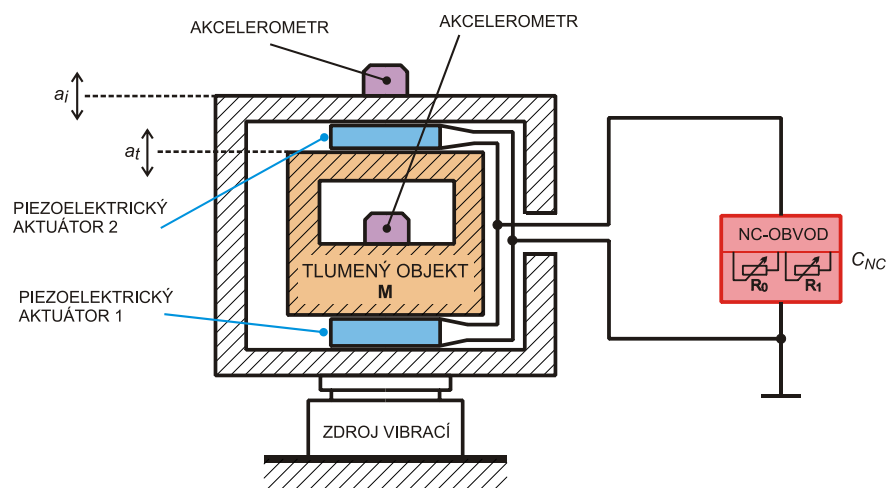


**Obr. 7.** Příklad užití metody pro izolování zdroje vibrací od podložky. Na obrázku vidíme dva piezoelektrické aktuátory s mechanicky zvětšeným posunutím. Horní aktuátor 1 je buzen generátorem a ve spojení se seismickou hmotou  $M$  (která se pohybuje se zrychlením  $a_i$ ) vytváří silové účinky  $F_i = M \cdot a_i$ . Úlohou spodního aktuátoru 2 je zamezení přenosu síly  $F_i$  na podložku. Manuálně nastavený NC-obvod způsobí pokles efektivní tuhosti spodního aktuátoru 2, který se následně vlivem síly  $F_i$  deformuje jako nekonečně měkký. Tím vzniká rozhraní s velkým potlačením přenosu vibrací a přenesená síla  $F_t$  se blíží nule. Piezoelektrickým senzorem síly je měřena přenesená síla  $F_t$ .

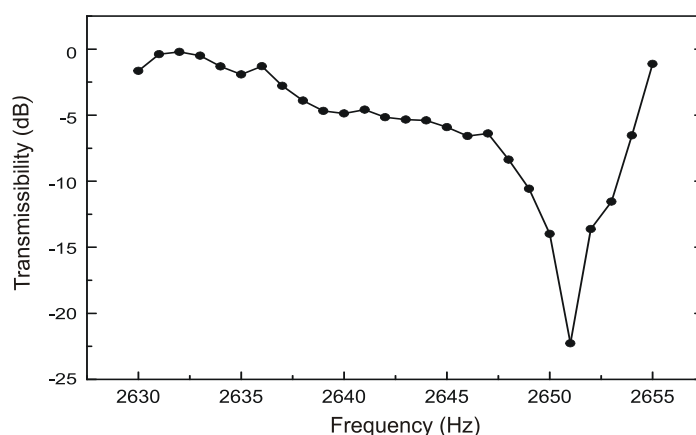


**Obr. 8.** Systém (viz Obr. 7) byl vybuzen harmonickými vibracemi o frekvenci  $f=700\text{Hz}$  (záměrně v rezonanci systému) a NC-obvod byl manuálně nastaven. Horní obrázek: frekvenční spektrum síly přenesené skrz piezoelektrický aktuátor 2 při odpojeném NC-obvodu (černá čára se čtverečky) a s připojeným manuálně nastaveným NC-obvodem (modrá čára s kolečky). Spodní obrázek: Z obou naměřených průběhů byla vypočtena frekvenční charakteristika úbytku přenesené síly  $\Delta F$  (viz vztah na obrázku dole, kde  $U_{NC\ on}$  je napětí na výstupu nábojového zesilovače senzoru síly s připojeným optimálně nastaveným NC-obvodem a  $U_{NC\ off}$  je napětí na výstupu nábojového zesilovače senzoru síly s odpojeným NC-obvodem). Na úzkém frekvenčním okolí frekvence  $f=700\text{Hz}$  zaznamenáváme úbytek přenesené síly  $\Delta F = -32\text{dB}$ .





**Obr. 9.** Příklad užití metody pro izolování vetknuté předepjaté části (tlumený objekt  $M$ ) od vibrující konstrukce. Tlumený objekt  $M$  je od vibrující konstrukce izolován pomocí dvou mechanicky předepnutých antiparalelně zapojených piezoelektrických destiček, které se chovají jako jediný aktuátor. Připojením manuálně, optimálně nastaveného NC-obvodu dochází k redukci efektivní tuhosti obou aktuátorů a současně k potlačení přenosu vibrací (viz Obr. 10). Vibrace konstrukce a přenesené vibrace jsou měřeny pomocí piezoelektrických akcelerometrů.



**Obr. 10.** Přenos vibrací z vibrující konstrukce na vetknutý předepjatý tlumený objekt (viz Obr. 9). Na velmi úzkém frekvenčním pásmu zaznamenáváme potlačení přenosu vibrací o více než 20 dB.

### 2.3 Definování a analýza problémů

V části 2.2 byly prezentovány některé z doposud realizovaných experimentů. Z těchto výsledků je zřejmé, že paralelním připojením NC-obvodu k libovolnému piezoelektrickému aktuátoru lze výrazně ovlivňovat efektivní tuhost tohoto aktuátoru. Ve všech případech byl NC-obvod nastavován manuálně pomocí trimrů. Při tomto ladění jsou experimentálně nalezena optimální nastavení trimrů  $R_0$ ,  $R_1$ , která jsou v souladu s rovnicemi (12a), (12b). Tyto výsledky demonstrují vysokou potenciální vibroizolační účinnost použité metody pro tlumení přenosu vibrací. Zároveň však z nich vyplývá celá řada problémů, které brání uplatnění metody v reálných aplikacích. Společným jmenovatelem prezentovaných příkladů je velmi úzká frekvenční oblast efektivně potlačených vibrací, jak můžeme vidět např. na Obr. 8. Tato vlastnost představuje významný hendikep na cestě k užití v reálných aplikacích. Dále se nabízí k řešení

problém vysoké citlivosti na změny okolních podmínek prostředí. Tato citlivost je tak velká, že při běžném provozu v relativně stabilním prostředí by bylo nezbytné NC-obvod neustále manuálně přeladovat, což je opět aplikačně velmi nevhodné. Dalším problémem je obtížnost nalezení optimálního nastavení NC-obvodu. Pro dosažení tlumícího efektu se musí NC-obvod nacházet přesně v optimálním pracovním bodě, v souladu s rovnicemi uvedenými v části 2.1.2. Již při minimální odchylce od optimálního pracovního bodu rychle klesá účinnost potlačení přenosu vibrací. Díky jednoduchosti systému je možné vytvořit jeho matematický model, který by mohl být využit k automatickému nastavování NC-obvodu. Tato cesta je však zapovězena, vzhledem k výše uvedeným skutečnostem. Tento problém (absolutní, přesné nastavení laditelných prvků NC-obvodu na základě modelových optimálních hodnot) je rovněž rozebrán v této části. Následující podkapitoly si kladou za cíl výše zmíněné problémy přesněji pojmenovat a vymezit jejich významnost.

### Citlivost a stabilita

V této části je analyzováno, s jakou relativní přesností musí být splněny podmínky dané rovnicemi (12a), (12b), aby bylo dosaženo požadovaného potlačení přenosu vibrací. Tuto analýzu lze rozdělit do dvou kroků. Zaprvé, analyzování citlivosti přenosu vibrací  $TR$  na konstantě tuhosti aktuátoru  $K$  a zadruhé, analyzování citlivosti efektivní konstanty tuhosti aktuátoru  $K_{eff}$  na kapacitě NC-obvodu  $C$ . Pro realizaci prvního kroku analýzy je výhodné vyjádřit míru potlačení přenosu vibrací  $\Delta L_{TR}$ , kterého je dosaženo metodou aktivního řízení elasticity připojením NC-obvodu:

$$\Delta L_{TR} = 20(\log TR_{NC} - \log TR_S), \quad (13)$$

kde  $TR_{NC}$  a  $TR_S$  je přenos vibrací daný rovnicí (3) v případě, kdy je externí obvod připojený resp. odpojený od piezoelektrického aktuátoru. Při malých hodnotách konstanty tuhosti  $K$  v pásmu nad rezonanční frekvencí systému  $\omega_0$  lze dosáhnout míry potlačení přenosu vibrací:

$$\Delta L_{TR} \approx 10 \log |K_{eff}/K_S|, \quad (14)$$

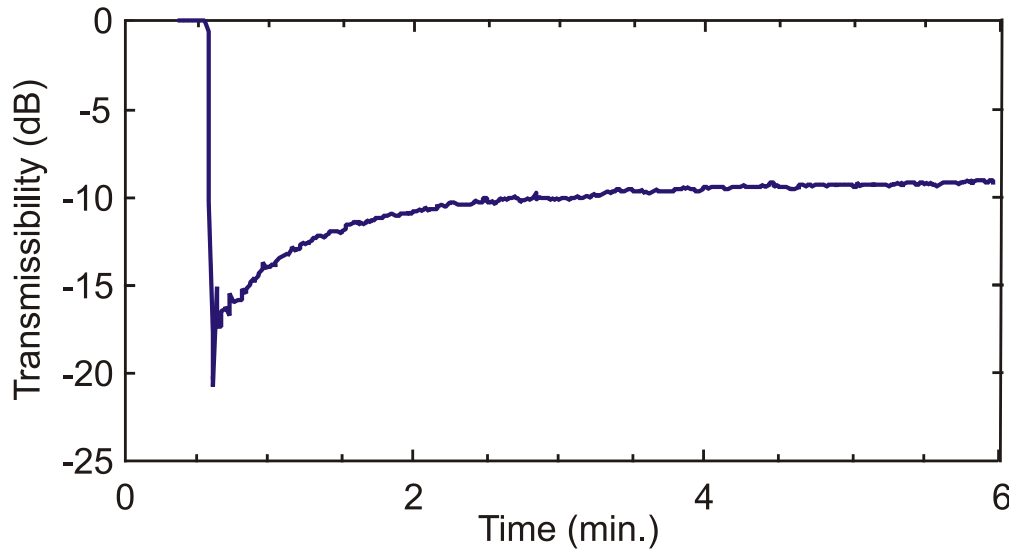
kde  $K_{eff}$  je efektivní konstanta tuhosti aktuátoru, která je řízena připojeným NC-obvodem.

Ve druhém kroku analýzy je výhodné definovat  $\Delta Z = Z - (-Z_S)$  jako odchylku impedance NC-obvodu  $Z$  od požadované hodnoty  $-Z_S$ . Pro malé odchylky  $\Delta Z$  je potom možné aproximovat rovnicí (7) vztahem:

$$K_{eff} \approx K_S \Delta Z / (k^2 Z_S). \quad (15)$$

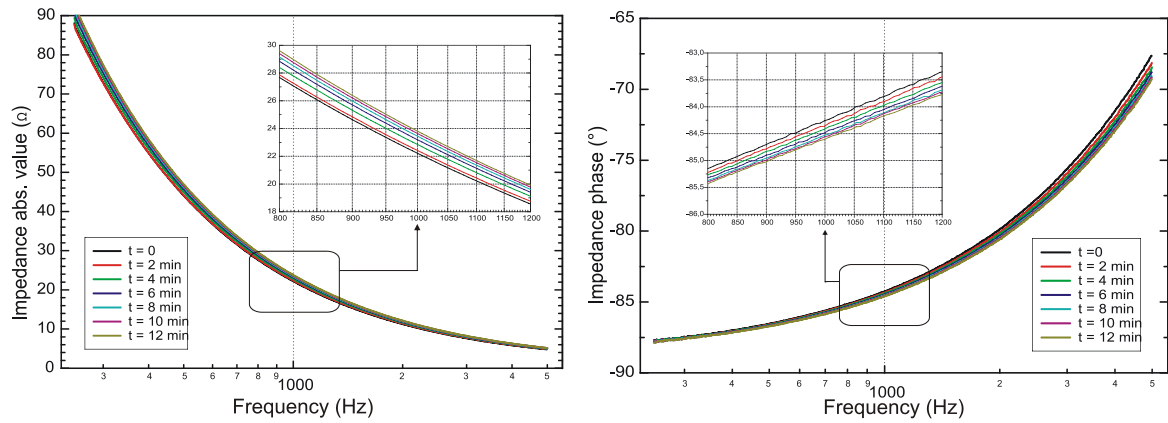
Z rovnice (14) lze odhadnout, že pro dosažení poklesu míry potlačení přenosu vibrací  $\Delta L_{TR}$  o 20 dB musí efektivní hodnota konstanty tuhosti klesnout stokrát. S ohledem na hodnotu koeficientu elektromechanické vazby konvenčních piezoelektrických keramik, tj.  $k^2 = 0.1$ , můžeme usoudit z rovnice (15), že relativní odchylka impedance NC-obvodu  $\delta Z = \Delta Z / Z_S$  od požadované hodnoty  $-Z_S$  musí být menší než 0.1%. K požadovanému snížení hodnoty konstanty tuhosti tedy dochází pouze při kritické hodnotě kapacity NC-obvodu a v jejím velmi úzkém okolí. Z toho plynou požadavky na velkou přesnost a citlivost nastavování kapacity NC-obvodu. NC-obvod lze nastavit na požadovanou hodnotu prostřednictvím dvou laditelných potenciometrů  $R_0$  a  $R_1$ .

Podstatný problém, který je spojený s manuálně nastavovaným systémem pro tlumení přenosu vibrací, je vysvětlen na Obr. 11. Modrá čára představuje časovou závislost přenosu vibrací v systému s manuálně nastaveným NC-obvodem, v prostředí s nestálými vlastnostmi. Systém pro tlumení přenosu vibrací byl nastaven v čase  $t = 0,5$  minuty a bylo dosaženo potlačení přenosu vibrací o 20 dB. Následně byl piezoelektrický aktuátor vystaven mírnému tepelnému záření žárovky o výkonu 100W, která byla umístěna ve vzdálenosti 25 cm od aktuátoru. Po třech minutách vzrostl přenos vibrací přibližně o 10 dB [viz rovnice (13)].



**Obr. 11.** Časový průběh přenosu vibrací poté, co byl NC-obvod nastaven tak, že bylo dosaženo potlačení přenosu vibrací o 20 dB a následně byl piezoelektrický aktuátor skokově vystaven tepelnému záření žárovky (100W) ze vzdálenosti 25 cm. Vlivem tepelného záření došlo během třech minut ke změně impedance (viz Obr. 12) a v důsledku toho také k nárůstu přenosu vibrací cca o 10 dB.

Důvod tohoto snížení účinnosti potlačení přenosu vibrací je vysvětlen pomocí grafů, které vidíme na Obr. 12. Obrázek prezentuje výsledky následujícího experimentu: svorky mechanicky volného piezoelektrického aktuátoru byly připojeny ke spektrálnímu analyzátoru. V čase  $t = 0$  byl piezoelektrický aktuátor vystaven tepelnému záření žárovky o výkonu 100W ze vzdálenosti 15 cm. Ve dvouminutových intervalech byla vždy změřena frekvenční charakteristika elektrické impedance piezoelektrického aktuátoru  $Z_S$ . Vlevo vidíme absolutní hodnotu a vpravo fázi komplexní impedance. Z detailu grafů můžeme, například na frekvenci  $f = 1000\text{Hz}$  odečíst, že elektrická impedance piezoelektrického aktuátoru se vlivem tepelného záření během 12 minut změnila z hodnoty  $Z_S = 22,2 \cdot e^{-j84,3^\circ} \Omega$  na hodnotu  $Z_S = 23,8 \cdot e^{-j84,6^\circ} \Omega$ . Absolutní hodnota impedance  $Z_S$  se tedy zvýšila o 7,2%. Touto změnou impedance došlo k nárůstu relativní odchylky impedance NC-obvodu od požadované hodnoty  $-Z_S$ . Impedance NC-obvodu se přitom v čase neměnila, ale v důsledku změny teploty prostředí se měnila požadovaná hodnota. Jak je výše odvozeno, relativní odchylka  $\delta Z = \Delta Z / Z_S$  musí být menší než 0.1%. Tím je vysvětlen nárůst přenosu vibrací na Obr. 11. Aby nedocházelo při změnách v okolním prostředí k takto závažnému snížení účinnosti potlačení přenosu vibrací, je nezbytné realizovat adaptivní řízení impedance NC-obvodu tak, aby jeho nastavení vždy odpovídalo okamžité impedanci piezoelektrického aktuátoru  $Z_S$ .



**Obr. 12.** Měření frekvenčních charakteristik komplexní impedance piezoelektrického aktuátoru poté, co byl v čase  $t=0$  piezoelektrický aktuátor vystaven tepelnému záření žárovky (100W), ze vzdálenosti 15 cm. Vlevo jsou vyneseny absolutní hodnoty a vpravo fáze komplexní impedance aktuátoru. Parametrem je doba působení tepelného záření. V detailu vidíme (na frekvenci  $f=1kHz$ ), že se vlivem tepelného záření během 12 minut změnila komplexní impedance aktuátoru z hodnoty  $Z_S = 22,2 \cdot e^{-j84,3^\circ} \Omega$  na hodnotu  $Z_S = 23,8 \cdot e^{-j84,6^\circ} \Omega$ , což má za následek snížení účinnosti potlačení přenosu vibrací (viz Obr. 11).

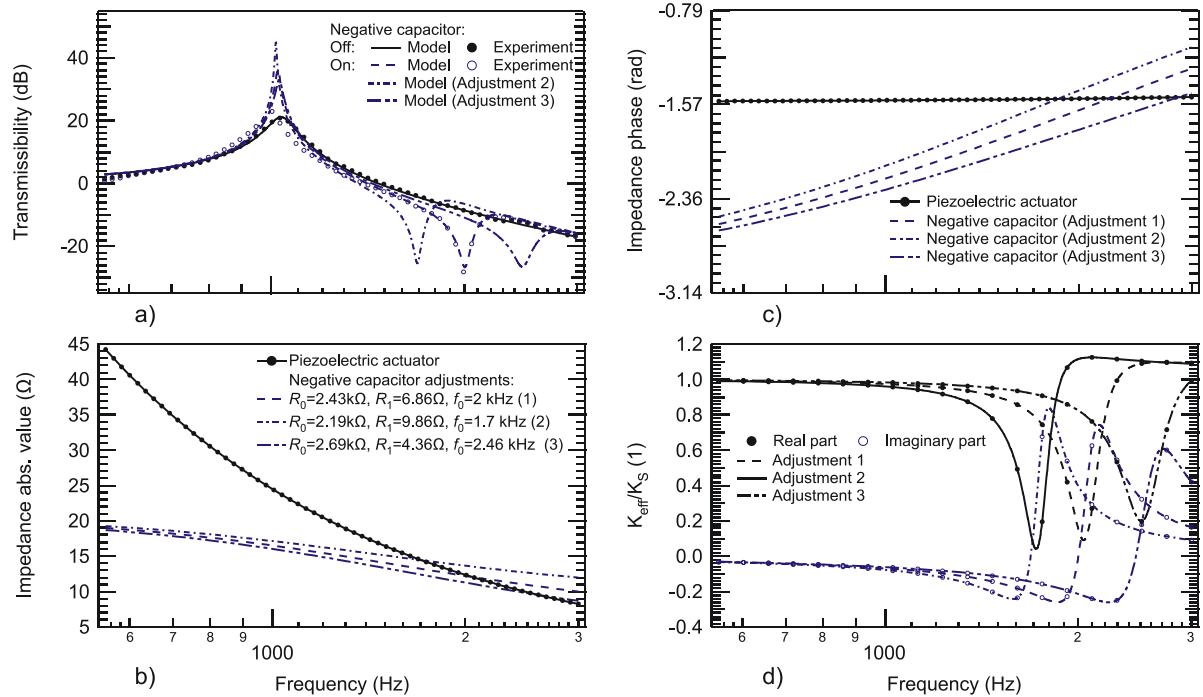
## Problém automatického nalezení optimálního nastavení NC-obvodu

NC-obvod lze manuálně nastavit pomocí dvou trimrů. Pro automatické nastavení je třeba realizovat elektronicky laditelné rezistory a především navrhnout algoritmus pro jejich řízení. Tato část si klade za cíl zhodnotit použitelnost matematického modelu systému pro výpočet požadovaných hodnot rezistorů  $R_0$ ,  $R_1$  za účelem řízení NC-obvodu. Pro demonstraci byl proveden následující experiment: zaprvé, byla změřena frekvenční závislost přenosu vibrací skrz piezoelektrický aktuátor se svorkami naprázdno, tj. s odpojeným NC-obvodem. Závislost byla změřena ve frekvenčním pásmu 550 Hz až 3kHz a výsledek je znázorněn plnými kolečky na Obr. 13(a). Naměřená frekvenční závislost přenosu vibrací byla porovnána s odhadem teoretického modelu, viz rovnice (3). Hodnota konstanty tuhosti  $K_S = 7.11 \cdot 10^7 \text{ Nm}^{-1}$ , hmotnost tlumeného objektu  $M = 1.67 \text{ kg}$  a mechanický činitel jakosti piezoelektrického aktuátoru  $Q = 11.3$  byly nalezeny metodou nejmenších čtverců. V následujícím kroku byl pro realizaci NC-obvodu užit operační zesilovač LF 356N, který byl zapojen dle schématu na Obr. 5. Napěťový zisk operačního zesilovače LF 356N byl aproximován funkcí  $A_u(\omega_0) = A_0/(1 + j\omega/(2\pi f_1))$ , kde  $A_0 = 105 \text{ dB}$  a  $f_1 = 100 \text{ Hz}$ .

Pro dosažení podmínky dané rovnicemi (12) musí hodnoty potenciometrů  $R_1$  a  $R_0$  odpovídat vztahům:

$$R_0 = \frac{\omega_0^2 C_0 C_S R_2 R_3^2}{1 + \omega^2 C_0^2 R_3^2}, \quad (16a)$$

$$R_1 = \frac{1}{\omega^2 C_0 C_S R_3} - R_S. \quad (16b)$$



**Obr. 13.** Frekvenční charakteristiky přenosu vibrací skrz piezoelektrický aktuátor s paralelně připojeným NC-obvodem (viz Obr. 5), frekvenční průběhy jeho efektivní tuhosti a porovnání impedance aktuátoru s impedancí NC-obvodu, pro tři různá nastavení laditelných rezistorů  $R_0$ ,  $R_1$ : a) porovnání naměřených hodnot přenosu vibrací skrz elektricky volný piezoelektrický aktuátor (plná kolečka) a skrz piezoelektrický aktuátor s paralelně připojeným NC-obvodem nastaveným na frekvenci  $f=2\text{kHz}$  (prázdná kolečka). Naměřené hodnoty přenosů vibrací jsou porovnány s hodnotami vypočtenými pomocí teoretického modelu. b) absolutní hodnoty elektrických impedancí piezoelektrického aktuátoru (naměřeno) a NC-obvodu pro tři různá nastavení rezistorů  $R_0$ ,  $R_1$  (vypočteno). c) fáze elektrických impedancí piezoelektrického aktuátoru (naměřeno) a NC-obvodu (vypočteno a zobrazeno s opačným znaménkem) d) vypočtená reálná a imaginární část efektivní konstanty tuhosti piezoelektrického aktuátoru s připojeným NC-obvodem. (Převzato z [26])

Pro zjištění optimálního nastavení NC-obvodu byla změřena pomocí spektrálního analyzátoru HP 4195 frekvenční závislost impedance piezoelektrického aktuátoru a závislost referenční impedance  $Z_I$ , které vidíme na Obr. 13(b) a Obr. 13(c). Pomocí metody nejmenších čtverců byly získány tyto hodnoty:  $R_S = 1.150 \Omega$ ,  $C_S = 6.602 \mu\text{F}$ ,  $R_3 = 27.840 \Omega$  a  $C_0 = 4.686 \mu\text{F}$ . Tyto hodnoty byly porovnány s přímo naměřenými hodnotami zvolených součástí. Pomocí RLC metru Escort ELS-3133A byly na frekvenci 1 kHz změřeny tyto hodnoty:  $R_S = 0,87 \Omega$ ,  $C_S = 6.94 \mu\text{F}$ ,  $R_3 = 24.50 \Omega$  a  $C_0 = 5.16 \mu\text{F}$ . Poté byla změřena hodnota rezistoru  $R_2 = 2.40 \text{ k}\Omega$  a potenciometry uvnitř NC-obvodu byly v souladu s rovnicemi (16) nastaveny na hodnoty  $R_0 = 2.41 \text{ k}\Omega$  a  $R_1 = 6.93 \Omega$ . Následně byly hodnoty těchto potenciometrů jemně doladěny tak, aby došlo na frekvenci 2 kHz k potlačení přenosu vibrací o 20 dB, jak můžeme vidět na Obr. 13(a) (křivka s prázdnými kolečky). Naměřená data přenosu vibrací byla nafitována do teoretického modelu daného rovnicemi (3), (8), (9) a (11). Metodou nejmenších čtverců byly získány následující hodnoty:  $k^2 = 0.064$ ,  $R_0 = 2.43 \text{ k}\Omega$  a  $R_1 = 6.86 \Omega$ . Pomocí RLC metru byly přímo změřeny hodnoty  $R_0 = 2.32 \text{ k}\Omega$  a  $R_1 = 6.20 \Omega$ .

Zde můžeme poznamenat, že relativní odchylka mezi změřenými a z modelu získanými hodnotami rezistorů se pohybuje mezi 5% až 11%. Tato odchylka je výrazně vyšší, než nejvyšší možná relativní odchylka mezi kapacitou NC-obvodu a kapacitou piezoelektrického aktuátoru, která nemá přesáhnout 0.1%. Důvodem těchto rozdílů je uplatnění parazitních kapacit v systému, jejichž zavedení do matematického modelu systému by jej učinilo extrémně složitým. Další nepřesnosti jsou dány tím, že elektronicky řízené potenciometry nelze nikdy absolutně nastavovat na vypočtené hodnoty odporu s potřebnou přesností. Z těchto důvodů je prakticky nemožné dosáhnout optimálního nastavení NC-obvodu pomocí hodnot z teoretického modelu.

### **Úzké pásmo efektivně potlačených vibrací**

Fyzikální podstatu potlačení přenosu vibrací pouze v úzkém frekvenčním pásmu lze snadno vysvětlit pomocí Obr. 13. Na Obr. 13 můžeme vidět srovnání frekvenčních charakteristik komplexních elektrických impedancí piezoelektrického aktuátoru a NC-obvodu. Impedance piezoelektrického aktuátoru byla proměřena spektrálním analyzátozem, data impedance NC-obvodu byla vypočtena. Vidíme zde tři křivky, přičemž parametrem jsou hodnoty rezistorů  $R_0$ ,  $R_1$  a kritická frekvence  $f_0$ . Obr. 13(b) a Obr. 13(c) ukazují, že podmínky dané rovnicemi (12a), (12b) jsou splněny pouze na velmi úzkém okolí konkrétní frekvence  $f_0$ . To je příčinou úzkého frekvenčního rozsahu, ve kterém může být dosaženo snížení reálné části efektivní konstanty tuhosti  $K_{eff}$  piezoelektrického aktuátoru, jak můžeme vidět na Obr. 13(d). Fakt, že ke změně tuhosti aktuátoru dochází pouze pro jednu frekvenci a její úzké okolí lze demonstrovat také na tom, že dochází pouze k minimálnímu snížení rezonanční frekvence řízením ovlivněného systému.

### **Charakter signálu efektivně potlačovaných vibrací**

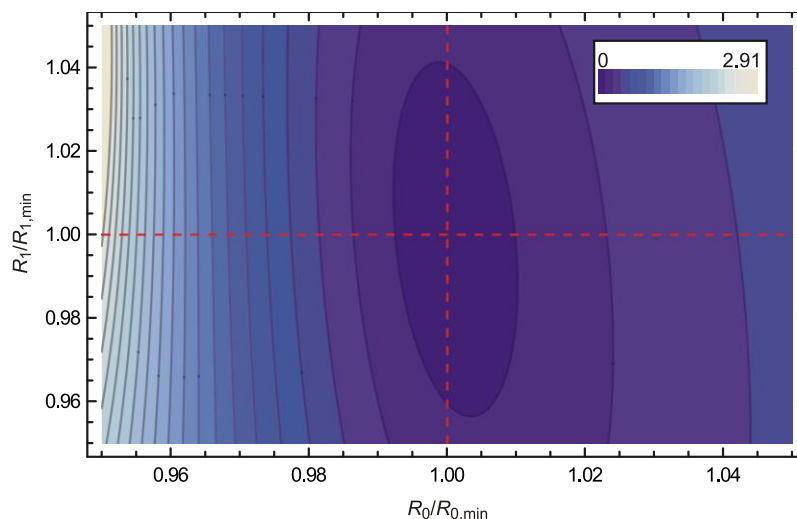
S šířkou pásma efektivně potlačovaných vibrací je úzce spojen charakter signálu potlačovaných vibrací. V předchozí kapitole je diskutován problém velmi úzkého pásma efektivně potlačovaných vibrací. V principu dochází k úplnému potlačení přenosu vibrací, avšak pouze na frekvenci, která náleží průsečíku impedancí piezoelektrického aktuátoru a NC-obvodu. Takový systém je schopen efektivně potlačit pouze velmi úzké frekvenční pásmo vibrací. Bylo by například možné izolovat stroj od vibrací, které mají frekvenci rovnu rezonanční frekvenci jeho konstrukce. Jiná uplatnění takového systému pro potlačení přenosu vibrací se však příliš nenabízí. V případě vystavení systému náročnějším deterministickým či náhodným vibracím jsou tyto vibrace, které se nachází mimo kritickou frekvenci, přeneseny téměř bez měřitelného útlumu. Problém rozšíření frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací je řešen v kapitole 4. V teoretickém případě optimalizace NC-obvodu pro celé frekvenční pásmo, by byly potlačovány jakékoli vibrace s mnoha harmonickými složkami, měnícími se fázemi, včetně nedeterministických vibrací, bez ohledu na rychlost a složitost dějů. Bylo by možno potlačovat i náhodný nestacionární signál vibrací. Jinými slovy, teoreticky by nebyla vyžadována znalost charakteru excitovaných vibrací, jejichž přenos má být navrhovanými systémy efektivně potlačován. Z toho vyplývá další potenciální výhoda oproti konvenčním aktivním metodám pro tlumení přenosu vibrací.

### 3 Adaptivní řízení elastických vlastností piezoelektrických aktuátorů

Z části 2.3 lze vyvodit závěr, že přímý výpočet optimálních hodnot parametrů NC-obvodu z matematického modelu systému pro potlačení přenosu vibrací je prakticky nerealizovatelný. Důvodem je značná principiální citlivost systému a vliv neodstranitelných parazitních kapacit a přechodových odporů, které lze sice do matematického modelu zahrnout, ale je prakticky nemožné je v reálném systému identifikovat. V této kapitole je prezentován způsob, kterým lze NC-obvod nastavit pomocí iteračního řídicího algoritmu. Tento způsob adaptivního řízení navrhnul ve své disertační práci T. Sluka [27]. Později bylo prezentováno několik publikací, které byly založeny na tomto řízení [23], [28]. Neustálým opakováním procesu, který je popsán v části 3.1, dochází k neustálému přibližování se požadovanému výsledku, při okamžitých podmínkách měnícího se okolního prostředí. Tímto řízením proto není řešen pouze problém automatického nastavení NC-obvodu, ale také problém velké citlivosti NC-obvodu a malé stability tlumicího efektu s ohledem na nestacionární vlastnosti okolního prostředí (viz část 2.3).

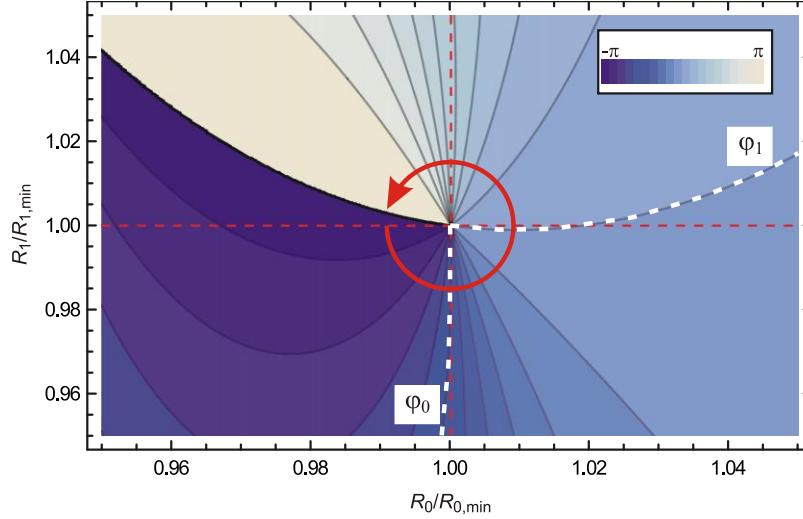
#### 3.1 Algoritmus pro adaptivní řízení NC-obvodu

Řídicí algoritmus, který byl poprvé popsán v práci [27], lze formulovat pomocí analýzy vrstevnicových diagramů, na kterých je vynášena absolutní hodnota a argument obecně komplexní efektivní konstanty tuhosti  $K_{eff}$  piezoelektrického aktuátoru s paralelně připojeným NC-obvodem. Kapacita záporného kondenzátoru, který vidíme na Obr. 5, je funkcí odporu rezistorů  $R_0$  a  $R_1$ . Na Obr. 14 jsou hodnoty rezistorů  $R_0$  a  $R_1$  normalizovány hodnotami  $R_{0,min}$  a  $R_{1,min}$ . Hodnoty  $R_{0,min}$  a  $R_{1,min}$  reprezentují optimální hodnoty rezistorů  $R_0$  a  $R_1$ , při kterých je absolutní hodnota efektivní konstanty tuhosti nulová. Můžeme vidět, že absolutní hodnota  $K_{eff}$  dosáhne nuly, pokud platí  $R_0/R_{0,min}=1$  a  $R_1/R_{1,min}=1$ .



**Obr. 14.** Vrstevnicový graf - absolutní hodnota efektivní konstanty tuhosti  $K_{eff}$  piezoelektrického aktuátoru s připojeným NC-obvodem je funkcí hodnot laditelných rezistorů  $R_0$ ,  $R_1$  (viz Obr. 5). Hodnoty  $R_0$ ,  $R_1$  jsou normalizovány hodnotami  $R_{0,min}$  a  $R_{1,min}$  (tj. hodnoty rezistorů  $R_0$ ,  $R_1$ , při kterých je dosaženo nulové absolutní hodnoty efektivní konstanty tuhosti  $K_{eff} = K'_{eff} + jK''_{eff}$ ). (Převzato z [26])

Zajímavější je graf pro argument efektivní konstanty tuhosti  $K_{eff} = K'_{eff} + jK''_{eff}$ , který vidíme na Obr. 15. Z obrázku je zřejmé, že hodnota  $\arg(K_{eff})$  monotónně roste s tím, jak se bod  $(R_0, R_1)$  pohybuje kolem optimálního bodu nastavení  $(R_{0,min}, R_{1,min})$  v protisměru hodinových ručiček. Měřením argumentu  $K_{eff}$ , tj.  $\varphi = \arg(K_{eff})$  tedy získáváme informaci o tom, ve kterém „směru“ se vzhledem k okamžitým hodnotám  $(R_0, R_1)$  nachází bod optimálního nastavení  $(R_{0,min}, R_{1,min})$ .



**Obr. 15.** Vrstevnicový graf - argument efektivní konstanty tuhosti  $K_{eff}$  piezoelektrického aktuátoru s připojeným NC-obvodem je funkcí hodnot laditelných rezistorů  $R_0, R_1$  (viz Obr. 5). Hodnoty  $R_0, R_1$  jsou normalizovány hodnotami  $R_{0,min}$  a  $R_{1,min}$  (tj. hodnoty rezistorů  $R_0, R_1$ , při kterých je dosaženo nulové absolutní hodnoty efektivní konstanty tuhosti  $K_{eff} = K'_{eff} + jK''_{eff}$ ). (převzato z [26])

Užitím tohoto principu je možné formulovat iterativní řídicí algoritmus následujícím způsobem:

$$R_{0,n+1} = \begin{cases} R_{0,n} + \Delta R_0 & \text{pro } \varphi < \varphi_0, \\ R_{0,n} - \Delta R_0 & \text{pro } \varphi_0 < \varphi < \varphi_0 + \pi, \\ R_{0,n} + \Delta R_0 & \text{pro } \varphi_0 + \pi < \varphi, \end{cases} \quad (17a)$$

$$R_{1,n+1} = \begin{cases} R_{1,n} + \Delta R_1 & \text{pro } \varphi < \varphi_1, \\ R_{1,n} - \Delta R_1 & \text{pro } \varphi > \varphi_1. \end{cases} \quad (17b)$$

Symbyly  $R_{0,n+1}, R_{0,n}$  a  $R_{1,n+1}, R_{1,n}$  reprezentují hodnotu v příštím kroku a aktuální hodnotu rezistoru  $R_0$ , respektive  $R_1$ . Hodnoty  $\Delta R_0$  a  $\Delta R_1$  představují velikost kroku, se kterým se rezistory  $R_0, R_1$ , uvnitř NC-obvodu mění. Symbyly  $\varphi_0$  a  $\varphi_1$  znamenají kritické hodnoty  $\arg(K_{eff})$ , které jsou na Obr. 15 vyznačeny. Konkrétní hodnoty  $\varphi_0$  a  $\varphi_1$  musí být obvykle zjištěny experimentálně. Následující podkapitola prezentuje jednoduché řešení pro odhad komplexní hodnoty efektivní konstanty tuhosti.



### 3.2 Odhad argumentu efektivní konstanty tuhosti

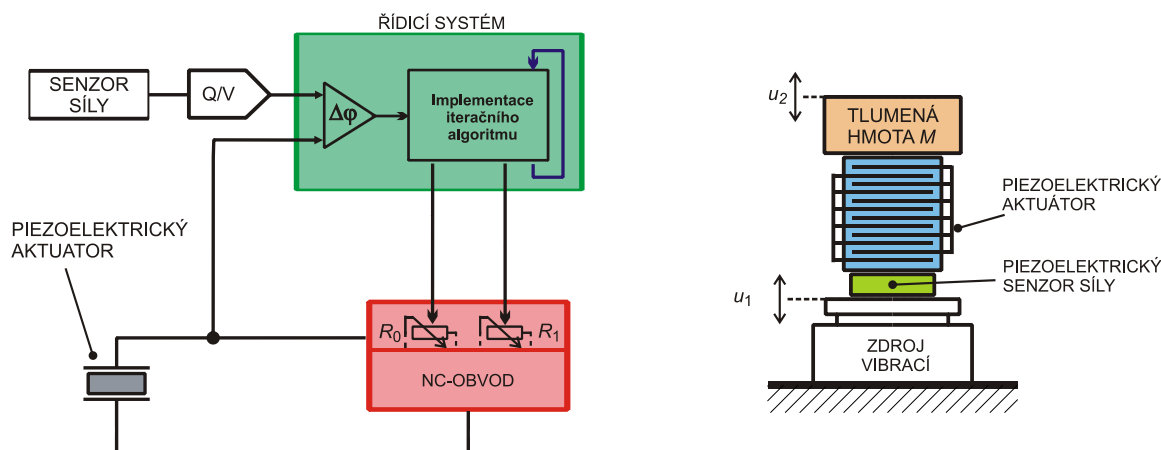
Efektivní hodnota konstanty tuhosti je dána poměrem přenesené síly  $F$  skrz piezoelektrický aktuátor ku jeho prodloužení  $\Delta l$ , viz rovnice (7). Přenesenou sílu je jednoduše možné měřit pomocí piezoelektrického senzoru síly. Odhad prodloužení aktuátoru může být proveden následujícím způsobem.

Pokud je NC-obvod udržován v optimálním nastavení, síla přenášená piezoelektrickým aktuátorem je velmi malá. Pokud je přenášená síla  $F$  velmi malá, vyplývá z rovnice (5), že první část pravé strany rovnice (5), tj.  $(1/K_S)F$  je výrazně menší, než druhá část, tj.  $dV$ . V této situaci je prodloužení piezoelektrického aktuátoru dáno především nepřímým piezoelektrickým jevem, tedy je proporcionální velikosti napětí na svorkách připojeného NC-obvodu, tj.  $\Delta l \propto V$ . Pro odhad argumentu efektivní konstanty tuhosti stačí vypočítat fázový rozdíl mezi signálem ze senzoru síly  $F$  a signálem napětí  $V$ , které vzniká na svorkách paralelně připojeného NC-obvodu:

$$\arg(K_{eff}) \approx \arg F - \arg V \quad (18)$$

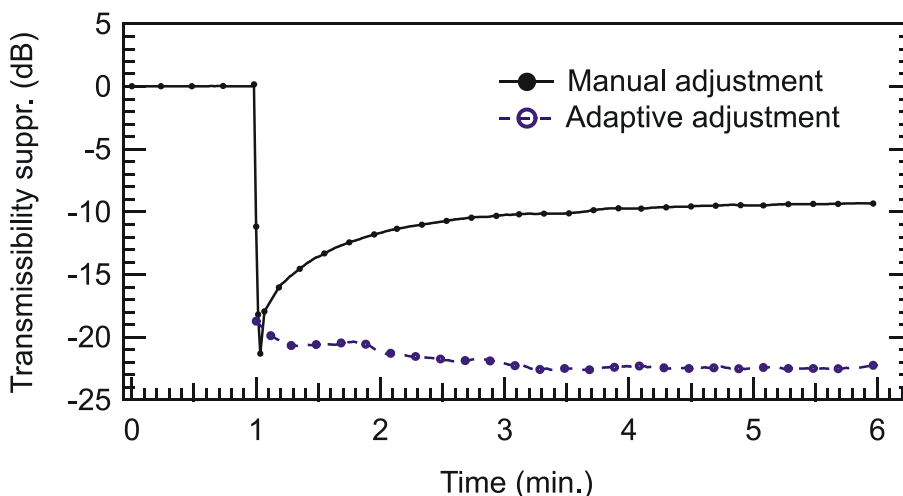
### 3.3 Princip řízení – elektrické a mechanické uspořádání

Na Obr. 16 vpravo můžeme vidět systém pro potlačení přenosu vibrací, který je doplněn o piezoelektrický senzor síly. Tento senzor síly měří sílu přenášenou skrz piezoelektrický aktuátor. Tímto senzorem síly je generován jeden ze dvou signálů, které jsou nezbytné pro odhad argumentu efektivní konstanty tuhosti (viz předchozí část 3.2). Druhým nezbytným signálem je napětí snímané přímo na piezoelektrickém aktuátoru, které je úměrné jeho okamžitému mechanickému posunutí. Na Obr. 16 vlevo vidíme elektrické uspořádání systému. Pro jednoduchost uvažujme prozatím pouze harmonické vibrace. Při buzení systému harmonickými vibracemi jsou oba snímané signály rovněž harmonické. Úlohou řídicího systému je neustále počítat okamžitý fázový rozdíl těchto dvou signálů a získávat tak odhad argumentu efektivní konstanty tuhosti. V řídicím systému je rovněž implementován iterační řídicí algoritmus, který na základě odhadu argumentu efektivní konstanty tuhosti rozhoduje o zvýšení, respektive o snížení hodnot rezistorů  $R_0$ ,  $R_I$  v příštím kroku. Poté, co dojde k přeladění elektronicky nastavitelných rezistorů  $R_0$ ,  $R_I$  uvnitř NC-obvodu o pevně stanovený krok  $\Delta R$ , dojde současně také ke změně fázového rozdílu mezi snímanými signály. Neustálým opakováním tohoto procesu konvergují hodnoty řídicích rezistorů k optimálním hodnotám a dochází k potlačení přenosu vibrací. Bohužel, v okamžiku, kdy jsou vibrace efektivně potlačeny, přichází řídicí systém o užitečnou informaci ze senzoru síly. Současně s přenosem vibrací je minimalizován i přenos dynamických sil a signál ze senzoru síly se blíží nule (je na úrovni šumu). Proto není možné po dosažení určité úrovně potlačení přenosu vibrací nastavení NC-obvodu nadále optimalizovat. Přesto však lze standardně dosáhnout potlačení přenosu vibrací cca o 20 až 40 dB, jak můžeme vidět např. na Obr. 17 a Obr. 18.



**Obr. 16.** Obrázek vpravo: mechanické uspořádání adaptivního systému pro potlačení přenosu vibrací – systém je doplněn o piezoelektrický senzor síly, který měří přenesené síly; Obrázek vlevo: elektrické zapojení adaptivního systému pro potlačení přenosu vibrací

Nutno však zdůraznit, že piezoelektrický senzor síly není možné chápat jako chybový senzor tak, jak je definován a klasické teorii aktivního potlačování hluku a vibrací. Senzor síly principiálně není nutný k samotnému potlačování přenosu vibrací, ale je funkční pouze v režimu nastavování optimálních hodnot elektronicky laditelných rezistorů v NC-obvodu. V okamžiku, kdy je optimální nastavení nalezeno, senzor síly může být od systému odpojen bez vlivu na potlačení přenosu vibrací.



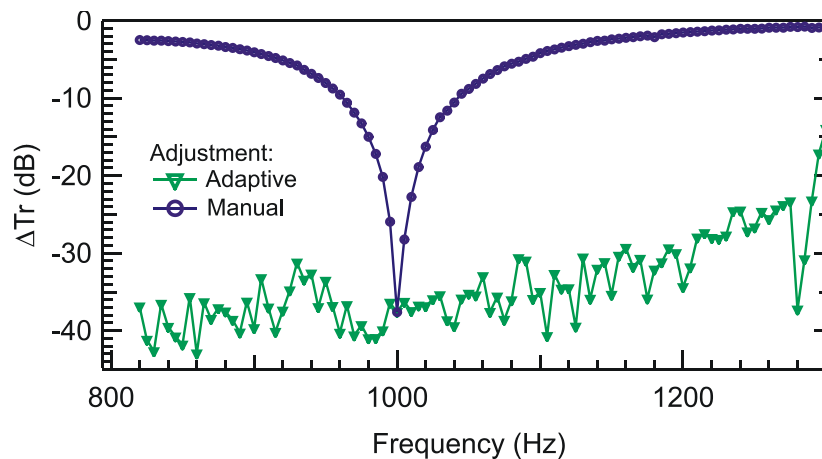
**Obr. 17.** Porovnání časové závislosti účinnosti potlačení přenosu vibrací s manuálně nastaveným NC-obvodem (plná čára) a s adaptivně řízeným NC-obvodem (přerušovaná čára), při vystavení systému změnám okolní teploty.

Aplikací výše prezentovaných principů lze dosáhnout následujícího efektu:

1) pomocí řídicího obvodu je eliminován problém prezentovaný v části 2.3, konkrétně velká citlivost NC-obvodu na změny v prostředí. NC-obvod je adaptován na okamžité okolní podmínky. Prezentované výsledky byly naměřeny na systému, který schematicky vidíme na Obr. 16. Na Obr. 17 vidíme dvě křivky. Černou křivku s plnými kolečky již známe z Obr. 11. Zachycuje situaci, kdy byl systém vybuzen harmonickými vibracemi o frekvenci 1 kHz a NC-obvod byl manuálně nastaven tak, že bylo dosaženo

potlačení přenosu vibrací cca o 20 dB (v čase  $t = 1$  min.). Následně byl piezoelektrický aktuátor skokově vystaven tepelnému záření žárovky a během pěti minut vzrostl přenos vibrací o 10 dB. Modrá křivka s prázdnými kolečky prezentuje výsledky naměřené na systému, který je řízen řídicím systémem (viz Obr. 16). Experiment byl opakován. V čase  $t = 1$  min. byl NC-obvod řídicím systémem automaticky optimálně nastaven a piezoelektrický aktuátor byl opět vystaven tepelnému záření žárovky. Na obrázku vidíme, že přenos vibrací je stabilně potlačován více než o 20 dB a vliv teplotních změn je efektivně eliminován.

2) pomocí NC-obvodu je, v doposud prezentované konfiguraci, možné efektivně potlačovat pouze velmi úzké frekvenční pásmo vstupních vibrací. Z Obr. 13 je zřejmé, že pro každou frekvenci vstupních vibrací existují specifické hodnoty pro optimální nastavení NC-obvodu. U manuálně nastaveného NC-obvodu dochází při změně frekvence vstupních vibrací k prudkému nárůstu přenosu vibrací (viz Obr. 18 – modrá křivka). Řídicí obvod je schopen adaptovat NC-obvod na změny frekvence vstupních vibrací automaticky, jak můžeme vidět na Obr. 18 – zelená křivka.



**Obr. 18.** Pokles přenosu vibrací  $\Delta Tr$  [viz rovnice (19)] s manuálně nastaveným NC-obvodem (modrá čára) a s adaptivně řízeným NC-obvodem (zelená čára).

Na Obr. 18 je vynesena pokles přenosu vibrací, který je označen symbolem  $\Delta Tr$ . Pod tímto symbolem rozumíme pokles přenosu vibrací při zapnutém NC-obvodu, vůči přenosu vibrací bez NC-obvodu (viz Obr. 6). Protože přenesené vibrace jsou proporcionálně úměrné přenesené síle, která je měřena senzorem síly (viz Obr. 16), můžeme  $\Delta Tr$  vypočítat z dat naměřených na senzoru síly dle vztahu:

$$\Delta Tr = 20 \log \frac{U_{NC\ on}}{U_{NC\ off}}, \quad (19)$$

kde  $U_{NC\ on}$  je napětí na výstupu nábojového zesilovače senzoru síly s připojeným NC-obvodem a  $U_{NC\ off}$  je napětí na výstupu nábojového zesilovače senzoru síly s odpojeným NC-obvodem.

Obrázek zachycuje opět chování systému ve dvou režimech. Nejdříve bylo proměřeno  $U_{NC-off}(f)$ , tedy frekvenční charakteristika přenesené síly bez NC-obvodu. Poté byl NC-obvod nastaven na frekvenci 1 kHz a řídicí systém byl vypnut. Následně bylo

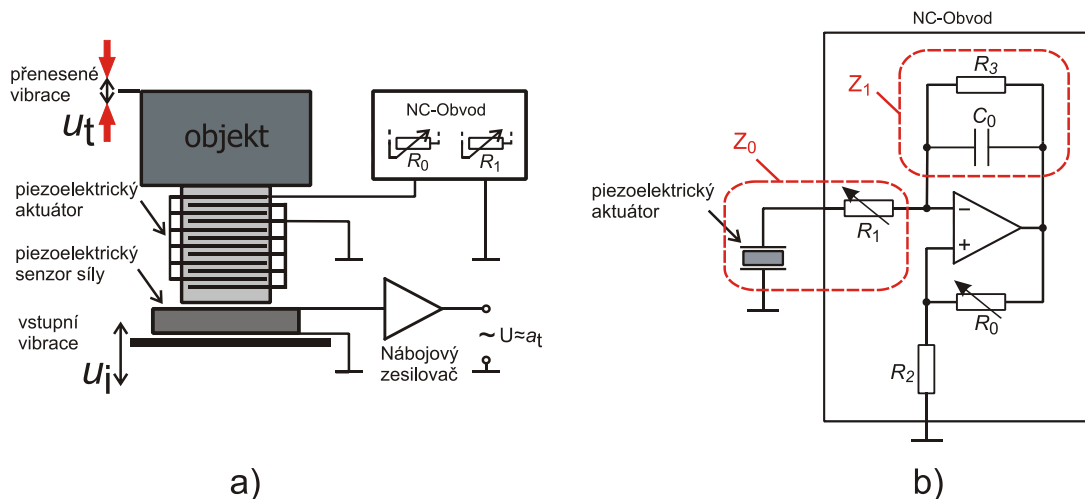
proměřeno  $U_{NC-on}(f)$ , tedy frekvenční charakteristika přenesené síly s připojeným NC-obvodem. Modrá křivka s prázdnými kolečky zobrazuje pokles přenosu vibrací  $\Delta Tr$ , který byl z naměřených dat vypočten dle vztahu (19). Zelená křivka s trojúhelníčky byla naměřena a vypočtena stejným způsobem, s rozdílem, že řídicí systém byl zapnut. Z obrázku je patrné, že ve frekvenčním pásmu širším než 400 Hz byl řídicí obvod při změnách frekvence vstupních vibrací schopen NC-obvod okamžitě přelaďovat tak, že bylo dosaženo potlačení přenosu vibrací o více než 30dB. Řídicí systém na Obr. 16 vždy adaptuje NC-obvod pro efektivní potlačení harmonických vibrací na vlastní okamžité frekvenci. Nevýhodou však je že adaptivní nastavování NC-Obvodu je podmíněno právě harmonickým časovým průběhem vstupních vibrací.

## 4 Rozšíření frekvenčního pásma potlačování přenosu vibrací

V realizacích, které jsou prezentovány v části 3.3 je zahrnuto veškeré výše prezentované know-how. Velkou nevýhodou však je fakt, že efektivně lze potlačit v širokém frekvenčním spektru libovolnou, ovšem vždy jedinou frekvenci vstupních vibrací, a její úzké frekvenční okolí. Tento fakt je velkým hendikepem pro praktické uplatnění metody v reálných aplikacích. Dalším krokem je proto navrhnout řešení pro účinné potlačování přenosu vibrací s více harmonickými složkami včetně šumové složky. Tomuto problému je věnována tato kapitola.

### 4.1 Optimální nastavení NC obvodu z hlediska impedancí

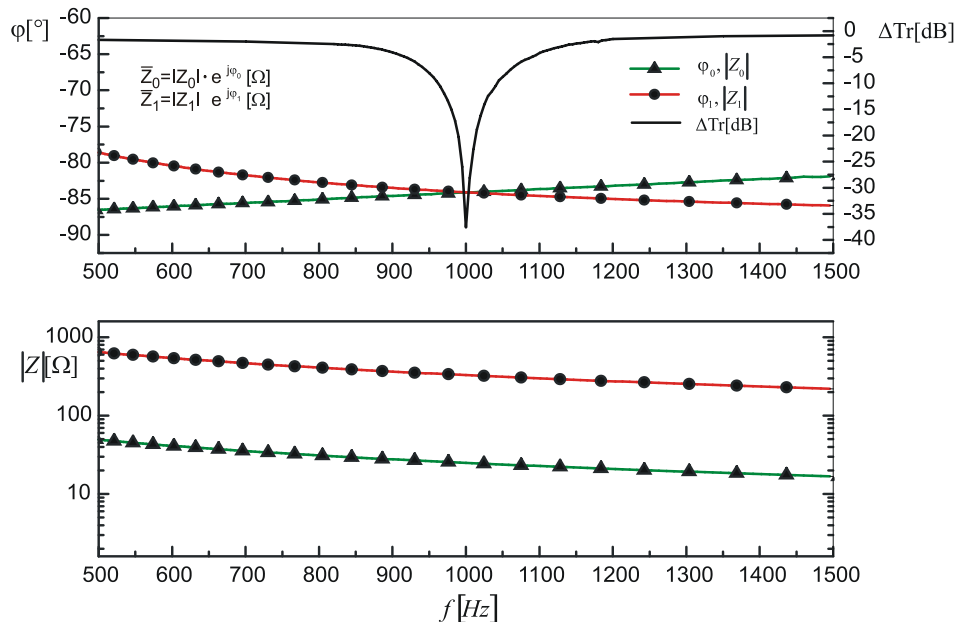
Úkolem této části je ukázat situaci, kdy je NC-obvod pro tlumení vibrací optimálně nastaven z hlediska jednotlivých impedancí ve zpětných vazbách operačního zesilovače.



**Obr. 19.** Systém pro potlačení přenosu vibrací doplněný o piezoelektrický senzor síly pro možnost měření přenesených sil a výpočet poklesu přenosu vibrací  $\Delta Tr$  (a). Elektrické schéma NC-obvodu s paralelně připojeným piezoelektrickým aktuátorem. Paralelní kombinace  $R_3$  a  $C_0$  ve zpětné vazbě představuje referenční impedanci  $Z_1$  a sériová kombinace piezoelektrického aktuátoru a potenciometru  $R_1$  uvnitř NC-obvodu tvoří impedanci  $Z_0$ (b).

Na Obr. 19(b) je zobrazeno elektrické schéma NC-obvodu. Paralelní kombinaci  $R_3$  a  $C_0$  ve zpětné vazbě budeme nadále nazývat referenční impedancí  $Z_1$  a sériovou kombinaci piezoelektrického aktuátoru a potenciometru  $R_1$  uvnitř NC-obvodu budeme označovat  $Z_0$ . Na Obr. 19(a) vidíme opět systém pro potlačení přenosu vibrací s připojeným NC-obvodem, který lze přeladovat změnou potenciometrů  $R_0$  a  $R_1$ , protentokrát ručně. Piezoelektrický senzor síly měří přenesené síly pro výpočet  $\Delta Tr$  dle vztahu (19).

Následující experiment ukazuje, jaké podmínky (z hlediska vyznačených impedancí) musí být splněny pro dosažení tlumivého efektu. Frekvence vstupních vibrací byla nastavena na 1 kHz a obvod byl poté na tuto frekvenci manuálně nastaven tak, že byl přenos vibrací potlačen cca o 35 dB. Poté byl změřen pokles přenosu vibrací  $\Delta Tr$ , který vidíme na Obr. 20 nahoře (černá křivka). Následně byly od NC-obvodu odpojeny a změřeny komplexní impedance  $Z_0$ ,  $Z_1$  [viz Obr. 19(b)], jejichž frekvenční průběhy vidíme na Obr. 20. Zelená křivka s trojúhelníčky náleží impedanci  $Z_0$  a červená křivka s kolečky náleží referenční impedanci  $Z_1$ , přičemž na spodním obrázku jsou vyneseny absolutní hodnoty a na horním obrázku fáze obou komplexních impedancí.



**Obr. 20.** Frekvenční závislosti absolutní hodnoty a fáze impedancí  $Z_0$ ,  $Z_1$  (viz Obr. 19) a frekvenční charakteristika poklesu přenosu vibrací  $\Delta Tr$ .

Podívejme se nyní na naměřené skutečné hodnoty jednotlivých obvodových prvků NC-obvodu (naměřeno na frekvenci 1 kHz). Pomocí spektrálního analyzátoru HP 4195A a RLC-metru byly naměřeny následující hodnoty:  $Z_1 = 329,19 \cdot e^{-j84,11}$ ,  $Z_0 = 24,95 \cdot e^{-j84,14}$ ,  $R_0 = 55,80 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 4,20 \text{ k}\Omega$ . Můžeme konstatovat, že argumenty obou impedancí se téměř shodují (liší se o tři setiny stupně), a rovněž poměry  $|Z_1|/|Z_0| = 13,19$  a  $R_0/R_2 = 13,28$  se liší o devět setin ohmu. Z obrázku je zřejmé, že průběhy absolutních hodnot obou impedancí jsou v celém měřeném frekvenčním pásmu rovnoběžné. Proto bude i jejich poměr v celém pásmu konstantní. Ovšem ke shodě fází obou impedancí dochází pouze v jediném bodě, na frekvenci kde se oba průběhy fází protínají a právě na této frekvenci také dochází k potlačení přenosu vibrací (viz Obr. 20).

Výsledkem experimentu tedy je, že tlumícího efektu je dosaženo tehdy, když jsou impedance  $Z_0, Z_1$  ve fázi, tedy platí:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 0 \quad (20)$$

a zároveň poměr jejich velikostí je roven poměru rezistorů  $R_0, R_2$ , tedy:

$$\frac{|Z_1|}{|Z_0|} = \frac{R_0}{R_2}. \quad (21)$$

Ve stavu, kdy je splněna podmínka daná rovnicí (20), je vykompenzována imaginární složka ve zpětné vazbě operačního zesilovače NC-obvodu, neboť platí:

$$\frac{Z_1}{Z_0} = \frac{|Z_1| \cdot e^{j\varphi_1}}{|Z_0| \cdot e^{j\varphi_0}} = \frac{|Z_1| \cdot e^{j(\varphi_1 - \varphi_0)}}{|Z_0|} = \frac{|Z_1|}{|Z_0|}. \quad (22)$$

Zároveň můžeme konstatovat, že v tomto pracovním bodě se obvod s operačním zesilovačem na Obr. 19(b) nachází na mezi stability, což koresponduje s praktickou zkušeností. Praktická zkušenost je taková, že pokud dojde k nepatrnému přesáhnutí meze stability, systém pracuje v režimu záporné elasticity (viz Obr. 4 - červená přerušovaná čára), potom dochází k tomu, že vstupní vibrace prochází skrz aktuátor s opačnou fází, přičemž amplituda přenesených vibrací může přerůst amplitudu vstupních vibrací. Při dalším snížení potenciometru  $R_0$  se stane obvod nestabilním, čímž je destabilizován rovněž systém aktuátor-tlumená hmota.

Ke stejným závěrům, ke kterým jsme dospěli na základě experimentu, dojdeme také na základě jednoduchého matematického modelu. Na Obr. 19(a) vidíme opět piezoelektrický objemový aktuátor, který je paralelně připojen k NC-obvodu. Tento piezoelektrický element izoluje tlumený objekt o hmotnosti  $m$  od zdroje vibrací, který budí systém vstupními vibracemi  $u_i(t) = U_i \cdot e^{i\omega t}$ . Pohyb tlumeného objektu je popsán pohybovou rovnicí

$$m \frac{d^2 u_t}{dt^2} = F(t), \quad (23)$$

kde  $u_t(t) = U_t \cdot e^{i\omega t}$  je časová závislost přenesených vibrací,

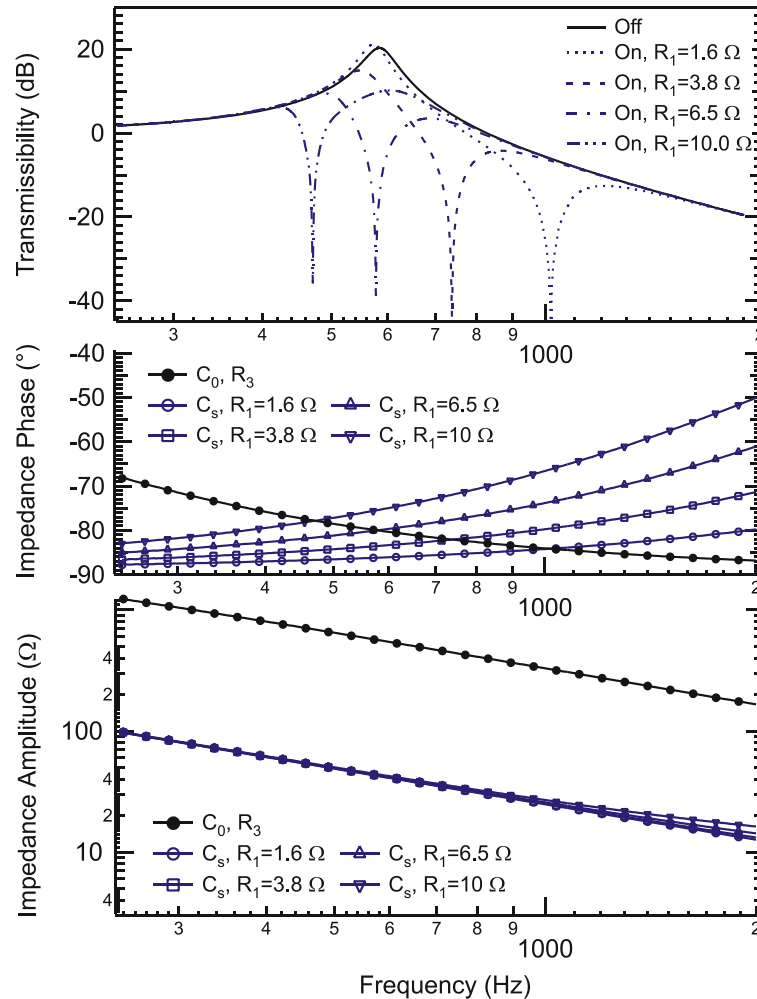
$$F(t) = K^{eff} [u_t(t) - u_i(t)], \quad (24)$$

a  $K^{eff}$  jsou síla přenesená skrz piezoelektrický aktuátor a jeho efektivní konstanta tuhosti. Přenos vibrací skrz mechanický systém je definován jako poměr amplitudy přenesených vibrací  $U_t$  ku amplitudě vstupních vibrací  $U_i$  vzhledem k referenčnímu bodu:

$$TR = |U_t / U_i|. \quad (25)$$

Po vyřešení rovnic (23), (24) získáváme rovnici pro přenos vibrací ve tvaru:

$$TR = \left| \frac{K^{eff}}{K^{eff} - m\omega^2} \right|. \quad (26)$$



**Obr. 21.** Vliv frekvenčních průběhů impedancí  $Z_0$  a  $Z_1$  (viz Obr. 19b) na frekvenční charakteristiku přenosu vibrací skrz piezoelektrický aktuátor s paralelně připojeným NC-obvodem (viz Obr. 19a). Černé křivky na spodních dvou obrázcích jsou naměřená absolutní hodnota a fáze referenční impedance  $Z_1$  (naměřeno) a modré křivky jsou absolutní hodnota a fáze komplexní impedance  $Z_0$  (naměřeno). Parametrem je hodnota rezistoru  $R_1$ . Na horním obrázku je přenos vibrací s odpojeným NC-obvodem (černá, plná čára - naměřeno) a přenosy vibrací s připojeným NC-obvodem pro různé hodnoty rezistoru  $R_1$  (přerušované čáry – vypočteno z modelu systému). Vibrace jsou efektivně potlačeny na frekvenci, kde se fáze obou impedancí protínají. (převzato z [29])

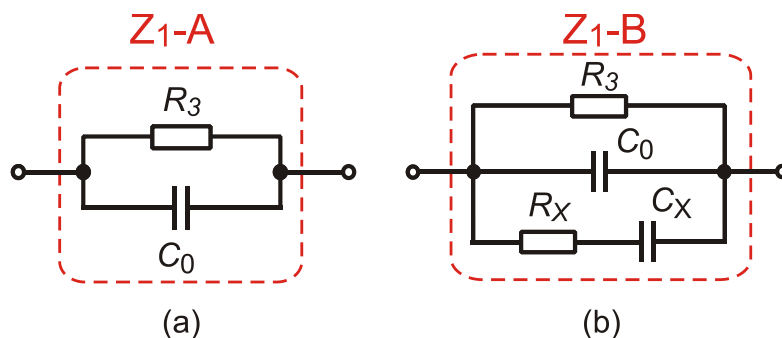
Na Obr. 21 nahoře vidíme výsledky numerické simulace frekvenční závislosti přenosu vibrací, která byla získána kombinací rovnic (26), (7), (8), (9). Vstupními daty pro tuto simulaci byla naměřená data komplexních impedancí  $Z_0$ ,  $Z_1$  [viz Obr. 19(b)], jejichž frekvenční závislosti byly změřeny pomocí spektrálního analyzátoru. Na spodním

obrázku vidíme absolutní hodnoty a na prostředním fáze obou komplexních impedancí, přičemž černé křivky náleží referenční impedanci  $Z_1$  ( $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $C_0 = 470 \text{ nF}$ ) a modré křivky náleží impedanci  $Z_0$ , tedy sériové kombinaci piezoelektrického aktuátoru a rezistoru  $R_1$ . Parametrem impedance  $Z_0$  je hodnota rezistoru  $R_1$ .

Z naměřených dat a z výsledku modelu, stejně tak jako z výsledků výše prezentovaného experimentu vyplývá, že problém velmi úzkého frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací spočívá v různosti frekvenčních závislostí impedancí  $Z_0$ . Pokud budou tyto impedance různé, potom buď nemají žádný průsečík (NC-obvod nelze optimálně nastavit pro žádnou frekvenci), nebo mají jeden průsečík na určité kritické frekvenci. Pokud bude systém buzen vibracemi o této frekvenci, jejich přenos bude efektivně potlačen. V úzkém okolí této kritické frekvence však přenos vibrací prudce roste (viz např. Obr. 21). Jak už bylo dříve řečeno, problém spočívá v tom, že pro každou frekvenci potlačovaných vibrací je optimální různé nastavení NC-obvodu. Pro široko-frekvenční tlumení přenosu vibrací je nezbytné, aby podmínky vyplývající z rovnic (20), (21) byly splněny na širokém frekvenčním pásmu. Potom bude systém při jednom diskrétním nastavení NC-obvodu schopen potlačovat přenos vibrací v širokém frekvenčním pásmu. Této problematice je věnována následující část.

## 4.2 Princip rozšíření frekvenčního pásma

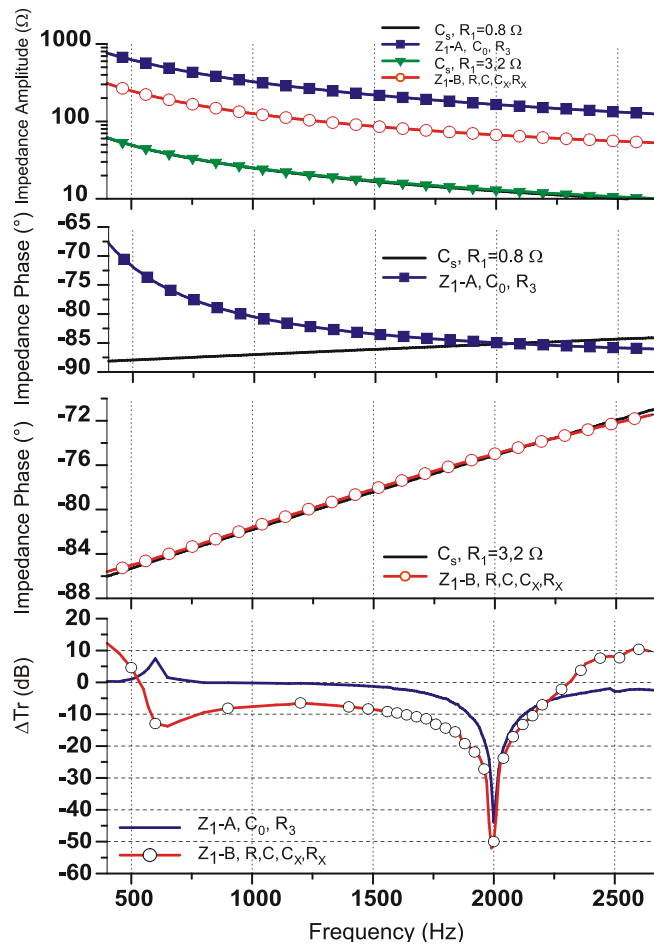
Pro rozšíření frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací je nutné vzájemné přizpůsobení elektrických impedancí piezoelektrického aktuátoru a NC-obvodu. Frekvenční závislost impedance piezoelektrického aktuátoru je dána použitým materiálem a konstrukcí. Proto je nutné požadovaným způsobem modifikovat frekvenční závislost impedance NC-obvodu, která je určena interní referenční impedancí  $Z_1$ . Jednoduchá paralelní kombinace kondenzátoru  $C_0$  a rezistoru  $R_3$ , viz Obr. 19(b), musí být nahrazena složitější RC sítí, kterou vidíme na Obr. 22(b).



**Obr. 22.** Elektrické schéma referenční impedance  $Z_1$ , která je součástí NC-obvodu (viz Obr. 19b). Zapojení vlevo umožňuje potlačení přenosu vibrací pouze na úzkém frekvenčním pásmu (a) a zapojení vpravo umožňuje potlačení přenosu vibrací v širokém frekvenčním pásmu (b). (Převzato z [29])

Na Obr. 22(b) vidíme modifikovanou referenční impedanci NC-obvodu, jejíž frekvenční charakteristika je funkcí  $R_3$ ,  $C_0$ ,  $R_X$ ,  $C_X$ . Princip rozšíření frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací spočívá v nalezení takových parametrů této referenční impedance, při kterých se její frekvenční průběh v co nejširším frekvenčním pásmu blíží impedanci  $Z_0$ .

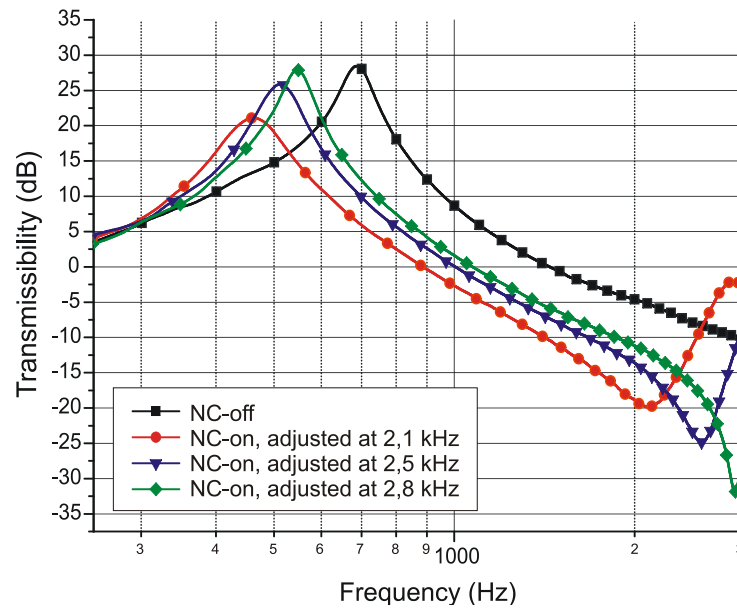




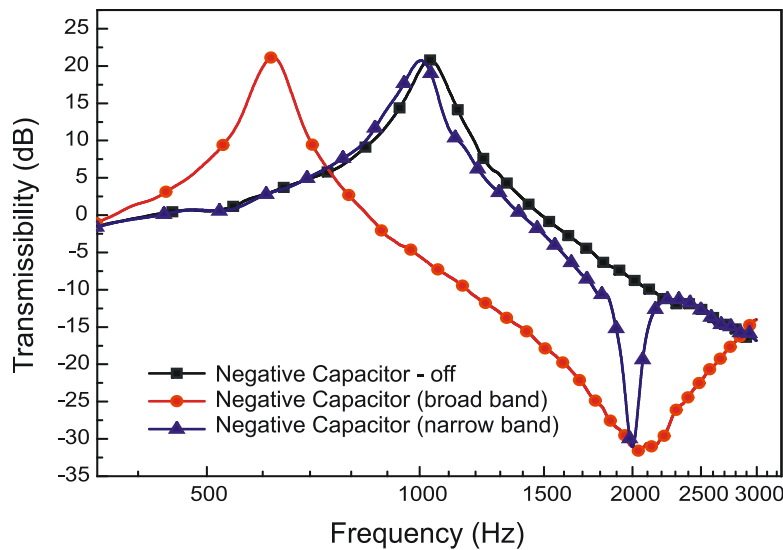
**Obr. 23.** Efekt vzájemného přizpůsobení absolutních hodnot a fází impedance piezoelektrického aktuátoru a referenční impedance  $Z_l$ . (Převzato z [29])

Z Obr. 23 je zřejmý efekt impedančního přizpůsobení. V horních třech obrázcích vidíme frekvenční průběhy impedancí  $Z_0$ ,  $Z_l$  [viz Obr. 19(b)]. Jsou zde porovnávány průběhy impedancí  $Z_0$  s jednoduchou referenční impedancí  $Z_{l-A}$  [viz Obr. 22(a)] a průběhy impedancí  $Z_0$  s modifikovanou referenční impedancí  $Z_{l-B}$  [viz Obr. 22(b)]. Na prvním obrázku od shora jsou vyneseny absolutní hodnoty impedancí. Z tohoto obrázku je zřejmé, že absolutní hodnoty impedancí jsou v celém frekvenčním pásmu rovnoběžné a jejich poměr je tedy v širokém frekvenčním pásmu konstantní. Podmínka popsána rovnicí (21) proto může být vhodnou volbou rezistorů  $R_0$ ,  $R_2$  bez problémů splněna v širokém frekvenčním pásmu. Na druhém obrázku od shora jsou vyneseny fáze impedancí  $Z_0$  a fáze jednoduché referenční impedance  $Z_{l-A}$ . Můžeme vidět, že průběhy se značně liší a protínají se na frekvenci 2kHz. Na spodním obrázku je vynesen pokles přenosu vibrací  $\Delta Tr$  (modrá křivka), který byl změřen po připojení těchto impedancí do NC-obvodu. Přenos vibrací byl potlačen cca o 40 dB, ovšem pouze na úzkém frekvenčním pásmu, neboť podmínka popsána rovnicí (20) je splněna pouze v průsečíku obou průběhů. Na třetím obrázku od shora jsou vyneseny fáze impedancí  $Z_0$  a fáze modifikované referenční impedance  $Z_{l-B}$ , která byla impedancí  $Z_0$  přizpůsobena. Můžeme vidět, že průběhy se opět protínají se na frekvenci 2kHz, ovšem jejich vzájemná relativní odchylka je velmi malá v širokém frekvenčním pásmu od cca 600 Hz do 2,2 kHz. Na spodním obrázku je vynesen pokles přenosu vibrací  $\Delta Tr$  (červená křivka), který byl změřen po připojení těchto impedancí do NC-obvodu. Přenos vibrací byl kromě potlačení o více než 40 dB na frekvenci 2kHz potlačen cca o 10 dB na frekvenčním pásmu od cca 600 Hz do 2,2 kHz,

neboť podmínka popsaná rovnicí (20) je s malou odchylkou splněna v celém tomto frekvenčním pásmu. Tím byl princip rozšíření frekvenčního pásma ověřen.



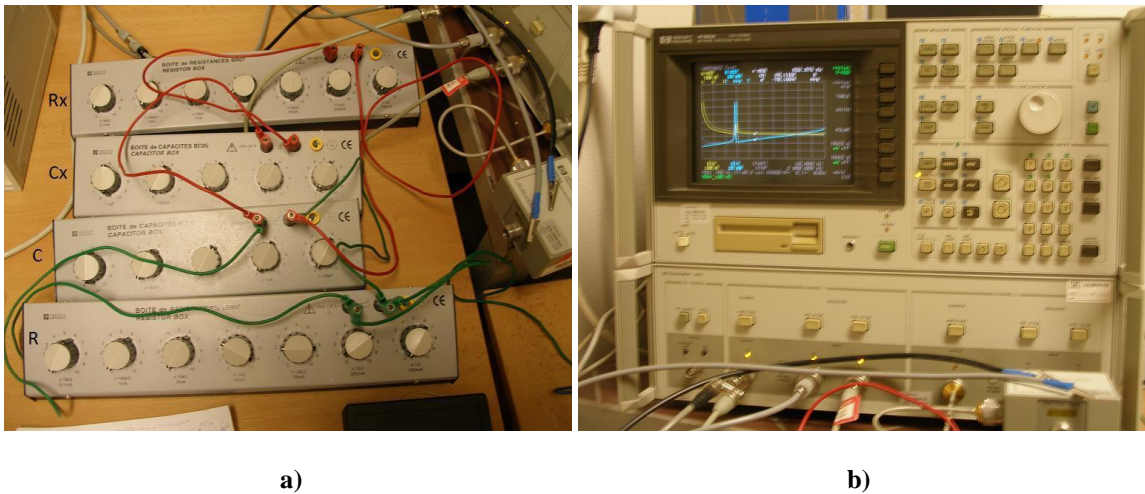
**Obr. 24.** Přenosové funkce systému pro potlačení přenosu vibrací. NC-obvod je přizpůsoben pro široko-frekvenční pásmo tlumení. Parametrem je různá frekvence, pro kterou je NC-obvod optimálně nastaven. (Převzato z [29])



**Obr. 25.** Porovnání přenosových funkcí systému pro potlačení přenosu vibrací s vypnutým NC-obvodem (černá čára), s úzkofrekvenčně přizpůsobeným NC-obvodem optimálně nastaveným pro frekvenci 2kHz a s širokofrekvenčně přizpůsobeným NC-obvodem optimálně nastaveným pro frekvenci 2kHz.

Na Obr. 24 vidíme přenosové funkce systému kde parametrem je různá frekvence, pro kterou je širokofrekvenčně přizpůsobený NC-Obvod optimálně nastaven. Na Obr. 25 vidíme porovnání přenosových funkcí systému pro potlačení přenosu vibrací s úzkopásmově (modrá křivka) a širokopásmově (červená křivka) přizpůsobeným NC-Obvodem, nastaveným na frekvenci 2kHz.

### 4.3 Experimentální metoda určení parametrů referenční impedance



**Obr. 26.** Realizace referenční impedance  $Z_l$  (viz Obr. 22b) pomocí odporových a kapacitních dekád. (a) Spektrální analyzátor pro měření frekvenčních charakteristik impedancí  $Z_0$ ,  $Z_1$ . Pomocí dekád jsou experimentálně nalezeny optimální parametry referenční impedance  $Z_1$  (b)

Jednou z možností, jak nalézt vhodné parametry referenční impedance  $Z_1$  viz [Obr. 22(b)] je přímé měření impedancí spektrálním analyzátozem. Postup hledání vhodných parametrů je následující:

1. Nejdříve změříme komplexní impedanci sériové kombinace piezoelektrického aktuátoru a rezistoru  $R_1$ , tedy impedanci  $Z_0$ . Zvolíme frekvenční pásmo, ve kterém budeme impedance přizpůsobovat. Rezistor  $R_1$  volíme např.  $3\Omega$  (aby bylo možné později trimrem NC-obvod precizně nastavit). Průběhy absolutní hodnoty a fáze impedance uložíme do paměti analyzátoru a zobrazíme na displeji.
2. Naměřenou impedanci zobrazíme analyzátozem jako tabulku paralelních  $R_p$ - $C_p$  náhrad. Z poloviny tabulky odečteme hodnoty  $R_p$ - $C_p$ , které použijeme pro  $R_3$  a  $C_0$  [viz Obr. 22(b)]. Referenční impedanci  $Z_1$ -B zrealizujeme pomocí odporových a kapacitních dekád [viz Obr. 26(a)] a nastavíme zjištěné hodnoty  $R_3$  a  $C_0$ . Spektrální analyzátor přepneme opět do režimu vykreslování absolutní hodnoty a argumentu impedance.
3. Ke svorkám analyzátoru připojíme impedanci  $Z_1$ -B, realizovanou pomocí dekád. Parametry  $R_3$  a  $C_0$  máme určeny, zbývá určit prvky  $R_x$ ,  $C_x$  [viz Obr. 22(b)]. Na displeji si z paměti zobrazíme impedanci  $Z_0$  a necháme si překreslovat cyklicky měřenou impedanci  $Z_1$ -B. Odporovou a kapacitní dekádu  $R_x$  a  $C_x$  nastavujeme tak, aby odchylka mezi oběma impedancemi byla minimální a existoval jeden průsečík průběhů fází uprostřed kontrolovaného frekvenčního pásma.

### 4.4 Analytická metoda určení parametrů referenční impedance

V této části bude popsána numerická metoda určení hodnot obvodových parametrů náhradního obvodu piezoelektrického aktuátoru nebo referenční impedance

v NC-obvodu z výsledků měření frekvenční závislosti absolutní hodnoty a fáze impedance daného obvodového prvku na spektrálním analyzátoru.

V případě sériového spojení piezoelektrického aktuátoru a rezistoru  $R_1$  [(viz Obr. 19(b))] se ukazuje jako prakticky nejvýhodnější náhrada tvořená sériovým RC-členem, jehož impedance je dána vztahem:

$$Z_0(\omega; C_S, R'_1) = \frac{1}{i\omega C_S} + R'_1, \quad (27)$$

kde  $C_S$  je kapacita piezoelektrického aktuátoru a  $R'_1$  je součet odporu  $R_1$  a sériového odporu piezoelektrického aktuátoru. V případě referenční impedance  $Z_1 - A$  v NC-obvodu pro potlačení přenosu vibrací v úzkém frekvenčním pásmu je náhradní obvod tvořen paralelním RC-členem, jehož impedance je rovna:

$$Z_{1,A}(\omega; C_0, R_3) = \left( i\omega C_0 + \frac{1}{R_3} \right)^{-1}, \quad (28)$$

kde  $C_0$  a  $R_3$  jsou kapacita a odpor paralelního RC-členu zobrazeného na Obr. 22(a). V případě referenční impedance  $Z_1 - B$  v NC-obvodu pro potlačení přenosu vibrací v širokém frekvenčním pásmu je náhradní obvod tvořen sério-paralelním zapojením RC-členů, jehož impedance je rovna:

$$Z_{1,B}(\omega; C_0, R_3, C_X, R_X) = \left( i\omega C_0 + \frac{1}{R_3} + \frac{i\omega C_X}{1 + i\omega C_X R_X} \right)^{-1}, \quad (29)$$

kde  $C_0$  a  $R_3$  jsou kapacita a odpor paralelního RC-členu a  $C_X$  a  $R_X$  jsou kapacita a odpor paralelně připojeného sériového RC-členu zobrazeného na Obr. 22(b).

Je patrné, že náhradní obvody se liší počtem obvodových parametrů. Z tohoto důvodu bude provedena obecná formulace metody. Předpokládejme, že výsledky měření frekvenční závislosti impedance reálného obvodového prvku pomocí spektrálního analyzátoru jsou k dispozici ve formě tabulky s  $N$  hodnotami frekvence  $f_n$ , absolutního hodnoty impedance  $Z_n$  a fáze impedance  $\phi_n$ , tj.  $n = 1, 2, \dots, N$ . Předpokládejme, že obecně komplexní impedance náhradního obvodu  $Z_{ref}$  závisí na úhlové frekvenci a na  $M$  reálných hodnotách základních obvodových parametrů  $Z_m$ , tj.  $m = 1, 2, \dots, M$ . Definujme chybovou funkci  $\chi^2$  podle vztahu:

$$\chi^2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m) = \sum_{n=1}^N |Z_n e^{i\phi_n} - Z_{ref}(2\pi f_n, Z_1, Z_2, \dots, Z_m)|^2. \quad (30)$$

Z definice chybové funkce  $\chi^2$  je patrné, že se jedná o reálnou funkci  $M$  reálných proměnných. Hodnoty náhradního obvodu daného měřeného obvodového prvku se určí minimalizací funkce  $\chi^2$  vzhledem k proměnným  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ .

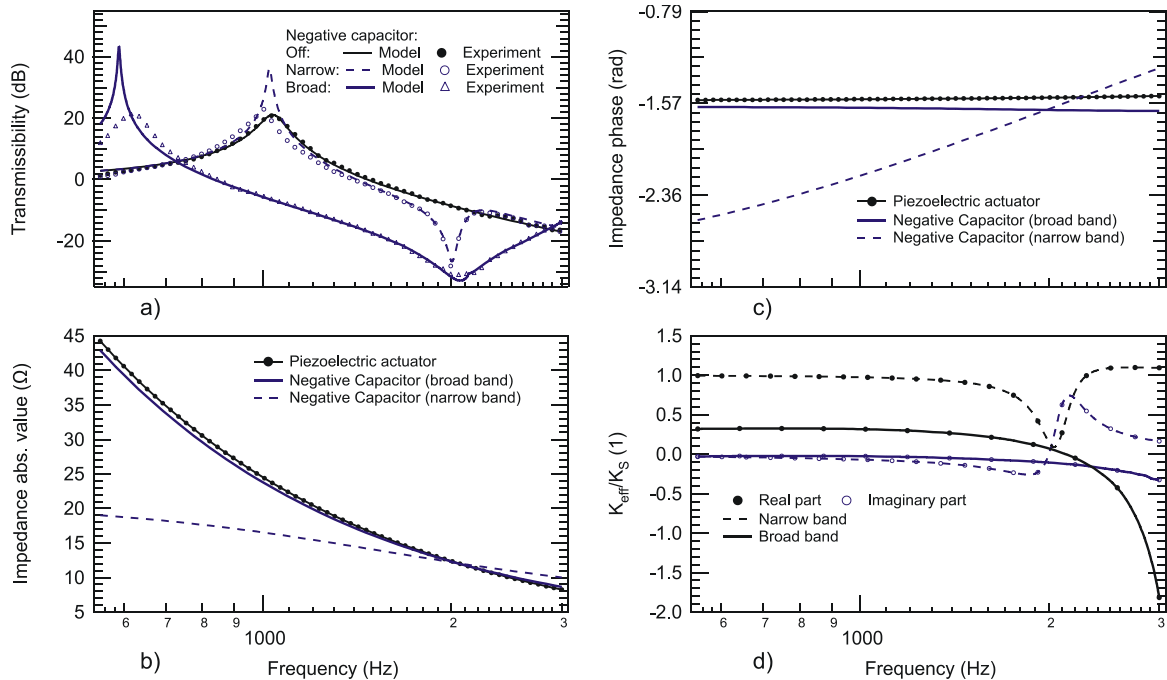
Vzhledem k obecné nelinearitě impedance náhradního modelu je prakticky nemožné vyjádřit minimum funkce  $\chi^2$  analyticky. Minimum je vhodné hledat numerickými metodami. Vzhledem k obecně velkému množství naměřených hodnot impedance ze spektrálního analyzátoru je problematický i výpočet parciálních derivací funkce  $\chi^2$  jak analyticky, tak numericky. Z těchto důvodů není vhodné používat

gradientní metody hledání minima funkce. Z tohoto důvodu byl použit algoritmus založený na Brentově metodě [30], který nevyžaduje znalost numerických hodnot parciálních derivací funkce  $\chi^2$ .

## 4.5 Experiment

Jedním z cílů tohoto experimentu je porovnání výsledků experimentální a analytické metody pro určení parametrů referenční impedance NC-obvodu. Dále jsou zde prezentovány výsledky naměřených a namodelovaných přenosů pro široko a úzkopásmové potlačování přenosu vibrací.

V kapitole 4 byly do grafů vynášeny průběhy impedancí  $Z_1$  a  $Z_0$ , jejíž součástí je rezistor  $R_1$ , uvnitř NC-obvodu [viz Obr. 19(b)]. V této kapitole jsou porovnávány frekvenční průběhy naměřené impedance samotného piezoelektrického aktuátoru (bez rezistoru  $R_1$ ) a namodelované frekvenční průběhy impedance NC-obvodu (včetně rezistoru  $R_1$ ), podobně jako je tomu v části 2.3, na Obr. 13. Postup experimentu byl následující:



**Obr. 27.** Frekvenční charakteristiky impedancí  $Z_0$ ,  $Z_1$  (viz Obr. 19b) pro úzkopásmové a širokopásmové potlačování přenosu vibrací, porovnání naměřených hodnot přenosu vibrací s modelovými výsledky: a) porovnání naměřených hodnot přenosu vibrací systému skrz elektricky volný piezoelektrický aktuátor (plná kolečka), skrz piezoelektrický aktuátor s úzkopásmově přizpůsobeným NC-obvodem optimálně nastaveným pro frekvenci  $f=2kHz$  (prázdná kolečka) a skrz piezoelektrický aktuátor s širokopásmově přizpůsobeným NC-obvodem optimálně nastaveným pro frekvenci  $f=2kHz$  (prázdné trojúhelníčky). Naměřené hodnoty přenosu vibrací jsou porovnány s výsledky teoretického modelu. b) absolutní hodnota elektrické impedance piezoelektrického aktuátoru (naměřeno) a NC-obvodu s úzkopásmovou (Obr. 22a) a širokopásmovou (viz Obr. 22b) referenční impedancí  $Z_1$  (vypočteno pomocí modelu). c) fáze elektrické impedance piezoelektrického aktuátoru (naměřeno) a impedance NC-obvodu (vypočteno a zobrazeno s opačným znaménkem). d) výpočet reálné a imaginární části efektivní konstanty tuhosti piezoelektrického aktuátoru s připojeným NC-obvodem. (Převzato z [26])

Impedance piezoelektrického aktuátoru a referenční impedance NC-obvodu byly měřeny pomocí spektrálního analyzátoru. Hodnoty kondenzátorů a rezistorů obsažených v referenční impedanci  $Z_I$  byly pomocí dekád nastaveny tak, aby odchylka mezi hodnotami impedancí  $Z_I$  a  $Z_S$  ve frekvenčním rozsahu 0.5 až 3 kHz byla co nejmenší. V tuto chvíli víme, že parametry referenční impedance NC-obvodu jsou optimální pro potlačování přenosu vibrací v širokém frekvenčním pásmu, ovšem neznáme hodnoty těchto parametrů. Po nastavení modifikované referenční impedance  $Z_I$  byly z naměřených frekvenčních průběhů této impedance vypočteny metodou nejmenších čtverců (viz část 4.4) následující hodnoty:  $R_3 = 15.09 \text{ k}\Omega$ ,  $C_0 = 480 \text{ nF}$ ,  $R_X = 44.6 \text{ }\Omega$  a  $C_X = 807 \text{ nF}$ . Tyto hodnoty můžeme porovnat s přímo naměřenými hodnotami obvodových prvků, které byly experimentálně nastaveny pomocí dekád (dle části 4.3). Užitím RLC metru byly na frekvenci 1 kHz změřeny tyto hodnoty:  $R_3 = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $C_0 = 470 \text{ nF}$ ,  $R_X = 44 \text{ }\Omega$  a  $C_X = 813 \text{ nF}$ . Můžeme konstatovat, že odchylka mezi přímo naměřenými a vypočtenými hodnotami parametrů je minimální. Z toho lze usuzovat, že pokud změříme frekvenční charakteristiku komplexní impedance zvoleného piezoelektrického aktuátoru a tato naměřená data použijeme jako vstup pro analytickou metodu určení parametrů referenční impedance pomocí metody nejmenších čtverců, získáváme optimální hodnoty parametrů  $R_3$ ,  $C_0$ ,  $R_X$  a  $C_X$ , které odpovídají použitému aktuátoru. Máme tedy dva nástroje pro přizpůsobení NC-obvodu libovolnému piezoelektrickému aktuátoru, přičemž v obou případech vycházíme z měření impedance tohoto aktuátoru.

## 5 Realizace adaptivního řízení NC-obvodu – obecné vibrace

V praxi se setkáváme především s úlohou potlačovat přenos vibrací s obecnou časovou závislostí výchylky. Podívejme se nyní, jakým způsobem lze doposud prezentované dílčí principy skloubit tak, aby výsledek odpovídal požadavkům reálných aplikací. Pokud by byl NC-obvod ideálně optimalizován pro potlačování přenosu vibrací v celém frekvenčním pásmu (viz kapitola 4) a přesně nastaven tak, aby byly splněny rovnice (20), (21), v principu by bylo možné efektivně potlačovat vibrace libovolného frekvenčního spektra bez omezení. Ve skutečnosti systém efektivně potlačuje vibrace o frekvencích uvnitř frekvenčního intervalu, ve kterém jsou vzájemně přizpůsobeny elektrické impedance piezoelektrického aktuátoru a NC-obvodu. Uvnitř tohoto intervalu jsou efektivně potlačovány vibrace, které mohou obsahovat mnoho frekvenčních složek, jejichž fáze i amplituda se může libovolně a rychle měnit (lze potlačovat nestacionární vibrace), nebo může obsahovat i nedeterministický, náhodný signál, např. libovolný šum. V principu tedy piezoelektrický aktuátor paralelně připojený k široko-frekvenčně přizpůsobenému a nastavenému NC-obvodu funguje jako interface s vysokým potlačením přenosu vibrací, který reálným aplikacím vyhovuje. Problém opět spočívá v tom, jak NC-obvod nastavit při takovéto časové závislosti výchylky vibrací. Kapitola 3 popisuje řešení adaptivního řízení NC-obvodu pro potlačování harmonických vibrací. Víme, že užitečnou informací pro algoritmus nastavování NC-obvodu je zejména fázový posuv mezi signálem ze senzoru síly (měří přenesené síly) a signálem z výstupu operačního zesilovače uvnitř NC-obvodu (je úměrný okamžitému prodloužení aktuátoru). Řídicí systém prezentovaný v části 3.3 na Obr. 16 optimálně nastaví NC-obvod pouze za předpokladu, že budicí vibrace jsou harmonické. Cílem této kapitoly je prezentovat zobecněnou metodu automatického nastavení NC-obvodu, která vychází ze shodných principů, ale navíc využívá pokročilých metod zpracování signálů, které je činí použitelnou také v případě potlačování přenosu vibrací obecného časového průběhu.

Proces přizpůsobení nastavení NC-obvodu měnícím se okolním podmínkám a okamžitým vstupním vibracím probíhá následujícím způsobem:

- 1) Jsou navzorkovány signály ze senzoru síly a z výstupu operačního zesilovače NC-obvodu.
- 2) Z navzorkovaných dat získáváme pomocí FFT amplitudová a fázová frekvenční spektra obou signálů.
- 3) Pokud amplituda signálu ze senzoru síly nepřesahuje určitou zvolenou minimální mez, vibrace jsou potlačeny. Tento stav je cyklicky testován.
- 4) Pokud vibrace potlačeny nejsou, je analyzováno výkonové spektrum signálu ze senzoru síly. Získáváme rozložení výkonu signálu podél frekvenční osy a současně zjišťujeme frekvenci obsažené dominantní harmonické složky. Na tuto dominantní harmonickou složku na konkrétní frekvenci se řídicí systém zaměří.
- 5) Z fázových spekter obou signálů, tj. ze senzoru síly a z výstupu operačního zesilovače NC-obvodu, jsou načteny spektrální čáry, které přísluší zvolené frekvenci. Tyto hodnoty fází jsou odečteny, čímž získáváme fázový rozdíl, který je nutný pro iterační výpočet hodnot rezistorů  $R_0$ ,  $R_I$ , viz rovnice (17).
- 6) Po následné korekci hodnot elektronicky laditelných rezistorů  $R_0$ ,  $R_I$  jsou ze senzoru síly a z negativního kondenzátoru opět navzorkována nová data a výše popsaný proces se v krocích periodicky opakuje až do okamžiku, kdy je zvolená dominantní harmonická složka potlačena na úroveň šumu.

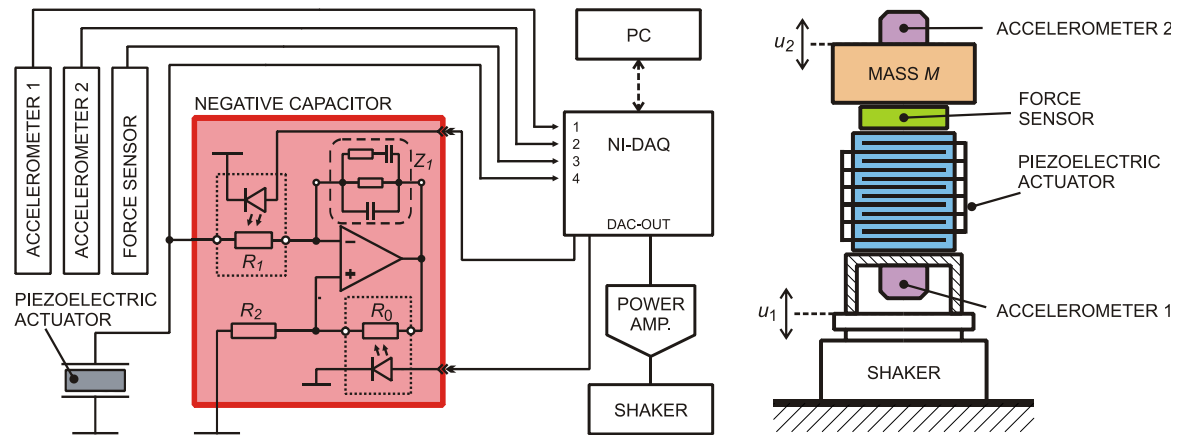
Nalezená dominantní harmonická složka je tímto systémem efektivně potlačena. Spolu s touto frekvencí jsou výrazně potlačeny i frekvence v jejím širokém okolí. V tomto okolí jsou potlačovány libovolné průběhy včetně náhodných vibrací (šumu). Šířka tohoto pásma a účinnost potlačení vibrací v něm závisí na úspěšnosti frekvenčního přizpůsobení impedance NC-obvodu impedanci piezoelektrického aktuátoru (viz kapitola 4). Následující text prezentuje komplexní návrh systému pro adaptivní potlačování obecných vibrací v širokém frekvenčním pásmu, realizaci experimentů a přehled dosažených výsledků.

## Experiment

Výše popsaný algoritmus byl implementován do adaptivního systému pro potlačení přenosu vibrací, který vidíme na Obr. 28. Pro snadnou implementaci probíhá současně měření signálů pro adaptivní vibračně izolační systém a pro systém měření přenosu vibrací. Tyto dva systémy jsou však nezávislé.

Adaptivní systém pro potlačení přenosu vibrací se skládá (po elektronické stránce) ze senzoru síly a piezoelektrického objemového aktuátoru s paralelně připojeným elektronicky řízeným NC-obvodem. Frekvenční závislost impedance NC-obvodu byla přizpůsobena v širokém frekvenčním pásmu použitému aktuátoru způsobem, který je podrobně popsán výše (viz část 4.3). Senzor síly byl realizován pomocí piezoelektrické destičky a nábojového zesilovače Kistler 5015A. Signál ze senzoru síly a signál na výstupu operačního zesilovače NC-obvodu jsou používány pro odhad efektivní konstanty

tuhosti  $K_{eff}$  tlumicího piezoelektrického aktuátoru (viz část 3.2). Odhad hodnoty  $\arg(K_{eff})$  je využíván pro korekce odporu elektronicky laditelných rezistorů  $R_0$  a  $R_1$ , podle rovnic (17). Elektronicky laditelné rezistory  $R_0$  a  $R_1$ , kterými je NC-obvod nastavován byly realizovány pomocí dvojice optron-fotorezistorů, jak můžeme zjednodušeně vidět na Obr. 28.

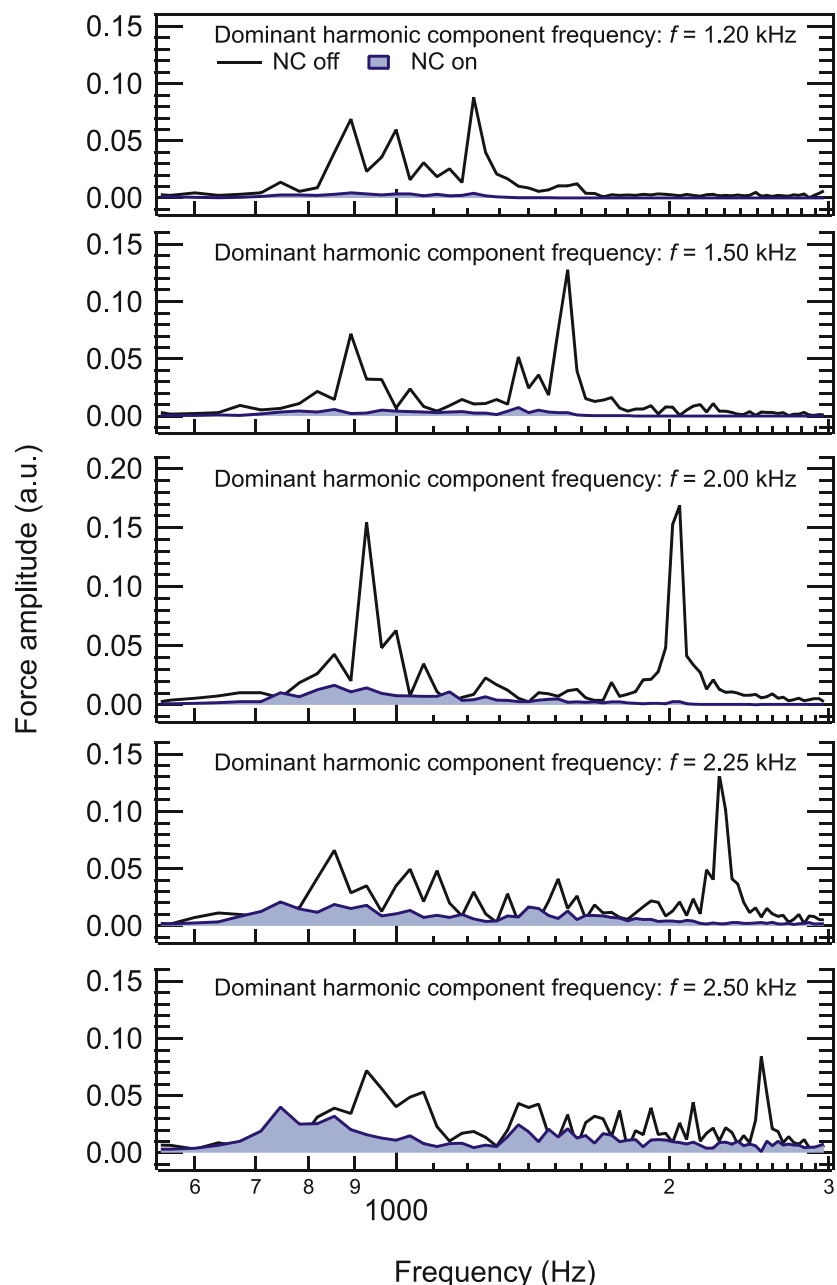


**Obr. 28.** Adaptivní vibračně izolační systém, který je realizován pomocí piezoelektrického aktuátoru s paralelně připojeným NC-obvodem, který lze elektronicky přeladovat pomocí dvojice optron-fotorezistorů. Na pravé straně se nachází mechanické uspořádání systému, na levé elektrické schéma zapojení.

Elektrické signály z akcelerometrů 1 a 2 jsou spolu se signály ze senzoru síly a ze svorek NC-obvodu měřeny a digitalizovány pomocí měřicí karty (NI PCI-6221, National Instruments Corp., Austin, TX). Nutno však podotknout, že akcelerometry jsou pouze součástí měřicího řetězce. Slouží pouze pro měření přenosu vibrací, aby bylo možné posoudit účinnost potlačení přenosu vibrací. Signály z akcelerometrů nevstupují do řízení systému, nevstupují do NC-obvodu a nesouvisí s iterativním řídicím algoritmem. Počítač vykonává současně tři navzájem nezávislé operace:

- 1) Generuje signál vstupních vibrací. V softwaru Matlab (The MathWorks Inc., Natick, MA) je generován pseudonáhodný signál obsahující jednu nebo více výrazných harmonických složek. Výstupním signálem z počítače je přes vysokonapěťový zesilovač buzen piezoelektrický zdroj vibrací, který generuje do systému vstupní vibrace.
- 2) Zpracovává signály z akcelerometrů a počítá frekvenční charakteristiky přenosu vibrací.
- 3) Zpracovává signály ze senzoru síly a z NC-obvodu a dle iterativního řídicího algoritmu generuje signály pro elektronicky nastavitelné rezistory, kterými je NC-obvod přeladován.



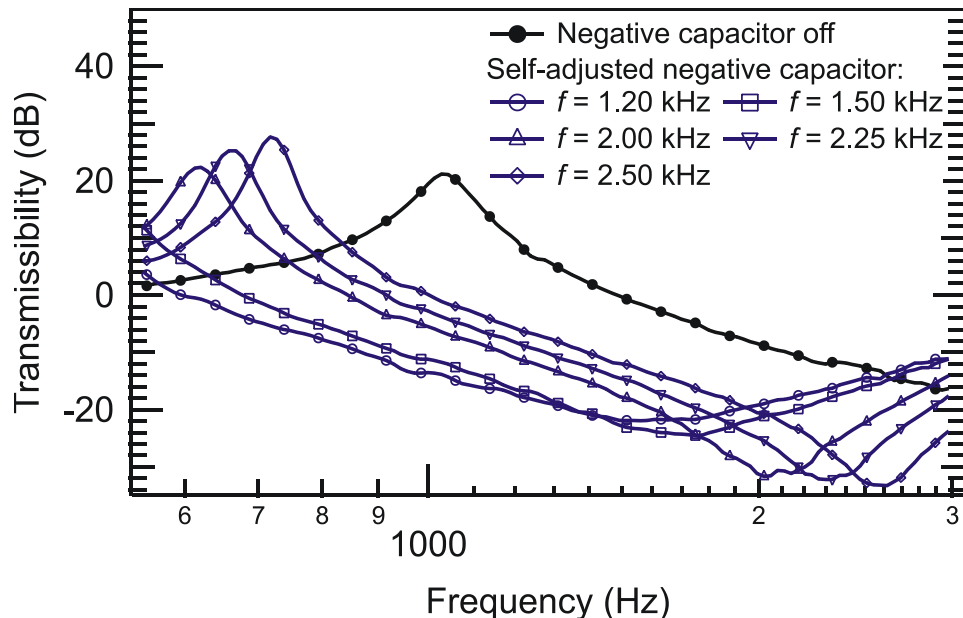


**Obr. 29.** Spektra pěti různých signálů sil přenesených skrz vibračně izolační systém. Parametrem je frekvence výrazné harmonické složky signálu. (Převzato z [26])

Pro posouzení účinnosti tohoto adaptivního širokospektrálního systému pro potlačení přenosu vibrací byla provedena následující měření: bylo vygenerováno pět různých signálů vibrací, kterými byl postupně systém vybuzen. Každý signál obsahoval náhodnou šumovou složku a jednu dominantní harmonickou složku určité frekvence. Na Obr. 29 vidíme pět různých měření spekter sil přenesených skrz piezoelektrický aktuátor. Parametrem je zde různá frekvence obsažené dominantní harmonické složky. Plná černá čára představuje amplitudové spektrum síly přenesené skrz aktuátor se svorkami naprázdno, tj. s odpojeným NC-obvodem. Modrá plocha představuje amplitudové spektrum síly přenesené skrz aktuátor s připojeným a zadaptovaným NC-obvodem, jehož referenční impedance  $Z_0$  je přizpůsobena pro široké frekvenční pásmo. Experiment probíhal následujícím způsobem:

1. Byl vygenerován budicí signál pro vstupní vibrace. V prvním případě (viz Obr. 29 nahoře) byl složen z náhodného signálu (šumu), který byl generován na frekvenčním pásmu 700 – 1200 Hz a výrazné harmonické složky o frekvenci 1200 Hz. Poté, co byl systém tímto signálem vybuzen, byla změřena přenášená síla (černá čára)
2. Při stejném buzení byl spuštěn proces adaptivního řízení NC-obvodu, který je popsán v části 5 – byla nalezena frekvence dominantní harmonické složky, jejíž přenos byl potlačen a spolu s ní byl výrazně redukován také přenos vibrací v jejím širokém okolí.
3. Opět byla změřena přenášená síla, tentokrát s NC-obvodem po jeho zadaptování (modrá plocha)
4. Poté co byl systém zadaptován pro maximální potlačení příslušných vstupních vibrací, byl systém vybuzen bílým šumem a následně změřena přenosová funkce nově nastaveného systému, kterou můžeme vidět na Obr. 30. (modrá křivka s kolečky)

Stejným způsobem jako je výše popsáno, proběhla i zbývající čtyři měření. Na Obr. 30 vidíme, že rezonanční frekvence systému s odpojeným NC-obvodem je cca 1kHz (černá křivka s plnými kolečky). Na Obr. 29 proto můžeme zaznamenat, že šum, který byl vždy generován v širokém frekvenčním pásmu ve všech případech výrazně vybudil systém právě v okolí této základní rezonance. Nejpodstatnější je však fakt, že výkon signálu přenášené síly je po dosažení optimálního nastavení NC-obvodu již na první pohled výrazně a úspěšně redukován.



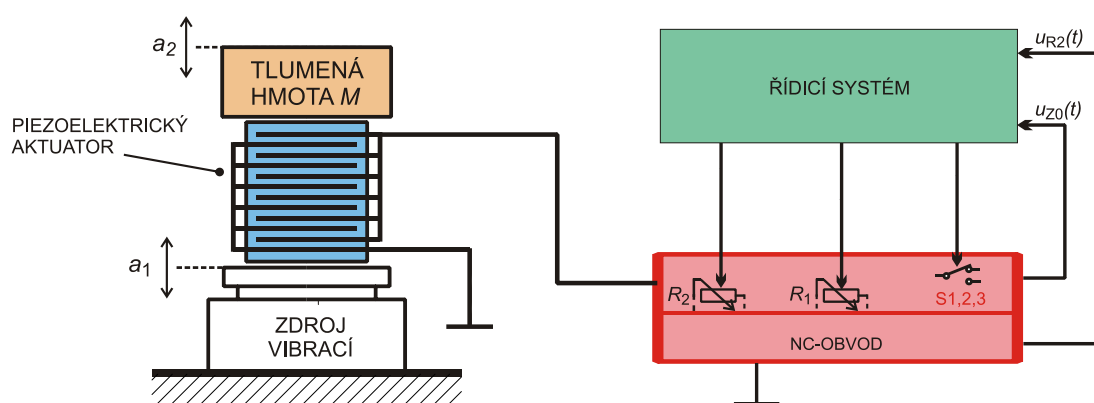
**Obr. 30.** Černá křivka: frekvenční charakteristika přenosu vibrací skrz piezoelektrický aktuátor se svorkami naprázdno. Modré křivky: frekvenční charakteristiky přenosu vibrací skrz piezoelektrický aktuátor s paralelně připojeným, automaticky nastavovaným a širokopásmově přizpůsobeným NC-obvodem. (Převzato z [26])

Na Obr. 30 můžeme vidět, že řídicí algoritmus ladí NC-obvod takovým způsobem, aby se minimum přenosu vibrací nacházelo v okolí frekvence dominantní harmonické

složky vstupních vibrací. Můžeme zde také zaznamenat výrazné snížení mechanické rezonanční frekvence, které je způsobeno redukcí efektivní konstanty tuhosti piezoelektrického aktuátoru, v důsledku připojení NC-obvodu, jehož referenční impedance  $Z_0$  je optimalizována pro široké frekvenční pásmo. Je zřejmé, že přenosová funkce systému je pro různá spektra vstupních vibrací různá. Vhodným řízením parametrů NC-obvodu je automaticky tvarována tak, aby bylo potlačení přenosu okamžitých vstupních vibrací maximální v širokém frekvenčním pásmu. Závěrem této části můžeme poznamenat, že iterativní řídicí algoritmus dokáže kompenzovat vliv dielektrických nelinearit piezoelektrického aktuátoru. Pokud se zvýší amplituda vstupních vibrací, amplituda napětí na výstupu operačního zesilovače také (více méně proporcionálně) vzroste. Potom dojde v důsledku dielektrických nelinearit k mírné změně permitivity (a kapacity) piezoelektrického aktuátoru. To způsobí rozladění a snížení vibračně izolačních vlastností systému. Pokud nedojde ke změně amplitudy vstupních vibrací extrémně rychle, iterativní algoritmus velmi rychle kompenzuje změny kapacity piezoelektrického aktuátoru. Stejně chování lze očekávat i v plném napět'ovém rozsahu aktuátoru, kterého lze dosáhnout pomocí standardního vysokonapět'ového zesilovače, jako publikují např. Fleming a Moheimani [31].

## 6 Automatické nastavení NC-obvodu bez senzoru síly

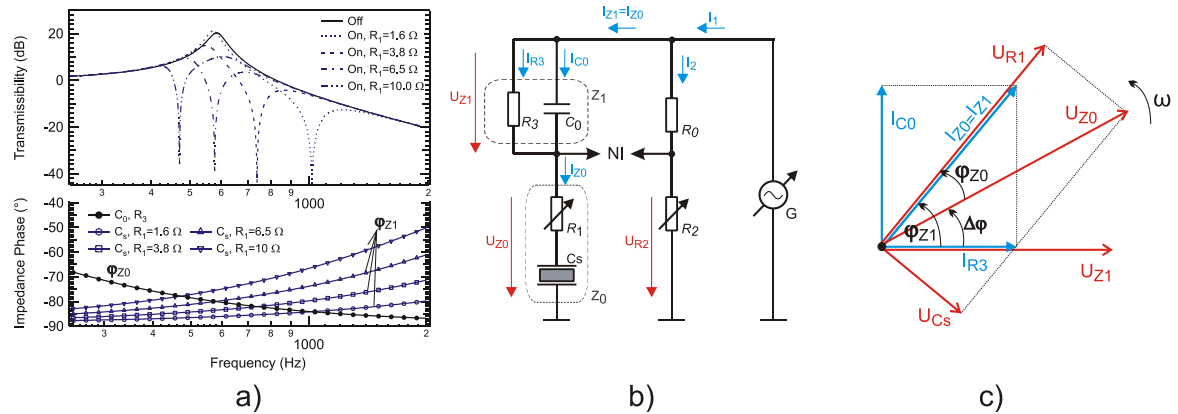
V této kapitole je prezentován další způsob, kterým lze automaticky nalézt optimální nastavení NC-obvodu. Velkou výhodou, oproti řízení prezentovanému v části 3.3 (viz Obr. 16), je fakt, že NC-obvod může být zadaptován pro potlačování obecných vibrací bez použití senzoru síly.



**Obr. 31.** Mechanické uspořádání systému pro potlačování přenosu vibrací a blokové schéma zapojení NC-obvodu a řídicího systému.

Princip automatického nastavení je zřejmý z části 4.1, kde jsou rozebrány podmínky optimálního nastavení NC-obvodu, z hlediska jednotlivých impedancí ve zpětných vazbách operačního zesilovače [viz Obr. 19(b)]. Závěry této části lze shrnout do několika následujících vět: kýžený efekt potlačení přenosu vibrací se dostaví, pokud fáze impedancí  $Z_0$  a  $Z_1$  uvnitř NC-obvodu jsou shodné [viz Obr. 32(a)] a pokud podíl absolutních hodnot těchto impedancí je roven podílu zpětnovazebních rezistorů  $R_0$  a  $R_2$  [viz rovnice (20),(21)]. Pokud jsou fáze impedancí  $Z_0$  a  $Z_1$  shodné, dojde k vykompenzování imaginární složky jejich poměru [viz rovnice (22)]. Pokud je podíl

rezistorů  $R_0$  a  $R_2$  roven této reálné hodnotě, nachází se operační zesilovač právě na mezi stability a současně dochází k efektivnímu potlačení přenosu vibrací (viz Obr. 20). Pokud bychom odpojili v tomto okamžiku z obvodu operační zesilovač, zbude dokonale vyvážený H-můstek [viz Obr. 32(b)]. Těžiště úlohy automatického nastavení NC-obvodu bez užití zpětnovazebního senzoru síly tedy spočívá v automatickém vyvážení impedančního můstku.

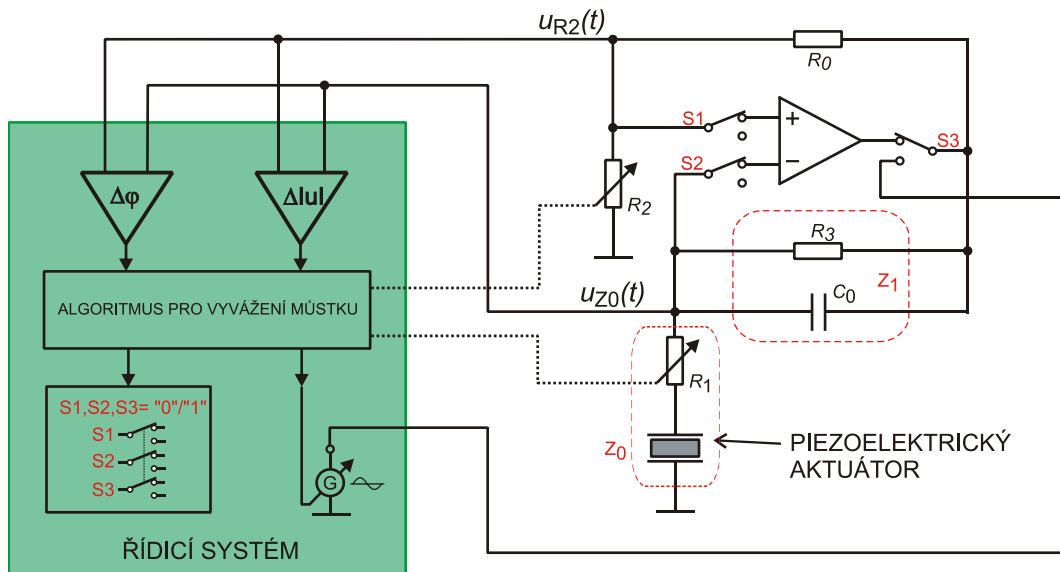


**Obr. 32.** a) Obrázek vlevo: frekvenční průběhy fází impedancí  $Z_1$  a  $Z_0$  (parametrem je hodnota  $R_1$ ) a k nim příslušející průběhy přenosu vibrací (předpoklad: podíl abs. hodnot obou impedancí je roven poměru rezistorů  $R_0$ ,  $R_2$ ). b) Obrázek uprostřed: H-můstek, který vzniká odpojením operačního zesilovače NC-obvodu. c) Obrázek vpravo: fázorový diagram proudů a napětí impedancí  $Z_1$  a  $Z_0$  v obvodu – viz obrázek uprostřed. Z obrázků jsou zřejmé trendy rezistoru  $R_1$ , které vedou k vyvážení můstku: pokud  $\Delta\varphi = \varphi_{Z1} - \varphi_{Z0}$  je záporné, rezistor  $R_1$  je třeba zvyšovat a naopak.

Z Obr. 32(a) dole můžeme vyčíst, že pokud je fáze impedance  $Z_1$  větší, než fáze impedance  $Z_0$ , je nutné pro vyvážení můstku hodnotu rezistoru  $R_1$  zmenšovat, a naopak. Na Obr. 32(c) vidíme fázorový diagram, který se vztahuje k napětím a proudům v obvodu – viz Obr. 32(b). Jsou zde fázory napětí a proudů impedance  $Z_0$  a  $Z_1$ , přičemž proudy  $I_{Z0}$  a  $I_{Z1}$  jsou ztotožněny do jednoho fázoru, neboť jde o jeden a tentýž proud. Z fázorového diagramu je zřejmé, že změnou  $U_{R1}$  (lze nastavovat pomocí trimru  $R_1$ ) dochází ke změně fázového posuvu mezi napětími  $U_{Z0}$  a  $U_{Z1}$ . Zachycená situace odpovídá skutečnosti, kdy  $U_{Z0}$  předbíhá  $U_{Z1}$  o kladný úhel  $\Delta\varphi = \varphi_{Z1} - \varphi_{Z0}$  a pro vyvážení můstku je nezbytné rezistor  $R_1$  snižovat až do okamžiku, kdy je fázový rozdíl nulový. Pokud naopak fázor napětí  $U_{Z1}$  předbíhá  $U_{Z0}$ , tj.  $\Delta\varphi$  je záporné, rezistor  $R_1$  je třeba zvyšovat. Pokud je  $\Delta\varphi$  rovno nule, napětí  $U_{Z0}$  a  $U_{Z1}$  jsou ve fázi. Potom je možné pomocí trimru  $R_2$  můstek úspěšně vyvážit s ohledem na rovnici (31), kterou je rovnováha můstku podmíněna.

$$\frac{Z_1}{Z_0} = \frac{|Z_1| \cdot e^{j\varphi_{Z1}}}{|Z_0| \cdot e^{j\varphi_{Z0}}} = \frac{R_0}{R_2} \quad (31)$$

Princip je zřejmý z Obr. 33. Vidíme zde známé zapojení NC-obvodu, ve kterém navíc figurují přepínače S1, S2 a S3, které mohou být realizovány například pomocí integrovaných mikro-relé. Přepínání kontaktů obstarává řídicí systém tak, že trojice přepínačů S1, S2, S3 jsou přepínány současně. Obrázek zachycuje situaci, kdy jsou všechny přepínače ve stavu "1" (režim tlumení).



**Obr. 33.** Princip automatického nastavení NC-obvodu bez senzoru síly.

Řídicí systém může pomocí přepínačů přepnout celý systém do dvou režimů. V prvním režimu dochází k automatickému nastavení NC-obvodu v okamžitých okolních podmínkách a ve druhém režimu dochází k potlačování přenosu vibrací. Cílem řídicího systému je nastavit NC-obvod tak, aby docházelo k účinnému potlačování přenosu vibrací v co možná nejširším frekvenčním okolí frekvence, jež je dána nastavením integrovaného oscilátoru. Jinak řečeno, musí být stanovena frekvence, pro kterou má být NC-obvod optimálně nastaven (uvnitř kontrované frekvenční oblasti), přičemž musí dojít vzhledem k širokofrekvenčnímu přizpůsobení NC-obvodu zároveň k účinnému potlačení přenosu vibrací širokého frekvenčního okolí (které musí být širší, než je kontrovaná frekvenční oblast).

První režim je nastaven přepnutím přepínačů S1, S2, S3 do stavu "0" (opačně, než je na obrázku). Získáváme tak obvod, který vidíme na Obr. 32(b). Můstek je v tuto chvíli napájen harmonickým signálem o frekvenci, jejíž frekvenční okolí má být z frekvenčního spektra přenesených vibrací potlačeno. Toto je zároveň frekvence, která bude ve spektru vibrací potlačována nejefektivněji, vzhledem k tomu, že právě na ní je můstek řídicím systémem fázově a amplitudově vyvážen. Šířka frekvenčního pásma efektivně potlačovaných vibrací je opět otázkou vzájemného přizpůsobení frekvenčních charakteristik impedancí  $Z_0$  a  $Z_1$  (viz Obr. 23, druhý odspoda). Je žádoucí, aby frekvenční průběhy jejich fází byly co nejpodobnější. Zároveň je však nezbytné, aby při ladění rezistoru  $R_1$  existoval vždy jediný průsečík obou průběhů a současně aby vlevo od průsečíku (při nižších frekvencích) byla fáze  $Z_0$  větší než fáze  $Z_1$  a vpravo naopak, jako je tomu například na Obr. 32(a).

Vstupními informacemi řídicího systému pro vyvážení můstku jsou signály napětí na impedanci  $Z_0$  a napětí na rezistoru  $R_2$  (viz Obr. 33). Napětí na rezistoru  $R_2$  má nulovou fázi. Proto je žádoucí dosáhnout nulového  $\Delta\varphi$ . K této shodě dochází po konečném počtu iterací, kdy je rezistor  $R_1$  zvětšen, respektive zmenšen o jeden krok. Pokud jsou oba průběhy ve fázi, dochází prostřednictvím laditelného rezistoru  $R_2$  opět po konečném počtu iterací k vyvážení amplitud obou signálů. Proces se opakuje, dokud není můstek vyvážen. Iterativní řídicí algoritmus lze formulovat následujícím způsobem:

$$R_{1,n+1} = \begin{cases} R_{1,n} + \Delta R_1 & \text{pro } \Delta\varphi < 0, \\ R_{1,n} - \Delta R_1 & \text{pro } \Delta\varphi > 0. \end{cases} \quad (32)$$

$$R_{2,n+1} = \begin{cases} R_{2,n} + \Delta R_2 & \text{pro } |U_{R2}| < |U_{Z0}|, \\ R_{2,n} - \Delta R_2 & \text{pro } |U_{R2}| > |U_{Z0}|. \end{cases} \quad (33)$$

Kde symboly  $R_{1,n+1}$ ,  $R_{1,n}$  a  $R_{2,n+1}$ ,  $R_{2,n}$  reprezentují hodnotu v příštím kroku a aktuální hodnotu rezistoru  $R_1$ , respektive  $R_2$ . Hodnoty  $\Delta R_1$  a  $\Delta R_2$  představují velikost kroku, se kterým se elektronicky laditelné rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  během iteračního procesu vyvažování můstku mění.

Ve druhém režimu, kdy jsou všechny přepínače nastaveny na "1" (jak vidíme na Obr. 33), je opět připojen operační zesilovač do obvodu, čímž vzniká NC-obvod, který je optimálně nastaven pro efektivní potlačování přenosu vibrací.

Výhoda přístupu automatického nastavení NC-obvodu, který je prezentován v předchozí části, spočívá v tom, že nejsou kladeny žádné speciální požadavky na charakter potlačovaných vibrací. V principu nejsou kladeny žádné požadavky na determinismus signálu tlumených vibrací (NC-obvod může být nastaven i pokud jsou vibrace ryze náhodné, na rozdíl od přístupu prezentovanému v podkapitole 3.3). Bez problému lze kontrolovat konstantně zvolená frekvenční oblast. Střed kontrolované oblasti je pevně zvolen nastavením frekvence harmonického signálu, kterým je napájen můstek po dobu jeho vyvažování. Naopak, nevýhodou tohoto přístupu je fakt, že po dobu vyvažování můstku nedochází vůbec k potlačování přenosu vibrací. Pokud jde o praktickou využitelnost tohoto způsobu automatického nastavení NC-obvodu, prezentovaná metoda předpokládá odstavení systému od zdroje vibrací během vyvažování můstku, což v případě reálných aplikací většinou nelze. Piezoelektrický aktuátor potom funguje jako druhý zdroj proudu, který má vliv na proudy a napětí v můstku a nepříznivě ovlivňuje činnost popsaného algoritmu při jeho vyvažování, zejména pokud generovaná frekvence je shodná s dominantní frekvencí vstupních vibrací. Tento problém však lze vyřešit generováním známého testovacího signálu vhodné frekvence, jehož odezva bude ze signálů  $u_{R2}(t)$ ,  $u_{Z0}(t)$  filtrována. Tím budou získány informace užitečné pro popsaný algoritmus automatického vyvážení můstku.

## 7 Závěr/Diskuse

V této práci byla studována a dále vyvíjena metoda potlačování přenosu vibrací aktivním řízením elastických vlastností piezoelektrických aktuátorů. Bylo demonstrováno, že paralelním připojením piezoelektrického aktuátoru ke svorkám NC-obvodu, který realizuje zápornou kapacitu, lze výrazně ovlivnit jeho elastické vlastnosti. Tyto piezoelektrické aktuátory, jejichž efektivní tuhost lze v širokém rozsahu řídit nastavením NC-obvodu, je možné výhodně použít v systémech pro tlumení přenosu vibrací, nebo hluku.

V posledních letech došlo k vývoji základních principů metody a řešení některých problémů, které byly publikovány a jsou v této práci citovány. Výsledkem byl systém pro potlačování přenosu vibrací, který byl schopen stabilně a efektivně potlačovat pouze velmi úzké frekvenční pásmo vibrací. Tento systém byl navíc schopen adaptovat se na vstupní vibrace libovolné frekvence, ovšem pouze za předpokladu, že byly tyto vibrace harmonické. Součástí práce je vlastní analýza nedostatků metody, ze kterých vyplývá hlavní přínos této disertační práce, tj. zobecnění metody návrhem a realizací principů, které lze využít při návrhu adaptivního systému potlačování vibrací obecného charakteru v širokém frekvenčním pásmu. Posunutím vývoje metody do tohoto bodu dochází k výraznému zlepšení jejich aplikačních možností.

Obsahem předkládané práce je následující:

- Byly prezentovány základní principy aktivního řízení elastických vlastností piezoelektrických aktuátorů a jejich využití v systémech pro tlumení přenosu vibrací.
- Základní principy byly demonstrovány na čtyřech realizovaných příkladech, které se vzájemně liší koncepcí a užitým piezoelektrickým aktuátorem.
- Byly definovány a analyzovány nedostatky, kterými je metoda v základní konfiguraci zatížena. Je to především velká citlivost účinnosti potlačování přenosu vibrací na změny podmínek v okolním prostředí (zejména na změny teploty), které jsou příčinou nestabilního efektu potlačení přenosu vibrací a dále je to velmi úzké frekvenční pásmo efektivně potlačovaných vibrací.
- Výsledkem dřívějších prací, které jsou v této práci citovány, byl princip adaptivního řízení NC-obvodu s využitím dodatečně implementovaného senzoru síly. V této práci jsou prezentovány dvě realizace těchto systémů pro adaptivní potlačení přenosu vibrací v úzkém frekvenčním pásmu. Nastavení NC-obvodu je adaptivně optimalizováno pro frekvenci vstupních, ovšem výhradně harmonických vibrací. NC-obvod lze nastavovat prostřednictvím elektronicky laditelných prvků, jejichž návrh je rovněž součástí práce.
- Významným přínosem této práce je modifikace metody pro efektivní potlačování přenosu vibrací v širokém frekvenčním pásmu. Byl proveden rozbor optimálního nastavení NC-obvodu z hlediska jednotlivých impedancí ve zpětných vazbách a demonstrován vliv optimalizace referenční impedance NC-obvodu použitému

piezoelektrickému aktuátoru. V práci jsou prezentovány dva nástroje (experimentální a analytická metoda) pro nalezení optimálních hodnot referenční impedance NC-obvodu, které odpovídají danému piezoelektrickému aktuátoru. Tímto způsobem bylo dosaženo, při jednom diskrétním nastavení NC-obvodu, efektivního potlačení přenosu vibrací v rozsahu 800 Hz – 2900 Hz, přičemž na frekvenčním rozsahu 900 Hz – 2200 Hz bylo dosaženo potlačení přenosu vibrací v rozmezí 20-27 dB (viz Obr. 25). Výhodou této modifikace je, že NC-obvod optimálně nastavený pro jednu frekvenci je současně optimálně nastaven pro její široké okolí. V této konfiguraci lze uvnitř daného frekvenčního pásma efektivně potlačovat přenos vibrací s libovolně komplikovaným časovým průběhem výchylky.

- Dalším významným přínosem je prezentovaná modifikace adaptivního systému, která umožňuje automatické nastavení NC-obvodu nejen pro speciální případ harmonických vstupních vibrací, ale naopak také pro vibrace s obecným časovým průběhem výchylky. Spektrum těchto vibrací může obsahovat náhodné složky (šum) a několik harmonických složek. Tato modifikace vyžadovala návrh zpracování signálů (výpočet FFT přenesených vibrací a analýza jejich spektra), které lze implementovat do počítače, mikroprocesoru, signálového procesoru a podobně. Nutno podotknout, že samotný princip metody zůstává ryze analogový. Požadavky na rychlost těchto digitálních prvků, ve kterých je implementován pouze adaptivní proces, nesouvisí nijak s komplikovaností spektra vibrací v daném čase. Tyto požadavky jsou spojeny s nestacionaritou vibrací, tedy s tím, jak rychle se v čase mění spektrum vibrací. V případě potlačování přenosu stacionárních vibrací jsou požadavky na rychlost digitálního zpracování malé, což umožňuje použití levných mikroprocesorů. Cena kompletního systému pro potlačování přenosu vibrací, který se skládá z piezoelektrického aktuátoru a analogového NC-obvodu adaptivně řízeného mikroprocesorem může být velmi příznivá vzhledem k dosažené účinnosti a šířce pásma potlačování vibrací.
- Funkce adaptivního systému pro potlačení vibrací v širokém frekvenčním pásmu byla demonstrována formou experimentu. Systém byl vystaven postupně pěti různými generovanými vibracím. V každém případě generované vstupní vibrace obsahovaly náhodnou (šumovou) složku a jednu dominantní harmonickou složku (viz Obr. 29). Přenosová funkce systému je v důsledku adaptivního řízení parametrů NC-obvodu automaticky tvarována tak, aby potlačení přenosu okamžitých vstupních vibrací bylo maximální v širokém frekvenčním pásmu (viz Obr. 30).
- V závěru této disertační práce (viz část 6) byl prezentován nový způsob automatického, optimálního nastavení NC-obvodu bez použití senzoru síly. Odstranění tohoto senzoru síly je aplikačně velmi výhodné. Užitečnou informací pro automatické nastavování NC-obvodu je přímé měření elektrických veličin na obvodových prvcích NC-obvodu. Výhodou oproti zpětnovazebnímu řízení, které využívá senzoru síly je dostupnost užitečného signálu i v případě úplného potlačení přenosu vibrací. Tento způsob nastavování NC-obvodu je ve fázi ověření základního principu a je předmětem dalšího vývoje.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Libor Machala, Roman Kubínek, Milan Vůjtek, and Miroslav Mašláň, “Mikroskopie skenující sondou,” *Univerzita Palackého Olomouc*, 2003, 27-Sep-2013. [Online]. Available: <http://atmilab.upol.cz/mss/mss41.html>.
- [2] Ing. Zdeněk Jandák, CSc., “Vibrace přenášené na člověka,” 27-Sep-2013. [Online]. Available: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/vibrace-prenasene-na-cloveka>.
- [3] N. W. Hagood and A. von Flotow, “Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks,” *J. Sound Vib.*, no. 146, pp. 243–268, Apr. 1991.
- [4] S. O. R. Moheimani and A. J. Fleming, *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. London: Springer, 2006.
- [5] S. O. R. Moheimani, “A survey of recent innovations in vibration damping and control using shunted piezoelectric transducers,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 482–494, Jul. 2003.
- [6] D. Niederberger, “Smart damping materials using shunt control.” Cuvillier Verlag, 2005.
- [7] Y. Wang and D. J. Inman, “A survey of control strategies for simultaneous vibration suppression and energy harvesting via piezoceramics,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 18, pp. 2021–2037, May 2012.
- [8] R. L. Forward, “Electronic damping of vibrations in optical structures,” *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 5, p. 690, Mar. 1979.
- [9] M. S. Tsai and K. W. Wang, “ON THE STRUCTURAL DAMPING CHARACTERISTICS OF ACTIVE PIEZOELECTRIC ACTUATORS WITH PASSIVE SHUNT,” *J. Sound Vib.*, vol. 221, no. 1, pp. 1–22, Mar. 1999.
- [10] D. Niederberger, M. Morari, and S. J. Pietrzko, “Adaptive resonant shunted piezoelectric devices for vibration suppression,” 2003, pp. 213–224.
- [11] J. Wilhelm and R. Rajamani, “Methods for Multimodal Vibration Suppression and Energy Harvesting Using Piezoelectric Actuators,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 131, no. 1, p. 011001, 2009.
- [12] L. Petit, E. Lefeuvre, C. Richard, and D. Guyomar, “A broadband semi passive piezoelectric technique for structural damping,” 2004, pp. 414–425.
- [13] A. J. Fleming, S. Behrens, and S. O. Reza Moheimani, “Optimization and implementation of multimode piezoelectric shunt damping systems,” *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 7, no. 1, pp. 87–94, Mar. 2002.
- [14] M. Date, M. Kutani, and S. Sakai, “Electrically controlled elasticity utilizing piezoelectric coupling,” *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 2, p. 863, 2000.

- [15] T. Okubo, H. Kodama, K. Kimura, K. Yamamoto, E. Fukada, and M. Obal, "Sound insulation and vibration isolating efficiency piezoelectric materials connected to negative capacitance circuits," *Proc 17th Int. Congr. Acoust.*, vol. 2001, pp. 301–306.
- [16] Kodama, Okubo, Date, and Fukada, "Sound reflection and absorption by piezoelectric polymer films," *Electroact. Polym. RAPID Prototyp.*, vol. 2002, pp. 43–52.
- [17] P. Mokřý, E. Fukada, and K. Yamamoto, "Noise shielding system utilizing a thin piezoelectric membrane and elasticity control," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 1, p. 789, 2003.
- [18] P. Mokřý, E. Fukada, and K. Yamamoto, "Sound absorbing system as an application of the active elasticity control technique," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 11, p. 7356, 2003.
- [19] K. Imoto, M. Nishiura, K. Yamamoto, M. Date, E. Fukada, and Y. Tajitsu, "Elasticity Control of Piezoelectric Lead Zirconate Titanate (PZT) Materials Using Negative-Capacitance Circuits," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 9B, pp. 7019–7023, Sep. 2005.
- [20] K. Tahara, H. Ueda, J. Takarada, K. Imoto, K. Yamamoto, M. Date, E. Fukada, and Y. Tajitsu, "Basic Study of Application for Elasticity Control of Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Materials using Negative-Capacitance Circuits to Sound Shielding Technology," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 9B, pp. 7422–7425, Sep. 2006.
- [21] H. Kodama, M. Date, K. Yamamoto, and E. Fukada, "A study of sound shielding control of curved piezoelectric sheets connected to negative capacitance circuits," *J. Sound Vib.*, vol. 311, no. 3–5, pp. 898–911, Apr. 2008.
- [22] J. Vaclavik and P. Mokry, "Measurement of mechanical and electrical energy flows in the semiactive piezoelectric shunt damping system," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 23, no. 5, pp. 527–533, Feb. 2012.
- [23] T. Sluka and P. Mokřý, "Feedback Control of Piezoelectric Actuator Elastic Properties in a Vibration Isolation System," *Ferroelectrics*, vol. 351, no. 1, pp. 51–61, Jun. 2007.
- [24] A. Preumont, B. de Marneffe, A. Deraemaeker, and F. Bossens, "The damping of a truss structure with a piezoelectric transducer," *Comput. Struct.*, vol. 86, no. 3–5, pp. 227–239, Feb. 2008.
- [25] T. Sluka, H. Kodama, E. Fukada, and P. Mokry, "Sound shielding by a piezoelectric membrane and a negative capacitor with feedback control," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 55, no. 8, pp. 1859–1866, Aug. 2008.
- [26] M. Kodejska, P. Mokry, V. Linhart, J. Vaclavik, and T. Sluka, "Adaptive vibration suppression system: an iterative control law for a piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 12, pp. 2785–2796, Dec. 2012.

- [27] T. Sluka, "Noise and vibration control using piezoelectric elements shunted by a negative capacitor," Technical university of Liberec, Liberec, 2007.
- [28] P. Mokrý, M. Kodejska, and T. Sluka, "On the vibration control using a piezoelectric actuator and a negative capacitor adjusted by a microprocessor," *16th IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. Nara Jpn.*, pp. 780–783, 2007.
- [29] M. Kodejska, J. Vaclavik, and P. Mokrý, "A system for the vibration suppression in the broad frequency range using a single piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor," *IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. ISAF Edinb. Scotl.*, p. 2010.
- [30] R. P. Brent, *Algorithms for minimization without derivatives*. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2002.
- [31] A. J. Fleming and S. O. R. Moheimani, "Improved Current and Charge Amplifiers for Driving Piezoelectric Loads, and Issues in Signal Processing Design for Synthesis of Shunt Damping Circuits," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 15, no. 2, pp. 77–92, Feb. 2004.

## **PUBLIKACE AUTORA**

### **Seznam kapitol v mezinárodních monografiích:**

1. P. Mokrý, M. Kodejška, and J. Václavík, Recent trends in application of piezoelectric materials to vibration control, Chapter in the book: Recent Advances in Mechatronics 2008-2009, p. 251 (Eds. T. Brezina and R. Jablonski), (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009) ISBN 978-3-642-05021-3

### **Seznam publikací v recenzovaných mezinárodních časopisech:**

1. Kodejška, M.; Mokrý, P.; Linhart, V.; Václavík, J. & Sluka, T. (2012), 'Adaptive vibration suppression system: an iterative control law for a piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor', *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, IEEE Transactions on 59(12), 2785-2796.
2. J. Hillenbrand, M. Kodejska, Y. Garcin, H. Seggern, and G. Sessler, "High-sensitivity piezoelectret-film accelerometers," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 4, pp. 1021–1027, Aug. 2010.

### **Seznam publikací ve sbornících mezinárodních konferencí:**

1. M. Kodejška, J. Václavík, and P. Mokrý: A system for the vibration suppression in the broad frequency range using a single piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor, Proc. 19<sup>th</sup> International Symposium on Application of Ferroelectrics, Edinburgh, Scotland, August 2010
2. P. Mokrý, M. Kodejška, T. Sluka: On the vibration control using piezoelectric actuator and negative capacitance circuit adjusted by a microprocessor, IEEE Proc. 16th International Symposium on Application of Ferroelectrics, Nara, Japan, Pages: 780-783 (2007)
3. M. Kodejska, J. Hillenbrand, and G. M. Sessler, "Ferroelectret-film accelerometers with high sensitivities," in *FORTSCHRITTE DER AKUSTIK, International Conference on Acoustics; NAG-DAGA 2009*, pp. 144–145, 2009

### **Seznam ústních prezentací:**

1. P. Mokrý, M. Kodejška, and J. Václavík, Recent trends in application of piezoelectric materials to vibration control, Oral presentation at Mechatronics-2009, Luhačovice, Czech Republic, 18.-20. November 2009
2. Pavel Mokrý, Jan Václavík, Martin Černík, Miloš Kodejška, and Jiří Borovec: „Efficiency-optimized Designs of Vibration Control and Energy Harvesting Devices“, Oral presentation at IMF-ISAF-2009, Xian, P. R. China, 23.-26. August 2009.

### **Seznam prezentací formou posteru:**

1. P. Mokřý, M. Kodejška, V. Linhart, and J. Václavík: Adaptive system for the broadband vibration control using a piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor., 2012 International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices, State College, Pennsylvania, May 2012
2. M. Kodejška, J. Václavík, and P. Mokřý: A system for the vibration suppression in the broad frequency range using a single piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor, Proc. 19<sup>th</sup> International Symposium on Application of Ferroelectrics, Edinburgh, Scotland, August 2010
3. M. Kodejška, J. Václavík, J. Křivka, and P. Mokřý, “Adaptive Piezoelectric Shunt Acoustic Control (APSAC): A Single Piezoelectric Element System for the Vibration Suppression”, poster at IMF-ISAF-2009, Xian, P. R. China, 23.-26. August 2009.
4. M. Kodejska, J. Hillenbrand, and G. M. Sessler, “Ferroelectret-film accelerometers with high sensitivities,” poster at International Conference on Acoustics; *NAG-DAGA 2009*
5. Pavel Mokřý, Jan Václavík, Martin Černík, Miloš Kodejška, and Jiří Borovec: Energy Harvesting and Vibration Control Devices with Enhanced Efficiency, Office of Naval Research Workshop, State College, Pennsylvania, May 2009
6. Pavel Mokřý, Tomáš Sluka, and Miloš Kodejška: Adaptive vibration control using a piezoelectric actuator and a negative capacitor, Office of Naval Research Workshop, State College, Pennsylvania, May 2008
7. P. Mokřý, M. Kodejška, T. Sluka: On the vibration control using piezoelectric actuator and negative capacitance circuit adjusted by a microprocessor, The 16th International Symposium on Application of Ferroelectrics, Nara, Japonsko, květen 2007

### **Seznam vyzvaných přednášek na mezinárodních konferencích:**

1. P. Mokřý, M. Kodejška, V. Linhart, and J. Václavík: Adaptive system for the broadband vibration control using a piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor. Invited talk, 2012 International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices, State College, Pennsylvania, May 2012
2. Pavel Mokřý, Jan Václavík, Martin Černík, Miloš Kodejška, and Jiří Borovec: Energy Harvesting and Vibration Control Devices with Enhanced Efficiency, Office of Naval Research Workshop, State College, Pennsylvania, May 2009
3. Pavel Mokřý, Tomáš Sluka, and Miloš Kodejška: Adaptive vibration control using a piezoelectric actuator and a negative capacitor, Office of Naval Research Workshop, State College, Pennsylvania, May 2008