VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

ANALÝZA PASIVNÍHO A SEMI-AKTIVNÍHO TLUMENÍ KMITÁNÍ NOSNÍKU

ANALYSIS OF PASSIVE AND SEMI-ACTIVE DAMPING OF CANTILEVER OSCILLATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Tomáš Václavík
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	**Tomáš Václavík**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza pasivního a semi–aktivního tlumení kmitání nosníku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tlumení vibrací nosných konstrukcí je důležité pro některé přesné technické aplikace. Piezoelektrickou vrstvu lze použít pro pasivní i aktivní tlumení vibrací. Práce je zaměřená na analýzu, modelování a zhodnocení pasivní a semi–aktivní metody tlumení vetknutých nosníků piezoelektrickou vrstvou.

Cíle bakalářské práce:

1) Rešerše metod tlumení kmitání mechanických konstrukcí piezoelektrickou vrstvou.
2) Vytvoření modelu v simulačním prostředí pro analýzu chování tlumeného kmitání vetknutého nosníku.
3) Návrh koncepce semi–aktivního tlumení vetknutého nosníku.
4) Porovnání pasivního a semi–aktivního tlumení vzhledem k velikosti vibrací nosníku.

Seznam doporučené literatury:

BATRA, Ashok K. a Almuatasim ALOMARI, 2017. Power Harvesting via Smart Materials. B.m.: SPIE.

CHENG, Jun, Hongli JI, Jinhao QIU a Toshiyuki TAKAGI, 2011. Semi-active vibration suppression by a novel synchronized switch circuit with negative capacitance. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 37(4), 291–308.

LI, Peng, Chongxiao ZHANG a Lei ZUO, 2013. Review of power electronics for kinetic energy harvesting systems. 868809.

VETISKA, Jan a Zdenek HADAS, 2012. Using of simulation modelling for developing of active damping system. In: International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. B.m.: IEEE, s. 1199–1204.

HADAS, Zdenek, Ludek JANAK a Jan SMILEK, 2018. Virtual prototypes of energy harvesting systems for industrial applications. Mechanical Systems and Signal Processing. B.m.: Elsevier Ltd, 110, 152–164.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Cílem práce je analýza metod pasivního a semi-aktivního tlumení na modelu vetknutého nosníku s piezoelektrickou vrstvou.

V úvodní časti se práce zabývá popisem piezoelektrického jevu, klasifikací metod používaných k tlumení vibrací, popisem vlastností metod, jejich výhod a nevýhod, obtížností realizace.

Modely vybraných metod jsou zpracovány v prostředí MATLAB Simulink a výsledky chování modelů vzájemně srovnány.

Pozornost je věnována přípravě praktického ověření účinnosti metody tlumení vibrací spínanou zátěží s negativní kapacitou. Dále je proveden ideový návrh zpětnovazebního systému SSD s mikroprocesorovým řízením.

Abstract

In this thesis passive and semi-active damping methods on a model of cantilever beam with piezoelectric patch are analyzed.

Explanation of piezoelectric effect, classification of damping methods used for vibration control, description of their properties, their benefits and disadvantages, and lastly the challanges of their implementation is presented.

Models of specified methods are carried out in MATLAB Simulink and the results are compared.

Basic concept of electrical design of circuits for semi-active damping by SDDNC and SSD methods is introduced.

Klíčová slova

Piezoelektrický jev, kontrola vibrací, vetknutý nosník, analytické modelování, pasivní a semi-aktivní tlumení.

Key words

Piezoelectric effect, piezoelectric shunt damping, cantilevered beam, analytical modeling, passive and semi-active damping.

Citace

VÁCLAVÍK, Tomáš. Analýza pasivního a semi-aktivního tlumení kmitání nosníku. Brno, 2021. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza pasivního a semi-aktivního tlumení kmitání nosníku“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu na konci této práce.

Brno 21.05.2021 . . . . . .

Tomáš Václavík

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za vstřícnost a trpělivost během zpracování mé práce.

Obsah

1. Úvod 9
2. Piezoelektrický jev 10
2.0 Historický vývoj zkoumání piezoelektrického jevu 10
2.1 Piezoelektrický jev 11
2.2 Piezoelektrické lineární konstitutivní rovnice 13
2.2.1 Základní módy zátěže 13
2.3 Piezoelektrické konstanty 14
2.4 Piezoelektrické materiály 15
2.5 Uplatnění piezoelektrických materiálů 15
3. Vibrace 16
3.0 Historie analýzy vibrací 16
3.1 Popis vibrací 17
3.2 Přehled obecných metod tlumení systémů 18
3.3 Přístupy ke kontrole vibrací 18
4. Vlastnosti piezoelektrických systémů 19
4.0 Popis systému s piezoelektrickým tlumením 19
4.1 Modelování systému 19
4.2 Přehled elektrické zátěže 20
4.2.1 Pasivní zátěž 21
4.2.2 Aktivní zátěž 22
4.2.3 Zátěž semi-aktivního tlumiče 23
5. Modelování a simulace pasivních zátěží 24
5.0 Model dynamického systému s piezoelektrickým elementem 24
5.1 Model s pasivní R zátěží 25
5.2 Simulace tlumení s pasivní R zátěží 26
5.3 Vliv hodnoty vazebního koeficientu na chování systému 28
5.4 Ekvivalentní zapojení 28
5.5 Model s pasivní RL zátěží 29
5.6 Simulace tlumení s pasivní RL zátěží 29
6. Modelování a simulace semi-aktivních zátěží 30
6.0 Model semi-aktivního tlumení 30
6.1 Model negativní kapacity (NC) s odporem 30
6.2 Simulace tlumení se zátěží R NC 30
6.3 Model SSD tlumení 31

6.4 Simulace SSD tlumení 32
7. Porovnání simulovaných metod tlumení 33
8. Návrhy zapojení 34
8.0 Návrh přípravku SSDNC s jednoduchou detekcí stavu 34
8.1 Návrh univerzálního systému SSD 36
9. Závěr 40
Citace 41
Seznam obrázků 45
Seznam symbolů 46

1. Úvod

Tlumení nebo celková eliminace vibrací je žádaná funkce moderních průmyslových systémů, leteckých konstrukcí nebo citlivých optických soustav. Atraktivní řešení poskytují piezoelektrické materiály, které jsou pomocí piezoelektrického jevu schopny převádět mechanickou energii na elektrickou, kdy je této vlastnosti využito k tlumení. Dle přístupu k tlumení rozlišujeme pasivní, semi-aktivní a aktivní tlumiče. V poslední době jsou zkoumána semi-aktivní řešení, která spojují energetickou nenáročnost pasivních systémů a vysokou účinnost tlumení aktivních systémů.

V práci nejdříve objasníme základní vlastnosti piezoelektrických materiálů a samotný piezoelektrický jev. Dále popisujeme vibrující soustavy a stávající metody jejich tlumení. Následně se podíváme na techniky modelování piezoelektrických tlumících systémů a zapojení využitá k tlumení. Pomocí programu namodelujeme zapojení pasivních a semi-aktivních systémů, kde analyzujeme chování modelu při změně parametrů. K modelování využijeme parametry reálného produktu, kdy se pokusíme najít optimální hodnoty k jeho tlumení. Nakonec porovnáme tlumící schopnosti jednotlivých metod.

2. Piezoelektrický jev

2.0 Historický vývoj zkoumání piezoelektrického jevu

Piezoelektrický jev byl poprvé popsán francouzskými vědci *Jacques Curie* a *Pierre Curie* na konci 19. století. Pokus sestával z monokrystalického křemene upevněného do svěráku mezi měděné elektrody po asymetrické ose, zatížení tlakem se projevilo polarizací těchto elektrod. Uvolnění zatížení mělo obrácený efekt, neutralizující původní změnu polarity po téže ose krystalu. Pouze při změně zátěže docházelo ke generaci elektrického proudu [1]. Krátce po objevu přímého jevu předpověděl *Gabriel Lippmann* i nepřímý jev, kdy napětí přivedené na svorky způsobilo deformaci krystalu [6].

Desátá léta 20. století uvedla první praktická využití tohoto jevu. Značný technologický pokrok přinesl křemenný oscilátor [2], rezonanční obvod využívající piezoelektrických vlastností krystalu křemene, pomocí něhož bylo možné generování elektrického signálu s velmi stabilní frekvencí [3]. Tato vlastnost se uplatnila u radiových zařízení, v detekčních systémech a pro přesné měření času.

Rozvoj elektroniky, rostoucí poptávka a zvýšené nároky na fyzikální vlastnosti krystalů přispěli k rozvoji hydrotermální syntézy. Tento nově vylepšený proces umožňoval růst syntetických krystalů v průmyslovém měřítku, především syntetického křemene, a značně tak urychlil výzkum nových sloučenin [4].

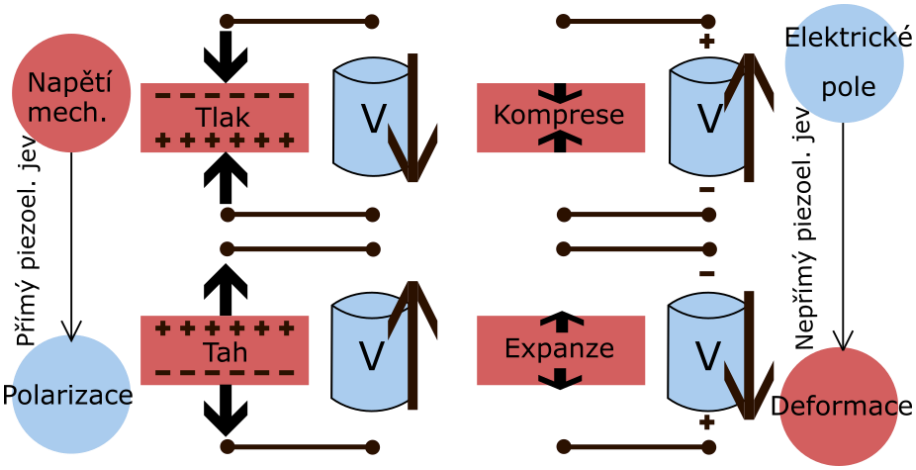
S druhou polovinou 20. století přichází na scénu keramiky, polymery a kompozitní materiály, např.: BTO titaničitan barnatý, PZT olovo titaničitan zirkoničitý a PVDF polyvinylidenfluorid. Tyto materiály vykazují značné piezoelektrické koeficienty, elektromechanický vazební koeficient nebo mechanickou flexibilitu. Nevýhodou těchto materiálů mohou být projevy stárnutí, hystereze nebo výskyt dalších fyzikálních jevů zodpovědných za přeměnu energie uvnitř systému [5].

První využití piezoelektrického materiálu k tlumení mechanických vibrací s elektrickým obvodem se připisuje *Robertu L. Forward* (1979), kterému se dařilo tlumit vibrace jednotlivých zrcadel optického systému umístěním prvků do rámu konstrukce [21]. Dále se piezoelektrickou keramikou a možností tlumení pomocí bočníku zabývá skupina *Uchino et al.* v období 80. a 90. letech. Přeměnou kinetické energie v elektrickou energii, následně zmařenou na Joulovo teplo pomocí rezistoru bočníku, se podařilo tlumit mechanické vibrace tlumené konstrukce, a změnou odporu bylo možné měnit tlumení systému. Skupina *Uchino et al.* se také zabývala možností využít tyto vibrace ke generování elektrické energie a prezentovala nositelné energy harvesting prototypy [10].

Ve 21. století se klade větší důraz na obnovitelné zdroje a ekologii, je snaha regulovat použití olova, což vede k vývoji alternativ PZT. Relativně novou technologií jsou nano struktury, které jsou schopné amplifikovat konstanty materiálů svou chytrou geometrií a zlepšují například snímací schopnosti již zaběhlých technologií.

2.1 Piezoelektrický jev

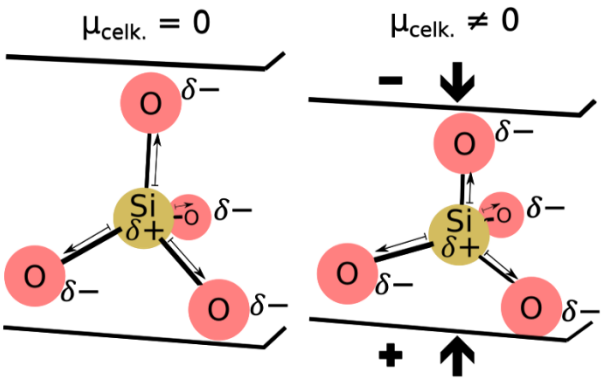
Jedná se o fyzikální jev zodpovědný za transdukci neboli převod mezi formami energie, specificky mezi mechanickým napětím a elektrickou energií. Dle směru převodu rozlišujeme jev přímý a jev nepřímý, jak je znázorněno na Obr. 1.



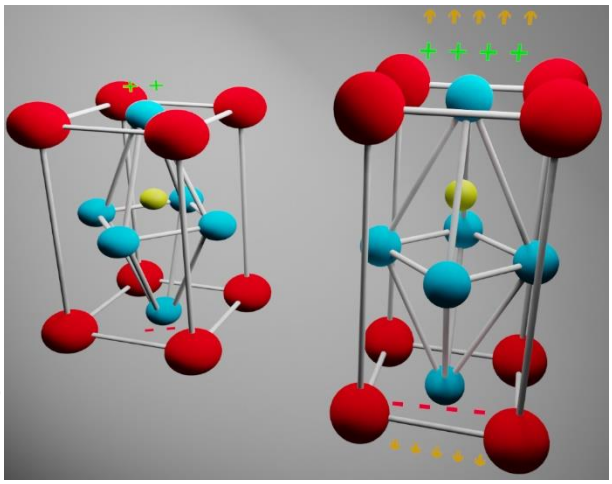
Obr. 1 .: Přímý piezoelektrický jev a nepřímý piezoelektrický jev.

Piezoelektrické vlastnosti materiálů jsou úzce spjaty s atomární strukturou, typickou vlastností je absence středu symetrie krystalické mřížky. Při popisu se zaměřujeme na elementární buňku, nejmenší část, která se opakuje v prostoru celého krystalu. Vazebné interakce mezi jednotlivými atomy uvnitř buňky vytváří místní negativní a pozitivní náboje, výsledné působení těchto nábojů lze vyjádřit dipólem. Zatížením struktury dochází k deformaci sítě atomů, a tudíž i rozmístění náboje, následkem je změna dipólového momentu elementární buňky [6,7,8].

Názorným příkladem je třetina základní stavební jednotky křemene, čtyřstěn SiO_4 (Obr. 2.), která je v nezatíženém stavu neutrální, při zatížení dochází k její polarizaci. Podobně reagují na zátěž syntetické struktury perovskitů (Obr. 3.), narozdíl od křemene má jejich neutrální stav nenulový dipólový moment [6,8].



Obr. 2.: Polarizace čtyřstěnu křemene.



Obr. 3.: Polarizace buňky perovskitu.

Celková polarizace materiálu se odvíjí od součtu místních momentů, orientace je značně svázána s natočením elementární buňky, je tedy žádané, aby elementy krystalické mřížky svíraly jednotný směr, proto u přírodních materiálů (křemen, Rochova sůl, topaz) volíme specifické řezy krystalickou mřížkou, u kterých je známa jednotná inklinace [7,8]. Velmi zajímavou skupinu piezoelektrický materiálů tvoří ferroelektrické materiály, které vytváří dipólový moment i v jejich klidovém stavu. Této

vlastnosti lze dále využít k polování, kdy je materiál vystaven silnému elektrickému poli a dochází k trvalému zarovnání momentů. Podobných výsledků lze dosáhnout pomocí tažení a tepelného žíhání [8]. Polování je nezbytné pro řadu keramických a polymerních materiálů, tyto materiály disponují několikanásobně silnějšími piezoelektrickými vlastnostmi než přírodní materiály, především pak vazebním koeficientem, hodnotou udávající míru přeměny mechanické energie na elektrickou a opačně, jsou tak vhodnějšími materiály pro energy harvesting nebo aktuátory.

2.2 Piezoelektrické lineární konstitutivní rovnice

Popis piezoelektrického jevu slučuje vztahy mezi mechanickým napětím a deformací se vztahy mezi elektrickým polem a elektrickou indukcí pomocí piezoelektrických konstant. Pro definici v Eukleidovském prostoru je použita kartézská soustava souřadnic a z důvodu anizotropie je zavedeno jednoznačné indexování os dle použité normy (např.: *IEEE Standard on Piezoelectricity 1978* [7], *ANSI-IEEE 176* (1987), *IRE Standard on Piezoelectric Crystals 1949*, *IEC 444* (1973)). Dle vstupních a výstupních veličin daných strukturou materiálu jsou aplikovány zjednodušené vztahy, rozlišujeme například systémy rovnic přetvoření-náboj *S-E* (1,2) a napětí-náboj *T-E* (3,4) [7,9,11]. Linearita a aplikovatelnost těchto rovnic závisí na vhodných provozních podmínkách, vysoké mechanické či elektrické napětí nebo přechod stavu/struktury materiálu z důvodu vysoké teploty působí nelinearitu až ztrátu piezoelektrických vlastností [7,12].

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [d]\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad (2)$$

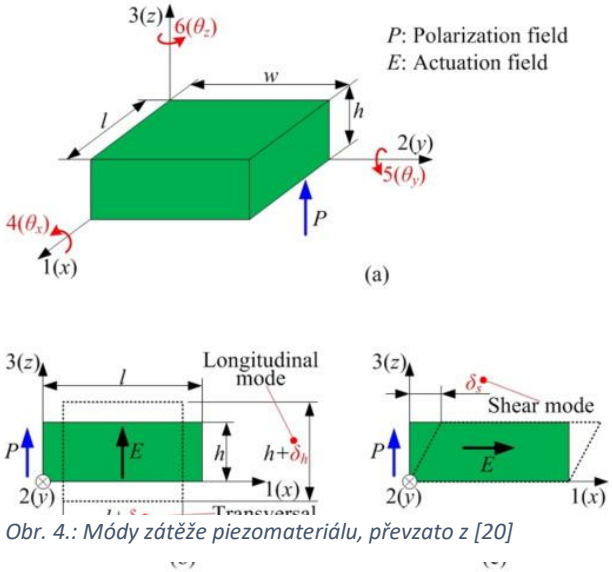
$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [e]\{E\} \quad (3)$$

$$\{D\} = [e]\{S\} + [\varepsilon^S]\{E\} \quad (4)$$

T mechanické napětí (N/m²)
S deformace (-)
d piezoelektrická konstanta přetvoření (C/N)
e piezoelektrický koeficient (C/m²)
s^E elastická poddajnostní konstanta (m²/N) v konstantním elektrickém poli E
c^E elastická tuhostní konstanta (N/m²) v konstantním elektrickém poli E
E elektrické pole (V/m)
D elektrická indukce (C/m²)
ε^S dielektrická konstanta (F/m) za konstantní deformace S
ε^T dielektrická konstanta (F/m) při konstantním mechanickém napětí T

2.2.1 Základní módy zátěže

Dle směru přetvoření a polarizace piezoelektrického členu indexujeme pracovní módy. V *IEEE standard on piezoelectricity* [7] je osa polování značná indexem 3 a druhý index je směr deformace, 1-3 hlavní osy a 4-6 osy střihové. Označení 33 značí příčný mód a 31 boční mód, smykový mód je značen 35. Módy jsou znázorněny na Obr. 4. [20].



Obr. 4.: Módy zátěže piezomateriálu, převzato z [20]

2.3 Piezoelektrické konstanty

Elastická poddajnost a tuhost

Poddajnost udává míru přetvoření na jednotku mechanického napětí (5) v korelaci s elektrickým polem a elektrickou indukcí. Tenzor poddajnosti *s* je inverzí k tenzoru tuhosti *c* (6), který vyjadřuje míru mechanického napětí σ na jednotku přetvoření *S*.

$$S = s\sigma \tag{5}$$

$$\sigma = cS \tag{6}$$

Absolutní permitivita a relativní permitivita

Permitivita je mírou polarizovatelnosti dielektrického materiálu elektrickým polem nebo jinak řečeno schopností materiálu odporovat polarizaci elektrickým polem, podává také informaci o schopnosti materiálu uschovat potenciální energii z působení pole (vlastnost kondenzátoru). Permitivita materiálu ε_m je popsána jako podíl elektrické indukce D a intenzitou elektrického pole E (7). Relativní permitivita ε_r je podílem permitivity materiálu ε_m a permitivity vakua ε_o (8).

$$\varepsilon_m = D/E \tag{7}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_m/\varepsilon_o \tag{8}$$

Piezoelektrická deformační konstanta a nábojová konstanta

Deformační konstanta d udává míru deformace S v závislosti na vnějším elektrickém poli E (9). Míra indukovaného elektrického pole E v závislosti na vnějším mechanickém napětí T je dána pomocí nábojové konstanty g (10). Piezoelektrickou konstantu g lze také získat ze vztahu (11) [9][11].

$$S = dE \tag{9}$$

$$E = gT \tag{10}$$

$$g = d/\varepsilon_m \tag{11}$$

Mechanický faktor kvality

Tato bezrozměrná veličina je použita při popisu chování oscilujících systémů. Mechanický faktor kvality udává míru ztráty energie systému za periodu při vlastní frekvenci a jejím blízkém okolí. Hodnota Q_m jdoucí k nekonečnu představuje netlumený systém, $Q_m = 1/2$ se označuje jako kritické tlumení, hodnoty nižší značí přetlumený systém.

Elektromechanický vazební (coupling) koeficient

Udává míru přeměny vstupní mechanické energie na elektrickou pro jev přímý nebo vstupní elektrické energie na mechanickou pro jev nepřímý. Pomocí vazebního koeficientu lze odhadnout šířku propustného pásma filtru, malé hodnoty např. 0,1 značí úzkou šířku pásma okolo rezonanční frekvence do 1 % [9].

Curieho teplota

Hraniční teplota piezoelektrických materiálů, při které dochází ke změnám ve struktuře materiálu spojených se ztrátou antisymetrických vlastností [9], či narušením jednotné polarizace, ovlivňující funkčnost jevu v daném materiálu.

2.4 Piezoelektrické materiály

Pro jednodušší orientaci jsou piezoelektrické materiály řazeny do skupin dle jejich elementární buňky a struktur, které tyto buňky tvoří nebo jsou jejich součástí.

Monokrystalické jsou tvořeny periodicky se opakující (homogenní) strukturou skrz celý objem. Značně používanými jsou křemen, lithium niobát nebo lithium tantalát.

Polykrystalické tvoří zrna s periodickou strukturou, jednotlivá zrna je potřeba orientovat polováním. Nejrozšířenější je PZT, které má v základní podobě chemický vzorec $Pb(Ti,Zr)O_3$. Strukturu PZT lze dopovat ionty a účinně ovlivnit materiálové konstanty [9].

Polymery jsou řetězce opakující se základní buňky (merů) organických látek. Značný piezoelektrický jev je pozorován u polyvinildifluoridu PVDF, který při formování prochází jak polováním, tak i tažením.

Nano struktury a Kompozity jsou důmyslné geometrické konfigurace těchto materiálů vyvinuté často za účelem zesílení specifických vlastností. Kompozity jsou tvořeny více fázemi s odlišnými vlastnostmi [8,9].

2.5 Uplatnění piezoelektrických materiálů

Křemenné krystaly nacházejí dlouhodobé užití především v elektronice, kde hrají významnou roli jako oscilátory a časovače s velmi stabilní rezonanční frekvencí díky vysokému Q_m faktoru nebo také jako pásmová propust/filtr.

Využití PZT keramik oplývá diverzitou. Nepřímého jevu je využito pro precizní pohyb pomocí aktuátorů, ty lze rozdělit na polohovače, které vynikají při kalibraci optických systémů díky rozlišení v desetinách mikrometrů, kompaktní motory bez potřeby os či převodů, nebo aktivní tlumiče, které dynamicky vykonávají protichůdné pohyby interferující s šířícími se vibracemi v tlumeném materiálu. Aktivní tlumení efektivně eliminuje vychýlení z rovnovážné polohy, ale vyžaduje přísun elektrické energie a řízení k plné funkci oproti méně efektivnímu, ale jinak energeticky nenáročnému pasivnímu tlumení. Přímého jevu lze využít ke generaci elektrické energie, tato zařízení označujeme jako harvestery, ty jsou schopné generovat dostatek energie k napájení elektroniky modulů na nepřístupných místech. Aktivní senzory PZT jsou vhodné k detekci změn v prostředí, jako jsou vibrace, napětí v materiálu (tenzometry), akcelerace, změny tlaku nebo nárazy. V akustice tvoří PZT funkční prvky pro mikrofony, reproduktory nebo ultrazvukové sondy [9]. Je třeba zmínit, že PZT má hysterezní chování, které je potřeba zmapovat pro přesné měření.

Flexibilita, biokompatibilita a vysoký vazební koeficient faktor PVDF nachází využití v biomedicíně a senzorice, tenké vrstvy kompozitů PVDF zaznamenaly úspěch při elektrické stimulaci poraněných tkání za účelem regenerace a experimenty s kapsulovitými nosiči s lokální dopravou chemických látek by mohly představovat pokrok v boji proti rakovině [14].

3. Vibrace

3.0 Historie analýzy vibrací

Vibrace a jejich projevy jsou kolem nás odedávna, jejich porozuměním se zabývali už staří Řekové. Tehdejší objevy byly spjaté s vnímatelnými podněty z okolí, jako jsou zvuky nebo vlny vodní hladiny. *Pythagoras ze Samu* pozoroval vliv délky strun na frekvenci produkovaného zvuku, dále také celé vyšší násobky této frekvence neboli harmonickou řadu. *Aristoteles ze Stageiry* se zajímal o šíření zvuku ve vzduchu, a již ve 4. století př. n. l. popisoval zvuk, jako tlakové vlny šířící se prostředím.

Mezi začátkem 17. století až polovinou 18. století se řada vědeckých osobností zabývá popisem pohybu těles a jejich interakcemi s okolím, v této době dochází k formulaci klasické mechaniky.

Jeden z názorných příkladů rezonance publikoval *Ernst Chladni*, který jemným pískem zviditelnil kmitny a módy vibrací na tenkých deskách.

Rezonance se projevila jako destruktivní pro nespočet mostních konstrukcí, mezi příklady se často uvádí Brougtonský visutý most, který se zhroutil jednotným krokem vojáků (1831), nebo Tacoma Narrows Bridge, jehož vozovka se rozkmitala vlivem silného větru (1940) [15].

Koncem 30. let 20. století sledoval *T.C. Rathbone* chod turbín, tato pozorování byla jedním z prvních kroků ke kontrole stavu rotujících strojů v závislosti na frekvenci a amplitudě vibrací k predikci stavu, životnosti a pravděpodobnosti selhání.

První dynamické modální analýzy byly prováděny začátkem 40. let na letadlech, výpočty byly prováděny ručně a testovalo se na reálných dílech. Drátové tenzometry se používaly pro statická a kvazi-statická měření, křemenné pro dynamická. Drátové byly později nahrazeny foliovými, které se vyráběly pomocí fotochemického obrábění. Elasticita fólie zlepšila životnost a tenká vrstva materiálu s velkou plochou zlepšila disipaci tepla, což vedlo k redukci hystereze vlivem změn teploty [16]. 1954 byl objeven piezorezistivní efekt u krystalického křemíku a germania, který je později využit v senzorice.

Příchod počítačové techniky přinesl další rozvoj modální analýzy, algoritmizací Fourierovi transformace, a sítí konečných prvků bylo možné efektivněji provádět komplexnější modely [16]. Využitím litografie vznikají první MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), mikroskopická zařízení kombinující obvody, senzory a aktuátory, vhodná pro řízení aktivních tlumících systémů.

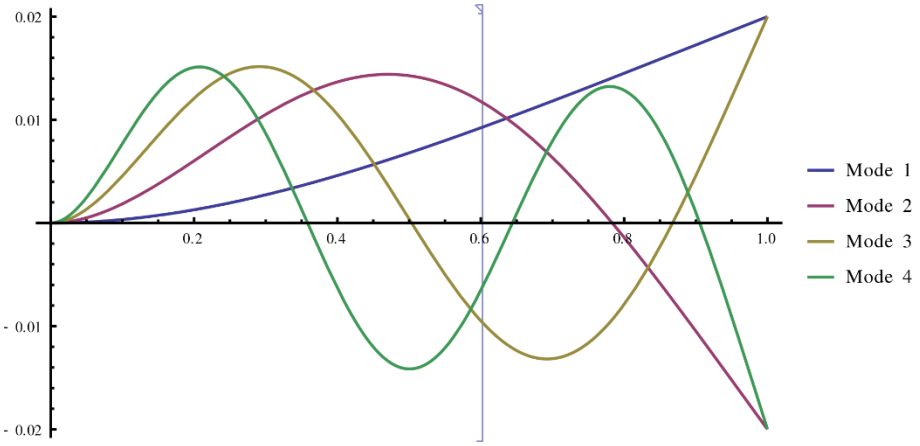
3.1 Popis vibrací

Mechanické vibrace můžeme popsat jako vychýlení z jisté rovnovážné polohy, takovou polohou nejčastěji uvažujeme klidovou polohou bodu, klidovou geometrií tělesa bez vnějšího zatížení nebo pracovní polohu tělesa. Z této rovnovážné polohy se námi pozorovaný systém může vychýlit přenosem vibrací ze základny, okolního fluida nebo také vlivem silových interakcí. Vibrace se spolu se zátěží podílí na (elastické) deformaci tělesa, (plastické) únavě materiálu a v nejhorším případě destrukci struktury. Dále mohou být potencionálním zdrojem chyb osazených měřících prvků nebo ovlivňovat komfort uživatele.

Vibrace systému jsou iniciovány vnějším vstupem energie, buzením. Lze pozorovat dva typy vibrací dle buzení, volné a nucené. Systém disponující potenciální nebo kinetickou energií, který je ponechán vibrovat bez vnějšího zásahu, je označován, jako volně vibrující, tyto systémy mají tendenci oscilovat na své vlastní frekvenci. Nucené vibrace, mohou být způsobeny buzením periodickým nebo náhodným. Při periodickém buzení se systém nabudí na frekvenci budící, v tomto případě nás zajímá okolí vlastní frekvence systému, kde pozorujeme rezonanci.

Netlumená rezonance se projevuje mnohonásobným navýšením amplitudy kmitu v okolí vlastní frekvence systému. V tomto okolí pozorujeme vysokou efektivnost přeměny energie, a její akumulaci, je-li systému dodávána energie.

Tvar vibrací/vlnění systému se označuje jako mód, tyto módy mají svou modální frekvenci a tvar kmitu. Na obrázku 5. lze vidět první 4 módy vibrací na vetknutém nosníku.



Obr. 5.: První 4 módy na vetknutém nosníku, převzato z [26].

Pro definování systému, u kterého vibrace chceme pozorovat je nezbytná hmota m, určující setrvačné vlastnosti a pružnost k, uschovávající potenciální energii mimo rovnovážnou polohu [13], dále pro reálné systémy je podstatné tlumení d, určující ztráty energie systému.

3.2 Přehled obecných metod tlumení systémů

Systém vystavený vibracím lze tlumit rozptýlením energie vstupujících vibrací a vibrací samotné struktury pomocí tlumících prvků, dle využitých metod rozlišujeme tlumení:

Elastické, kde je tlumení dosáhnuto přetvořením za použití vhodných materiálů a geometrie. Příkladem mohou být akustické pěny, které se deformují a pohlcují zvukové vlny nebo kovové konstrukce tvaru "X" v kombinaci s třecími a viskózními mechanismy dopisující otřesy nebo poryvy větru u staveb.

Viskózní využívají smykových sil při průtoku kapaliny skrz otvory, kdy dochází ke tření uvnitř kapaliny a značné generaci tepla/disipaci energie. Tlumiče využívající turbulentní proudění se hojně využívají v automobilovém průmyslu.

Hmotnostní (TMD – Tuned Mass Damper) jsou závaží (obvykle okolo 1/10 hmotnosti tlumené konstrukce), označovaná jako harmonické nebo seismické tlumiče, laděné pro přesun energie vibrace z konstrukce na tato závaží, které je nejčastěji viskózně tlumeno. Využívá se pro tlumení budov proti seismickým aktivitám, dále u frézovacích hlav při obrábění nebo aktivní ATMD u automobilů a raket [18].

Elektromagnetické tlumení využívá vířivých proudů (ECD – Eddy Current Damping) nebo cívky s bočníkem (EMSD – Electro Magnetic Shunt Damper). Tlumení je závislé na rezistivitě vodiče a rychlosti vzájemného pohybu mezi vodičem a magnetickým polem. Elektromagnetické tlumení nevyžaduje kontakt, je ideální pro tlumení bez vlivu tření.

Piezoelektrické prvky jsou připojeny k povrchu nebo jsou interní součástí struktury tlumené soustavy. Elektrický obvod je využit k disipaci generované energie z vibrací nebo k aktuaci prvku. Piezoelektrické prvky lze využít jak tlumící zařízení, tak i jako senzory díky přímé přeměně energie. Piezoelektrické prvky jsou hojně využity pro aktivní tlumení menších zařízení, kde vynikají rychlou odezvou systému, ale i v letectví, kde jsou jejich hlavní výhodou rozměry a váha.

3.3 Přístupy ke kontrole vibrací

K tlumení systému lze využít několika strategií, které cíleně snižují množství vstupující energie a energie systémem uschované. Přesunem vlastní/rezonanční frekvence mimo buzenou frekvenci lze navýšit množství energie potřebné k vyvolání kmitů o stejné amplitudě, jak v okolí rezonance [17]. Ovlivnit vlastní frekvenci systému lze změnou hmoty nebo tuhosti systému, tato možnost se vždy nenabízí, pak je potřeba zlepšit disipační schopnost systému.

Pasivní systémy nedisponují vnější energií, reagují na změny systému a disipují energii, která jim je předána z konstrukce. Efektivita tohoto přenosu se liší s nastavením pasivního tlumiče, ty jsou nejčastěji laděny na okolí vlastní frekvence. Tato řešení jsou robustní v jejich pracovním pásmu, ale jejich efektivita klesá při změně parametrů systému, pracovních podmínek. Pro rozšíření pracovní frekvence pasivním tlumením lze aplikovat pole tlumičů laděných na více specifických frekvencí.

Semi-aktivní systémy jsou energeticky nezávislé nebo nenáročné, ale oproti pasivním metodám jsou schopny měnit své parametry jako tuhost k nebo tlumení d a reagovat tak na měnící se provozní podmínky, rozšířit pracovní oblast nebo posouvat vlastní frekvenci systému. Jsou kompromisem mezi pasivním a aktivním tlumením.

Aktivní systémy k činnosti potřebují akční člen a řídící smyčku řízenou řídící elektronikou a senzory, která ovlivňuje parametry systému, nebo budí systém. Aktivní systémy jsou schopny buď efektivně izolovat tlumený systém nebo zatlumit stávající vibrace, ale se složitostí systému (velikost konstrukce a mutli-body systémy) jsou tato řešení náročnější a mohou vykazovat nestabilitu.

4. Vlastnosti piezoelektrických systémů

4.0 Popis systému s piezoelektrickým tlumením

Piezoelektrické tlumící systémy, také PEMs (Piezo Electro-Mechanical System), sestávají z tlumené mechanické konstrukce, piezoelektrického materiálu disponujícímu jak mechanickými, tak elektrickými vlastnostmi a elektrickým obvodem. Kontrola vibrací je založena na vazbě mezi mechanickou strukturou a elektrickým obvodem.

U reálného systému je k efektivnímu převodu energie potřeba vhodné umístění a uchycení piezoelektrických prvků, ty umisťujeme do míst s největším namáháním pro maximalizaci přenesené energie, kterou chceme zmařit. Těmito místy jsou uzly a kmitny, jejich pozice se mění dle tvaru a módu vibrace daného systému. Dále je potřeba zajistit, aby byly prvky rozmístěny mimo neutrální osu a nedocházelo k vyrušení polarizace napříč prvkem [19], chceme tedy jednotné namáhání a deformaci dle fáze vibrací.

Dynamické změny vlivem vnějšího buzení se projevují současně na elastické deformaci mechanické konstrukce tak i vrstvy piezoelektrického materiálu, deformací dochází k polarizaci piezoelektrického materiálu mezi svorkami, převodu energie z mechanické na elektrickou. Piezoelektrický materiál mezi svorkami se z elektrického hlediska chová jako kapacitor se zdrojem napětí. Na svorky lze připojit elektrický obvod, ať už jednoduchou zátěž nebo obvod řízený kontrolerem a senzory.

4.1 Modelování systému

Při modelování PEMs se setkáváme jak s analytickými modely, tak i diskrétními, oba typy mohou sloužit k verifikaci dat mezi modelem a experimentem. K popisu jsou využity vztahy a konstanty zmíněné v 2. kapitole udávající vlastnosti piezoelektrického materiálu, které nám umožňují zakomponovat vliv piezoelektrických elementů do pohybové rovnice modelovaného systému.

Analytické modely jsou schopné popsat relativně jednoduché homogenní systémy, jako jsou modely vetknutého nosníku (Euler Beam Theory) [26] nebo tenké desky (Kirchhoff-Love Plate Theory) se značnou přesností. Použitím modelu popsaného kompaktním systémem matematických rovnic získáváme nástroj, se kterým jsme schopni snadno opakovat analýzu systému s rozdílnými parametry, kdy lze pozorovat vliv změn parametru na chování systému a formulovat obecnou teorii. Tento typ rovnic také umožňuje rychlý (real-time) výpočet aktuálního stavu systému, což je nezbytné pro aktivní řízení soustavy.

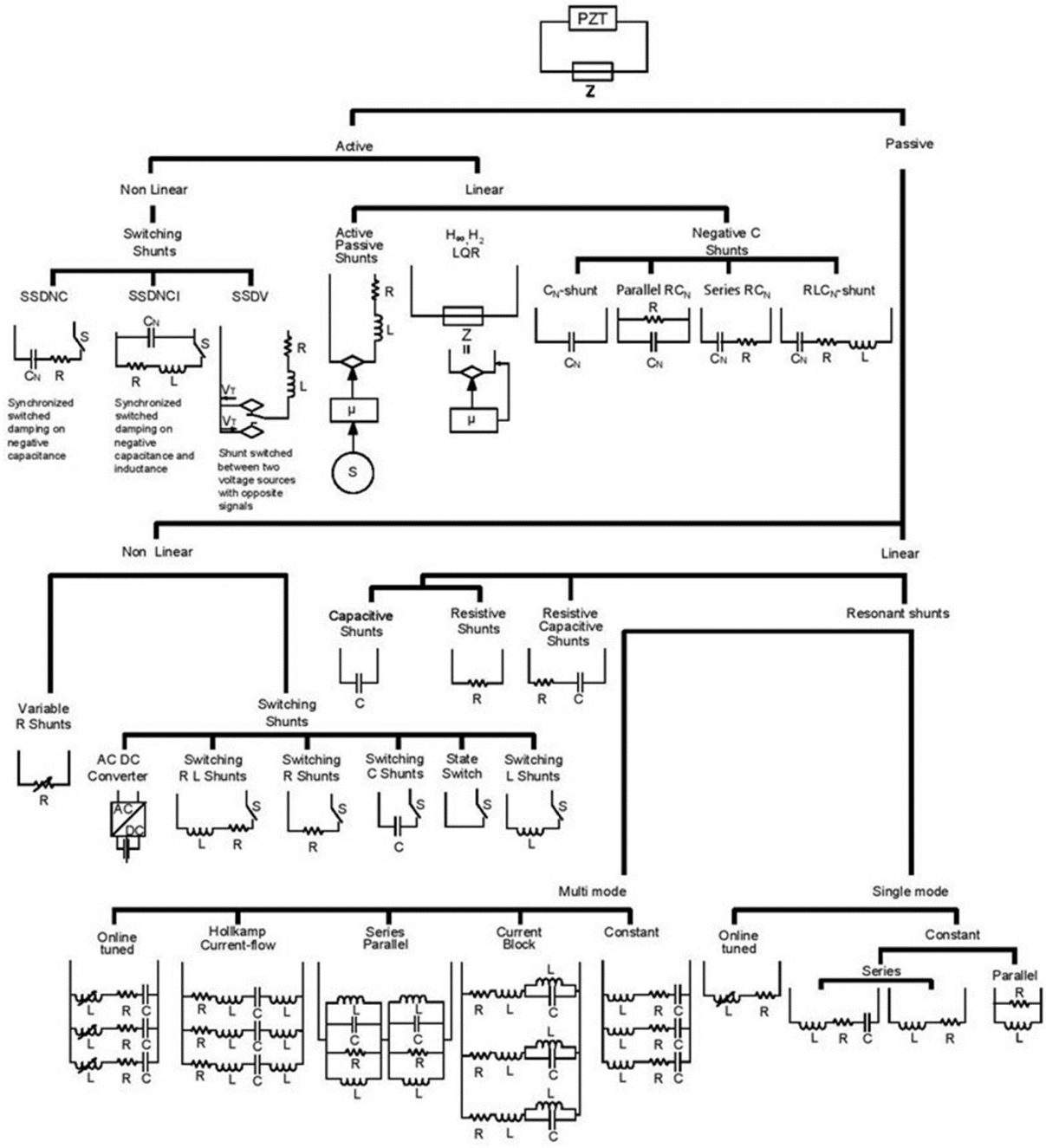
Diskrétní přístup definuje systém pomocí diskrétních rovnic, které se pro přehlednost zapisují do matic. Tento typ modelu je aplikovatelný na rozmanitější tvary, kdy je struktura převedena na síť konečných prvků. Těchto modelů se využívá při návrhu reálných systémů a jejich modální analýzy, kdy lze provést predikce a vizualizace módů vibrací struktury, kterou by jinak bylo velmi obtížné analyticky popsat. Metoda konečných prvků se také využívá k získání globálních koeficientů při redukci systému, které odvodíme z matice lokálních koeficientů.

Při modelování systému lze využít elektromechanických analogií, díky kterým lze celý systém převést na mechanické nebo elektrické zapojení.

Pro systém mající n počet stupňů volnosti lze nalézt n vlastních frekvencí a modálních tvarů.

4.2 Přehled elektrické zátěže

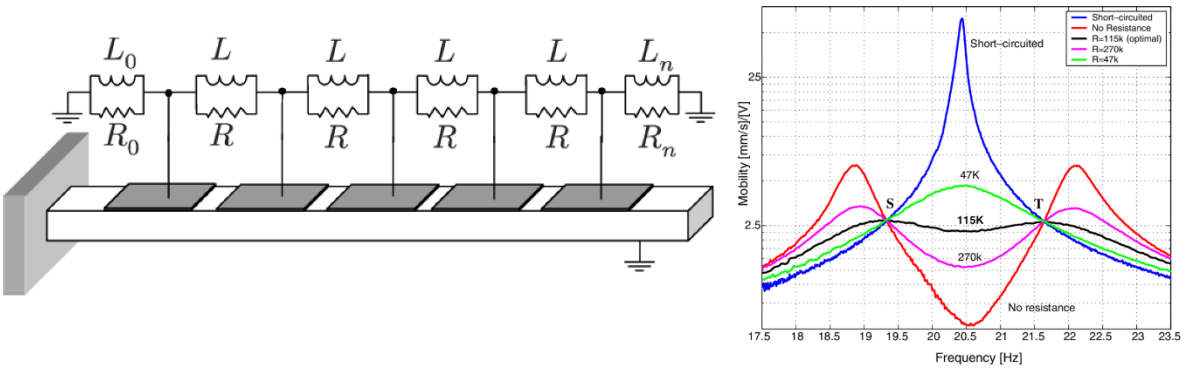
V této části rozebereme zapojení využité při kontrole vibrací. Návrh obvodu zátěže je téma zkoumané něco přes 30let, za tuto dobu se uskutečnil značný pokrok a byly formulovány techniky využitelné k tlumení, ladění parametrů a řízení systémů. Názorný přehled zapojení tvoří schéma z posudku *Konstantina Marakakis et al.* [24], který obsáhle rozebírá pasivní a aktivní řešení viz Obr. 6.



Obr. 6.: Přehled obvodů zátěže využívaných k tlumení vibrací, převzato z [24]. Konstantin Marakakis et al.

4.2.1 Pasivní zátěž

Pasivní zátěže byly první zkoumané PEM systémy, složené z kombinace rezistoru, cívky a kondenzátoru jak v sériovém, tak paralelním zapojení. Jejich činnost se přirovnává k elasto-viskózním tlumičům pro čistě rezistivní zátěž, nebo TMD tlumičům pro resonantní RL obvod (*Hagood and von Flotow* [29]), kdy nesmíme opomenout kapacitu C_p samotného piezoelektrického elementu paralelně s R nebo RL zátěží. Řešení čistě rezistivní jsou jednoduchá na implementaci, ale obecně nedisponují silným efektem tlumení. Efektivita těchto řešení klesá mimo pracovní frekvenci naladění, pro obsáhnutí většího množství pracovních frekvencí jsou sestaveny paralelní a větvená zapojení mezi více PEM prvky. Na Obr. 7. je vidět příklad tlumení dlouhého vetknutého nosníku systémem PEM elementů a odezva podle nastavení rezistoru RL obvodu [27]. Nevýhodou tlumení pomocí RL zátěžného obvodu je rostoucí velikost indukčnosti cívky, která dosahuje vysokých hodnot L (>1 H) při nízké frekvenci $f_{vlastní}$ (<200 Hz), takto velké hodnoty indukčnosti lze řešit syntetickými obvody, avšak ty je nutné napájet.

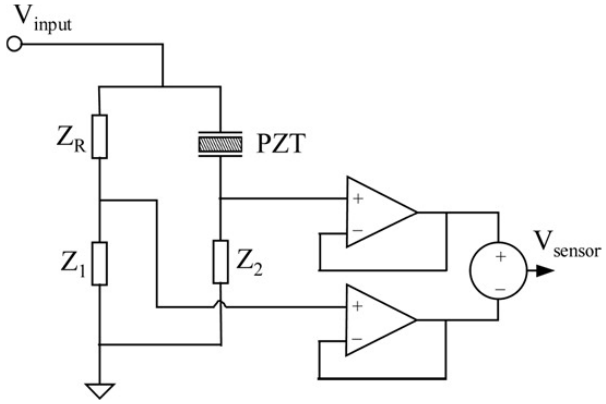


Obr. 7.: Tlumení dlouhého vetknutého nosníku pomocí větveného zapojení paralelních RL obvodů, převzato z [27]. Francesco Dell'issola.

4.2.2 Aktivní zátěž

Aktivní PEMs jsou tvořeny několika obvody, které můžeme dle jejich specifické činnosti rozdělit na senzor, aktuátor a řídící obvod. PEM je v tomto případě využit, jako aktuátor, který silově ovlivňuje tlumenou konstrukci v reakci na přivedené napětí.

Senzory poskytují řídící jednotce informaci o aktuálním stavu systému. V laboratorních podmínkách (i pro měření pasivních systémů) se setkáváme s využitím retro-reflektivních a reflektivních optických snímačů, kdy vibrující soustava stíní nebo odráží pole laserů namířených na přijímací pole senzorů. Optické senzory nejsou umístěny na měřeném systému, ale na experimentální technice, například antivibračním stolu eliminujícím vnější vlivy. Optické senzory neovlivňují energetickou bilanci systému. K určení sledovaného stavu lze využít samotného PEM, který je součástí struktury, kdy jeden prvek slouží jako senzor a druhý jako aktuátor. Potřebu dvou prvků eliminuje SSA (Self-Sensing Actuator) [22] v můstkovém zapojení se dvěma napěťovými sledovači, jak lze vidět na obrázku 8., toto zapojení je schopné osamostatnit napětí generované na piezoelektrickém prvku od aktuačního napětí, a je funkční pro malá rychle vibrující zařízení, jako jsou MEMS [22].



Obr. 8.: Zapojení SSA, převzato z [22]

Řízení aktivního systému je problém spadající pod teorii řízení, pro který je typický přístup vytvoření ovladače pomocí (State-Space) stavového modelu. Základní tvar stavových rovnic systému píšeme jako:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{12}$$

$$y = Cx + Du \tag{13}$$

Maticemi stavového systému můžeme analyzovat řiditelnost a pozorovatelnost systému. Dále lze vytvořit dopřednou nebo zpětnovazební smyčku pro korekci vychýlení systému. Zohlednění maximálního aktuačního napětí lze provést pomocí teorie LQR (Q a R jsou koeficienty cenové funkce), kdy volíme mezi rychlostí řídícího zásahu a potřebnou energií vynaloženou na způsobení dané regulační změny [23], která je limitována reálnými vlastnostmi piezo aktuátoru a jeho zapojení.

4.2.3 Zátěž semi-aktivního tlumiče

Semi-aktivní se označuje tlumící obvod kombinující prvky aktivního a pasivního zapojení. Dle rychlosti adaptace zapojení na pracovní podmínky lze rozlišovat adaptivně-pasivní řešení, která jsou vázána na snímání pomalejších jevů, jako je změna teploty okolního prostředí, oproti semi-aktivním [28], která pracují podobně jako aktivní řešení, v cyklu vibrací. Oproti aktivním se snaží pomocí vlastní energie kmitů zatlumit systém a snížit energetické nároky řízení využitím např. PM jako senzoru nebo řízením bez potřeby složitých řídících obvodů.

Jeden z prvních semi-aktivních přístupů je SSD (State-Switch Damping), zde se využívá metodického přepínání zátěže. William W. Clark otestoval metodu SSD, při které je přepínáno mezi zkratem/rozepnutím a odporem/rozepnutím každou ¼ cyklu. Zátěž s malou hodnotou odporu (zkrat) je sepnuta, když se struktura vrací do rovnovážné polohy a odepnuta při pohybu mimo rovnovážnou polohu. V práci Clarka bylo zjištěno, že optimálně naladěná rezistivní zátěž má lepší tlumící vlastnosti než SSD obvod, ten však dosahuje lepších vlastností mimo rezonanci a při změně naladění/vlastností systému [28]. Metoda SSD je ideální pro systémy, kde tuhost pieza značně ovlivňuje celkovou tuhost systému [31].

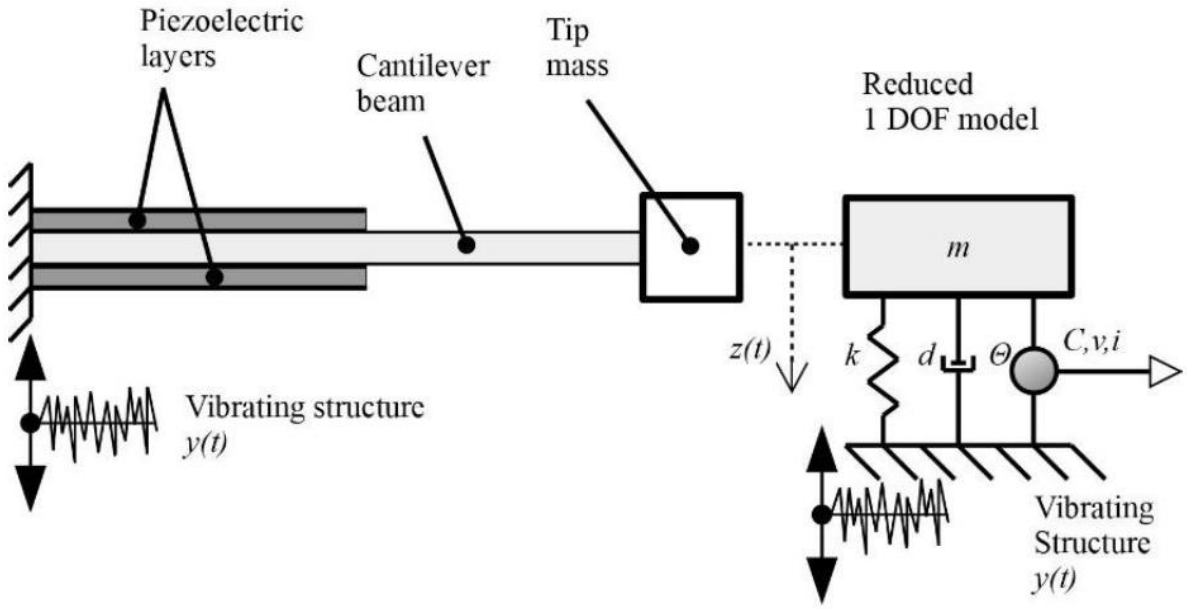
Další metodou, která vychází z předchozího řešení je SSDI (Pulse State-Switch Damping on Inductor), tato metoda využívá spínané sériové RL zátěže korektně sfázované s mechanickou částí systému. Zátěž je sepnuta při maximální výchylce systému a odepnuta, jakmile náboj v zátěži dosáhne maxima [31]. Tato metoda je ovlivněna faktorem kvality $Q = E_{\text{uloženo v zátěži}} / E_{\text{ztracená za cyklus}}$ elektrických prvků zátěže (spínač, cívka, vedení) [30].

Obejít limitaci Q faktorem je možné pomocí syntetického obvodu záporné kapacity. Záporná kapacita paralelně k PM je schopná snížit kapacitu C_p, a zvýšit tak efektivitu převodu energie, kdy je méně energie ukládáno do dielektrika. Negativní kapacity se využívá v relativně nové SSDNC (Synchronized Switch Damping on Negative Capacitor) metodě, která nahrazuje L obvodu SSDI [30,32].

5. Modelování a simulace pasivních zátěží

5.0 Model dynamického systému s piezoelektrickým elementem

Při modelování systému využijeme lineární nosníkový model piezoelektrického VEH (Vibration Energy Harvesting) založený na VEH Midé V21BL. Tento model oscilátoru s piezoelektrickou vrstvou je redukován na 1 DOF (Degree of Freedom) (viz Obr. 9.).



Obr. 9.: Piezoelektrický VEH a redukce na systém s jedním stupněm volnosti, převzato z [25].

Diferenciální rovnice pohybu s piezoelektrickou vrstvou popisující tento systém lze zapsat:

$$\ddot{z} = -\frac{d\dot{z}}{m} - \frac{kz}{m} - \frac{\Theta v}{m} - \ddot{y} \tag{14}$$

$$\dot{v} = \frac{\Theta \dot{z}}{C} - \frac{v}{CZ} \tag{15}$$

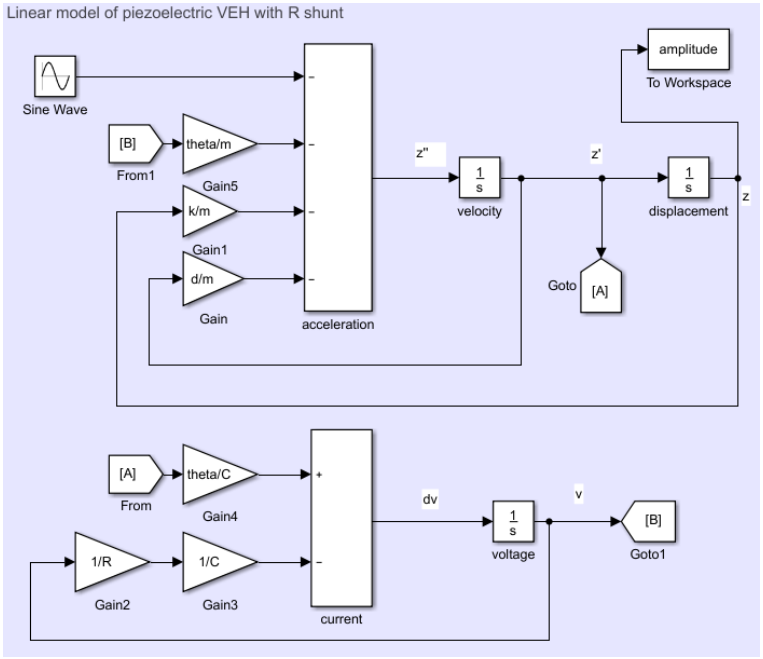
jednotlivé veličiny a jejich hodnoty (převzaty z [25]):

z – poloha hmotného bodu (m)
m – redukovaná hmota (Kg)
k – redukovaná tuhost (N/m)
d – mechanické tlumení (Ns/m)
y'' – akcelerace buzení (m/s²)
v – napětí svorek piezoelektrického zařízení (V)
C_p – kapacita piezoelektrické vrstvy (F)
Θ – vazební koeficient (N/V)
Z – impedance zátěže (Ω)

Při modelování nás bude zajímat především zátěž, kterou budeme měnit dle typů a metod tlumení. K modelování využijeme modelovacího prostředí *MATLAB Simulink™*, zde aplikujeme výše zmíněné diferenciální rovnice k vytvoření zpětnovazebního modelu a také ekvivalentní elektrické zapojení za pomoci knihovny *Simscape > Foundation Library > Electrical.*

5.1 Model s pasivní R zátěží

Soustavu diferenciálních rovnic zmíněných výše přepíšeme do schématu sestaveného z funkčních bloků programu *Simulink*™, Obr. 10. Chování systému v čase lze simulovat za použití dostatečně malého ($1*10^{-5}$s) diskrétního časového kroku simulace, kdy z klidové polohy (nulové počáteční podmínky) rozvibrujeme soustavu konstantním sinusovým signálem představujícím y'' zrychlení systému, které lze vyjádřit jako součin hmotnosti a aplikované síly. Maximální možné buzení je stanoveno dle katalogového listu VEH Midé V21BL popisující maximální vychýlení z rovnovážné polohy pro daný produkt. Buzení je totožné pro všechny simulované systémy, aby bylo možné získat referenci pro poměření použitých metod tlumení. Po ustálení systému lze určit amplitudu, při dané budící frekvenci systému, na které se systém stabilizoval.



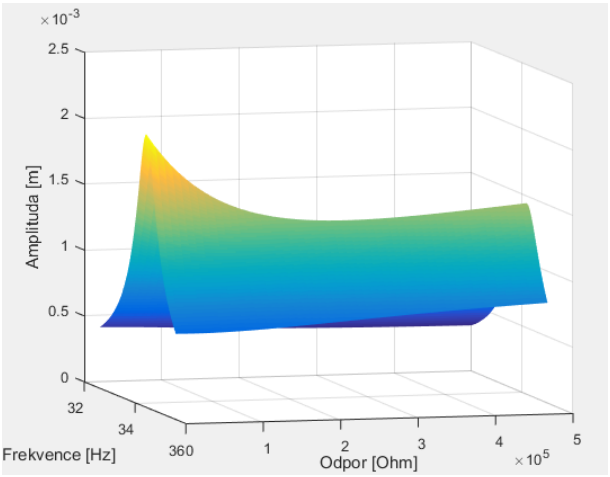
Obr. 10.: Zpětnovazební blokové schéma v simulinku.

Simulaci lze spouštět ze skriptu v *MATLAB*u, kdy pomocí skriptu můžeme provádět iterace simulace s odlišnými hodnotami konstant. Jelikož jsou na sebe jednotlivé simulace nezávislé (nepřenášíme žádné hodnoty mezi iteracemi), je možné akcelerovat získání výsledných dat rozesením výpočtu přes více zařízení (optimální by byla akcelerace grafickým čipem).

Optimalizaci rezistivní zátěže R provedeme iteracemi hodnot zátěže a budící frekvence. Hledáme hodnotu R, pro kterou je maximální amplituda při buzení nejnižší a při které hodnotě R tedy dochází k nejsilnějšímu zatlumení systému.

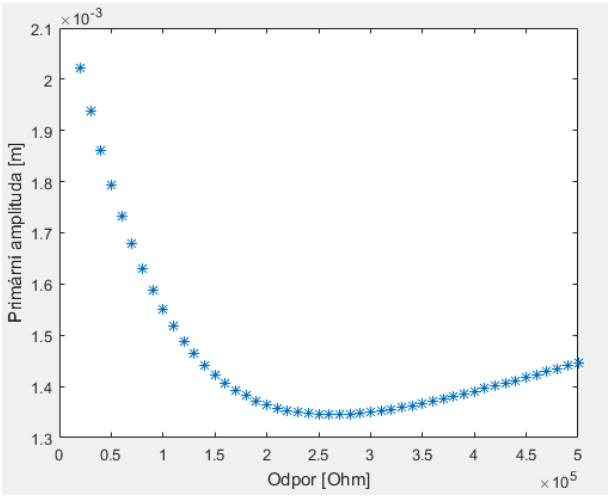
5.2 Simulace tlumení s pasivní R zátěží

Vykreslením závislostí mezi hodnotami $R_{zátěže}$, $f_{budící}$ a $z_{ustálení}$ vzniká plocha sedlovitého tvaru (viz Obr. 11.), na ploše lze pozorovat minimum primární frekvence. Pro přehlednost závislostí mezi hodnotami si je jednotlivě vykreslíme.



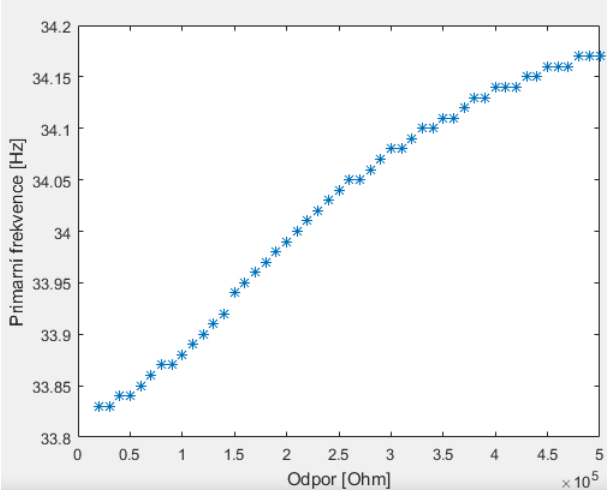
Obr. 11.: 3D Graf amplitud pro změnu R napříč buzenou frekvencí.

Ze závislosti mezi primární amplitudou a odporem lze identifikovat minimum (viz Obr. 12.), které odpovídá optimální hodnotě zátěže, pro kterou získáváme nejsilnější útlum napříč budícími frekvencemi. $R_{optimální}$ pro simulovaný systém odpovídá hodnotě 262 kΩ.



Obr. 12.: Graf závislosti mezi primární amplitudou a volenou zátěží R

Z grafu na Obr. 13. lze pozorovat růst primární frekvence systému v závislosti na rostoucím odporu. Svorky VEH Midé V21BL jsou umístěny v místě uchycení, připnutí zátěže tedy neovlivní hmotu vibrující části. Pokud se nemění hmota systému, ale pohybuje se hodnota frekvence maximálních kmitů, a předpokládáme-li $f_{\text{vlastní}} \approx f_{\text{max}}$, lze změnu zátěže přirovnat k změně efektivní tuhosti systému.

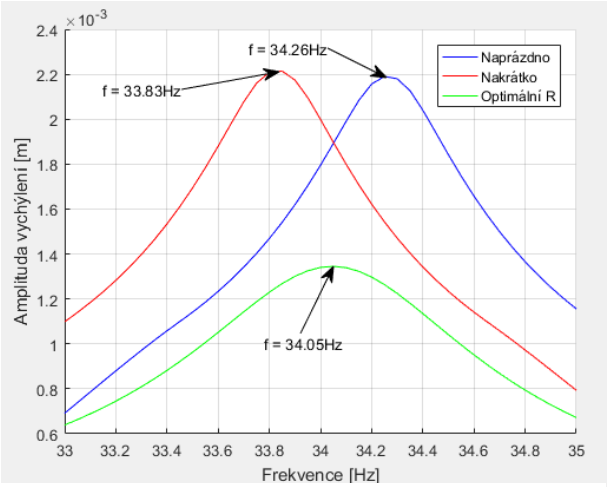


Obr. 13.: Graf závislosti mezi primární frekvencí a odporem.

Společně s optimalizací hodnoty R jsme určili chování systému v zapojení nakrátko (zkrat) a naprázdno (rozpojeno), které lze považovat za limitní stavy. Zapojení nakrátko způsobí okamžité vybití kapacity piezoelektrické vrstvy, takže v rovnici 14, třetí člen pravé strany $\theta v/m$, bude nulový. Bez vlivu tohoto členu se rovnice chová stejně jako čistě mechanický systém. Pomocí konstantního buzení můžeme eliminovat vliv tlumení mechanické části a otestovat odezvu systému, která by pro zkrat měla odpovídat vlastní frekvenci redukovaného systému dle vztahu (16).

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{16}$$

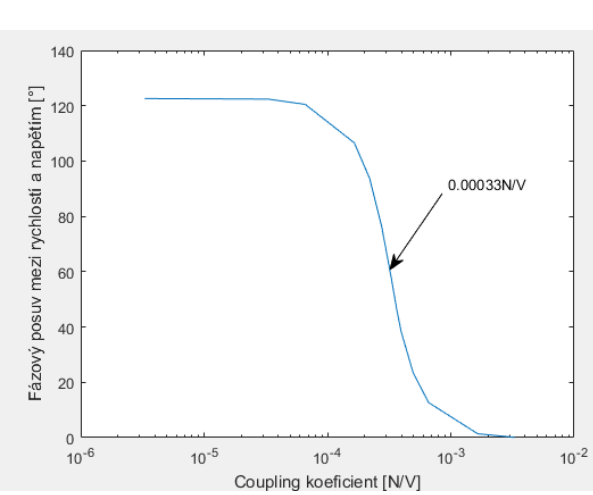
Dosazením do rovnice (16) získáváme hodnotu vlastní frekvence systému $f_{\text{v}} = 33{,}83$ Hz, která odpovídá simulované frekvenci pro zkrat $f_{\text{zkrat}} = 33{,}83$ Hz. Frekvence systému při $R_{\text{naprázdno}}$ jdoucí k nekonečnu odpovídá hodnotě $f_{\text{naprázdno}} = 34.26$ Hz, pro hodnotu $R_{\text{optimální}}$ získáváme $f_{\text{opt}} = 34{,}05$ Hz (viz Obr. 14.).



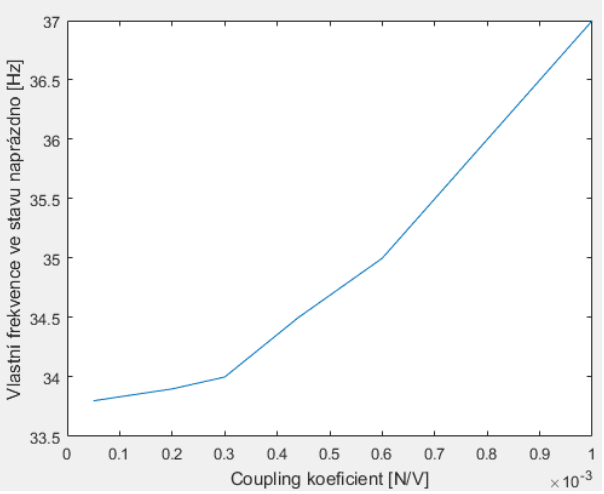
Obr. 14.: Frekvenční charakteristika zapojení: naprázdno, nakrátko a optimální R.

5.3 Vliv hodnoty vazebního koeficientu na chování systému

Navýšením vazebního koeficientu navyšujeme i množství převedené energie mezi mechanickým a elektrickým systémem, to má vliv na množství energie, které jsme schopni zmařit na zátěži. Při rostoucí hodnotě vazebního koeficientu pozorujeme menší fázový posuv mezi rychlostí mechanické části systému a napětím na piezoelementu – piezoelektrickém měniči, naopak pokud se hodnota vazebního koeficientu snižuje, napětí se více opožďuje (viz Obr. 15.). Pro vyšší hodnoty vazebního koeficientu pozorujeme zvýšenou schopnost měniče ovlivnit efektivní tuhost systému, roste primární frekvence při zapojení naprázdno (viz Obr. 16.).



Obr. 15.: Vliv vazebního koeficientu na fázový posuv mezi rychlostí mech. části a napětí na piezomateriálu.

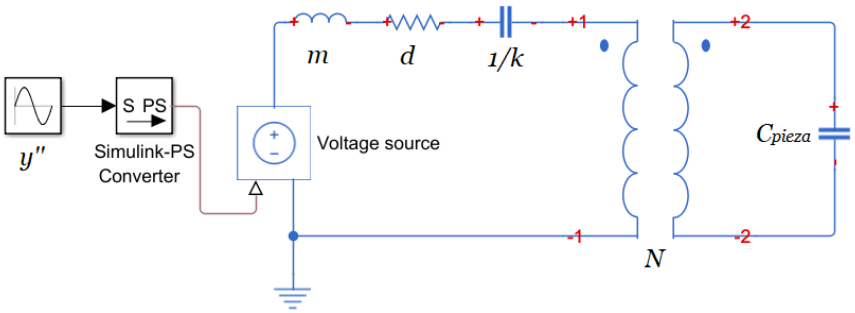


Obr. 16.: Vliv vazebního koeficientu na vlastní frekvenci systému při chodu naprázdno.

5.4 Ekvivalentní zapojení

Mechanickou část zapojení lze pomocí analogie (viz Obr. 17.) převést na ekvivalentní elektrický obvod, který nám ulehčí prací s dalšími typy zapojení.

Síla	$f \longrightarrow e$	Napětí
Rychlost	$\dot{z} \longrightarrow i$	Proud
Tlumení	$d \longrightarrow R$	Odpor
Tuhost	$1/K \longrightarrow C$	Kapacita
Hmota	$M \longrightarrow L$	Indukčnost
Coupling	$\Theta \longrightarrow N$	Transformační poměr



Obr. 17.: Analogie hodnot ekvivalentního zapojení a zapojení pomocí Simulink > Simscape.

5.5 Model s pasivní RL zátěží

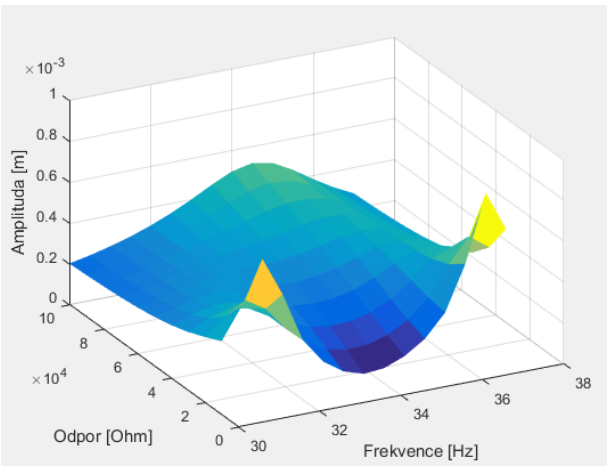
K dosažení optimálního tlumení pomocí RL je potřeba sladit mechanickou část systému s elektrickou pomocí nastavení optimální hodnoty indukčnosti L, v závislosti na vlastní kapacitě piezomateriálu C_p a frekvencí mechanického systému. Při rezonanci se v elektrickém obvodu vyrovnávají hodnoty induktivní a kapacitní reaktance $X_L \approx X_C$, pozorujeme odporový charakter obvodu na naladěné frekvenci a největší spotřebu energie, takže i lepší schopnost tlumit.

5.6 Simulace tlumení s pasivní RL zátěží

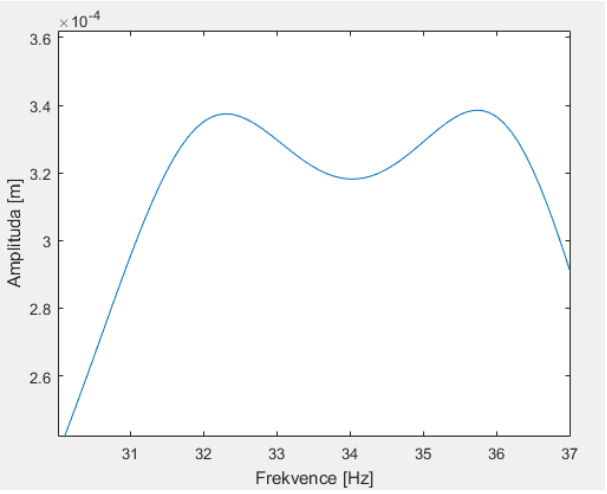
Hodnotu blízkou optimální hodnotě indukčnosti lze najít použitím Thomsonova vztahu (17) a následným doladěním. Rezistor v tomto případě ovlivňuje selektivitu obvodu, pro vyšší hodnoty R pozorujeme vyšší hodnotu jakosti Q a užší pásmo. Optimální R lze opět identifikovat iteracemi hodnot (Obr. 18.).

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot C_p} \tag{17}$$

Optimální hodnoty sériově zapojeného RL členů pro daný systém jsou: $L = 1198$ H a $R = 56$ kΩ (Obr. 19.). Pro nízkou frekvenci a danou kapacitu našeho systému dostáváme velmi vysokou hodnotu indukčnosti potřebné cívky, která není realizovatelná tradiční komponentou. Tento problém lze do jisté míry řešit zvýšením kapacity prvku piezomateriálu, například paralelním zapojením vrstev nebo výběrem piezoelektrického prvku s vyšší kapacitou. Pohodlnější pro testovací účely je možnost využít zapojení syntetické indukce, které jsou schopné vytvořit velké hodnoty nastavitelné indukce za cenu potřeby napájení. Kapacitu piezoelektrické vrstvy lze také snížit použitím zapojení syntetické negativní kapacity.



Obr. 18.: Vliv změny odporu na amplitudu napříč frekvencemi při naladěné L



Obr. 19.: Frekvenční charakteristika naladěného RL obvodu

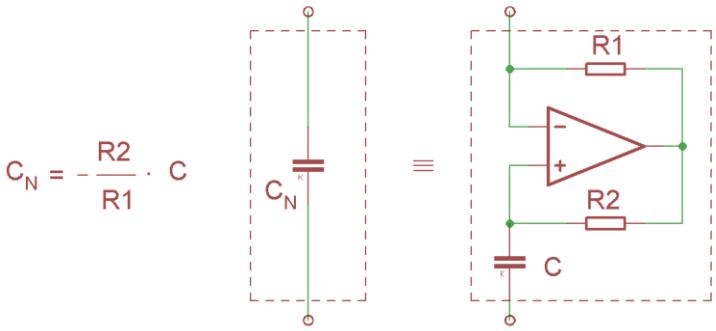
6. Modelování a simulace semi-aktivních zátěží

6.0 Model semi-aktivního tlumení

Pojem semi-aktivní zátěže zavádíme v okamžiku potřeby realizovat pasivní obvodový prvek s nereálnými parametry s využitím náhradních obvodů, které jsou obvykle realizovány pomocí operačních zesilovačů. Operační zesilovače jsou aktivní prvky, které je možno provozovat v lineárním i nelineárním režimu činnosti.

6.1 Model negativní kapacity (NC) s odporem

Příkladem zátěže, která vyžaduje použití náhradního zapojení s operačním zesilovačem je obvod negativní kapacity NC. Negativní kapacitu C_N je možné realizovat s využitím ekvivalentního zapojení podle obrázku Obr. 20.

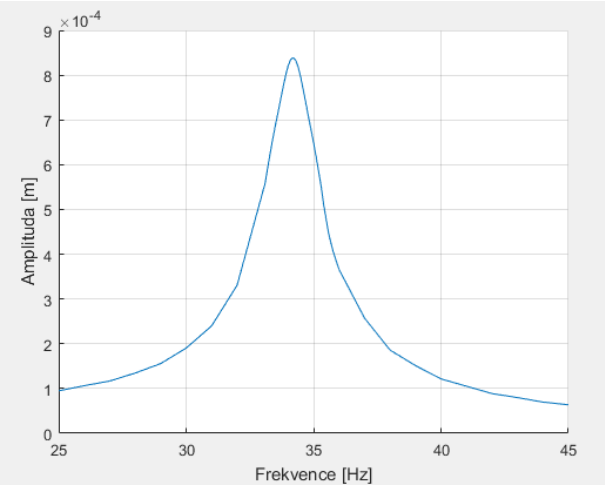


Obr. 20.: Ekvivalentní zapojení obvodového prvku se zápornou kapacitou.

Vhodným nastavením parametrů náhradního obvodu jsme schopni na konkrétní frekvenci dosáhnout vynulování imaginární složky komplexní impedance piezoelektrického elementu a dosáhnout optimálního tlumení. Tato situace odpovídá zkratu výstupních svorek měniče. Sériovou kombinací NC a rezistoru s odporem R vhodné velikosti dosáhneme maximálního tlumení.

6.2 Simulace tlumení se zátěží R NC

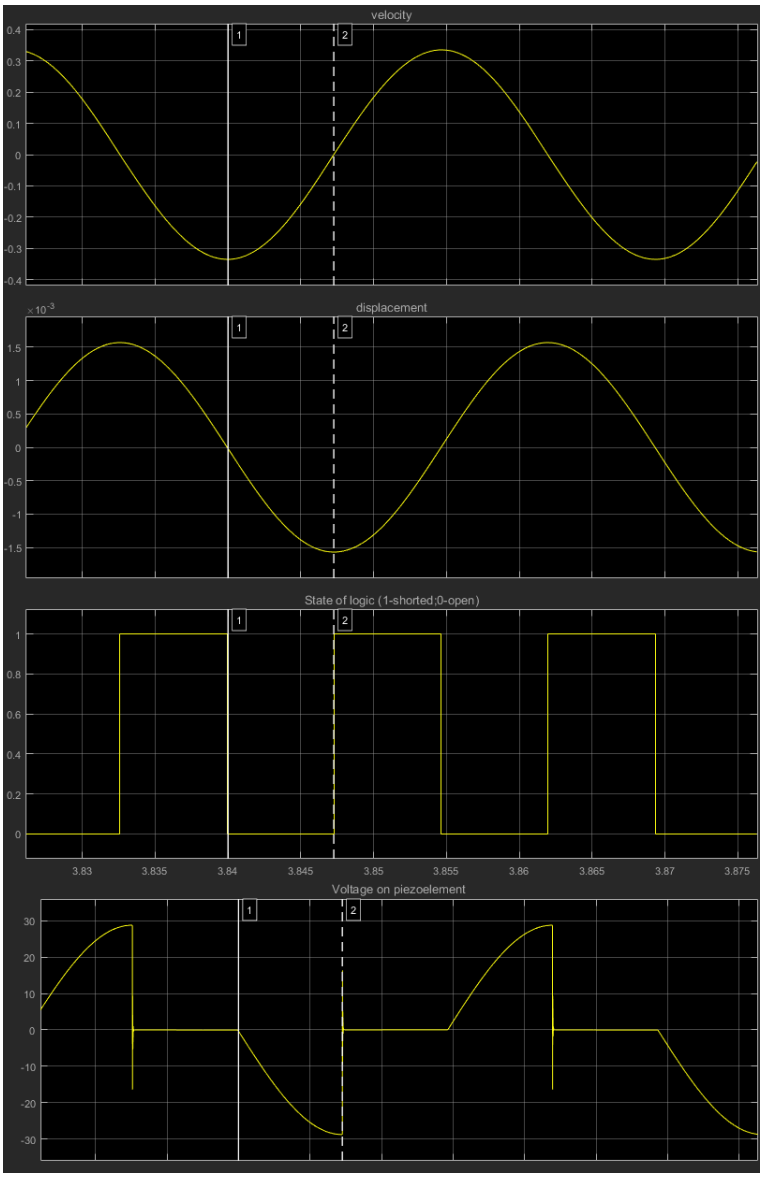
Pro simulaci je nutné volit vhodné hodnoty jednotlivých komponent obvodu NC, aby nedošlo k ztrátě stability. Schopnost tlumení se zvyšuje s hodnotami blížícími se mezi stability, pro sadu hodnot jsme získali následující výsledky viz Obr. 21.



Obr. 21.: Frekvenční charakteristika naladěného R NC obvodu

6.3 Model SSD tlumení

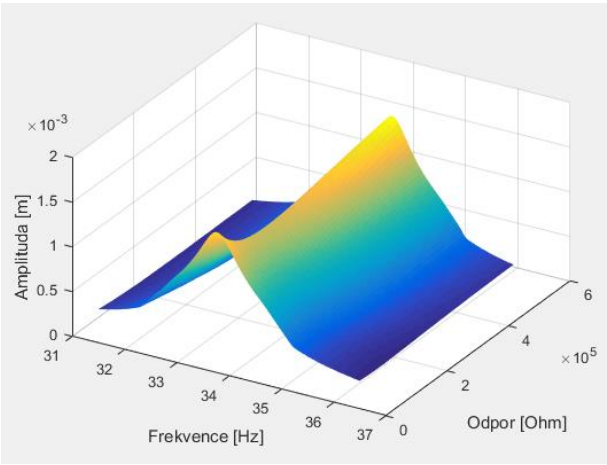
V minulé kapitole 5.2 jsme pozorovali změnu vlastní frekvence systému v závislosti na použité rezistivní zátěži, kdy docházelo k změně efektivní tuhosti systému, vyšší tuhost v zapojení naprázdno a nižší (vlastní) ve stavu nakrátko. Této vlastnosti se pokusíme využít při simulaci SSD techniky podle [28], kdy budeme systém spínat podle stavu, ve kterém se nachází. Specificky, když se systém pohybuje od rovnovážné polohy, bude zátěž odepnuta, takže systém bude tuhý proti změně polohy a na piezoelementu se s vychýlením navýší napětí. Při dosažení maxima amplitudy sepneme, rychle zmaříme energii naakumulovanou piezoelektrickým členem, snížíme efektivní tuhost systému, takže klesne dostupná potenciální energie kmitu při návratu z maximální polohy (viz Obr. 22.).



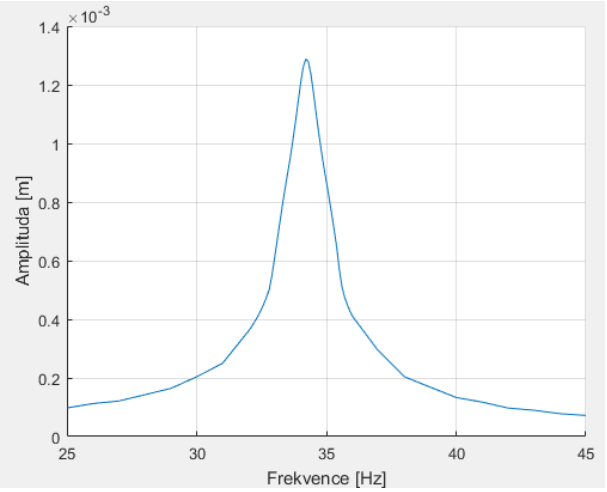
Obr. 22.: Logika spínání u SSD techniky zobrazená na časovém průběhu veličin, sestupně: rychlost, poloha, stav, napětí.

6.4 Simulace SSD tlumení

Podobně jako u rezistivní zátěže i u spínané rezistivní zátěže pozorujeme sedlovitý tvar (Obr. 23.) amplitudy v závislosti na spínané hodnotě rezistivní zátěže. Byla nalezena optimální hodnota spínané zátěže $R_{\text{optimální}}$ = 105 kΩ. Je zřejmé, že účinnost této techniky významně závisí na synchronizaci spínače zátěže a průběhu mechanických kmitů, a tedy i průběhu elektrického napětí na výstupu piezoelektrického elementu.



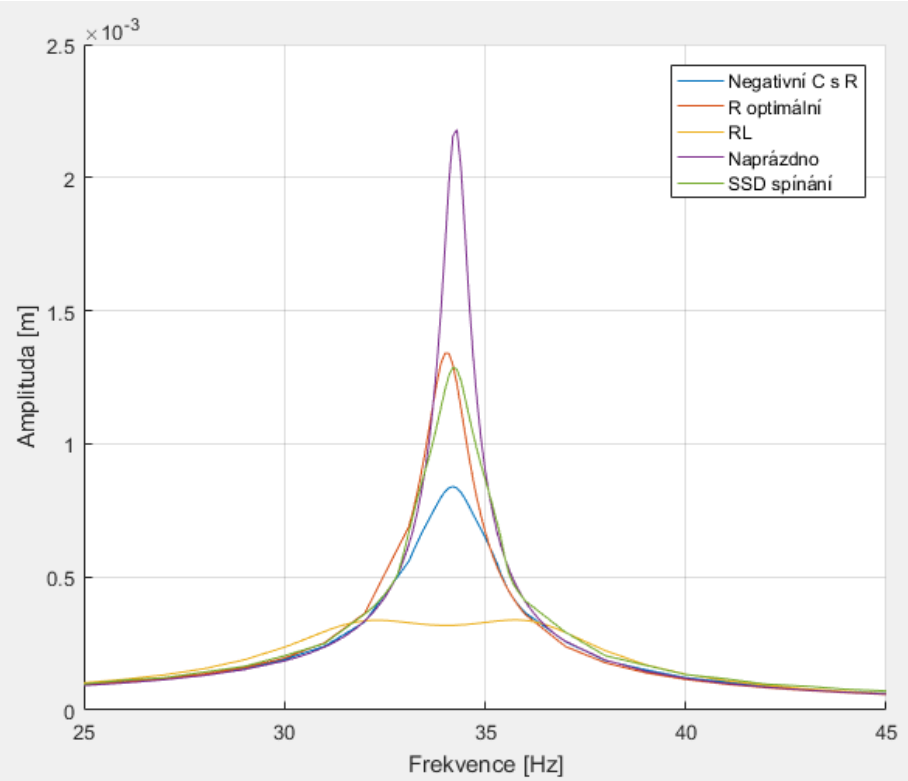
Obr. 23.: Závislost amplitudy na spínané zátěži v daném rozsahu frekvence



Obr. 24.: Frekvenční charakteristika pro optimální R spínání.

7. Porovnání simulovaných metod tlumení

Srovnávané simulace byly provedeny s konstantním harmonickým buzením pro každou zkoumanou frekvenci. V okolí rezonanční frekvence mechanického systému bylo zvoleno jemnější dělení na frekvenční ose. Výsledky simulací byly pro přehledné srovnání vloženy do jednoho grafu viz Obr. 26.



Obr. 25.: Srovnání frekvenčních charakteristik jednotlivých metod tlumění.

Amplituda kmitů nosníku se oproti kmitům elektricky nezatíženého nosníku nejvíce snížila na rezonanční frekvenci v případě optimálně naladěné zátěže RL.

Výrazného potlačení kmitů se dařilo dosáhnout dále v případě méně složitě realizovatelného semi-aktivního tlumení s negativní kapacitou a sériovým odporem.

Podobné výsledky lze pozorovat v případě zátěže s optimální hodnotou rezistivity, a to jak v případě kontinuálního, tak i v případě spínaného provedení tlumení. Ve srovnání s [28] bylo námi simulované potlačení s využitím SSD techniky mírně účinnější než optimální kontinuální zátěž.

8. Návrhy zapojení

8.0 Návrh přípravku SSDNC s jednoduchou detekcí stavu

Na základě se zkušeností s poměrně obtížnou simulací syntetických impedancí provozovaných na mezi stability pro dosažení optimálního tlumení se jeví jako logické přejít do přípravy experimentů. U jednoduchých zátěží se dá očekávat shoda experimentálních výsledků a simulací. Jako první bylo přistoupeno k přípravě podkladů pro výrobu experimentálního modulu pro demonstraci spínané zátěže s rezistorem a negativní kapacitou. Pro synchronní spínání je potřeba zajistit detekci stavu systému v reálném čase. Levným a jednoduchým způsobem detekci řeší *Wei Tang et. al.* [32], kteří realizují SSDNC na základě sledování průběhu napětí přímo na elektrickém výstupu tlumeného piezoelektrického měniče. Podle podkladů v jejich práci byl navržen experimentální přípravek a připraveny podklady pro jeho výrobu. Modifikovaný přípravek je svými parametry vhodný pro tlumení prvku MIDE V21BL.

Obsahuje následující obvodové části (Obr.: 26.):

Svorkovnice PZT obsahuje pružinové svorky pro připojení piezoelektrického bimorfního plátku přes vhodný propojovací kabel v jednoduchém, sériovém i paralelním zapojení.

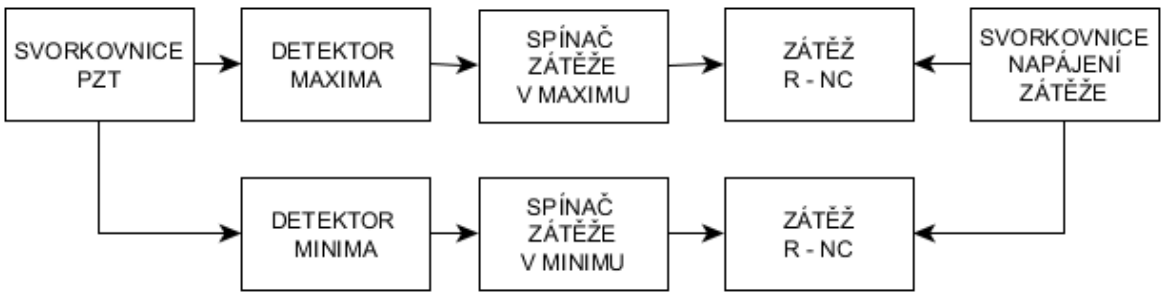
Detektor maxima napětí generovaného piezoelektrickou strukturou zajišťuje sepnutí příslušného spínače zátěže těsně po dosažení kladného maxima a rozepnutí po ukončení přechodného děje na zátěži.

Detektor minima napětí generovaného piezoelektrickou strukturou zajišťuje sepnutí příslušného spínače zátěže těsně po dosažení záporného minima napětí a rozepnutí po ukončení přechodného děje na zátěži.

Spínač zátěže v maximu a **Spínač zátěže v minimu** jsou tranzistorové spínače zátěže řízené detektory.

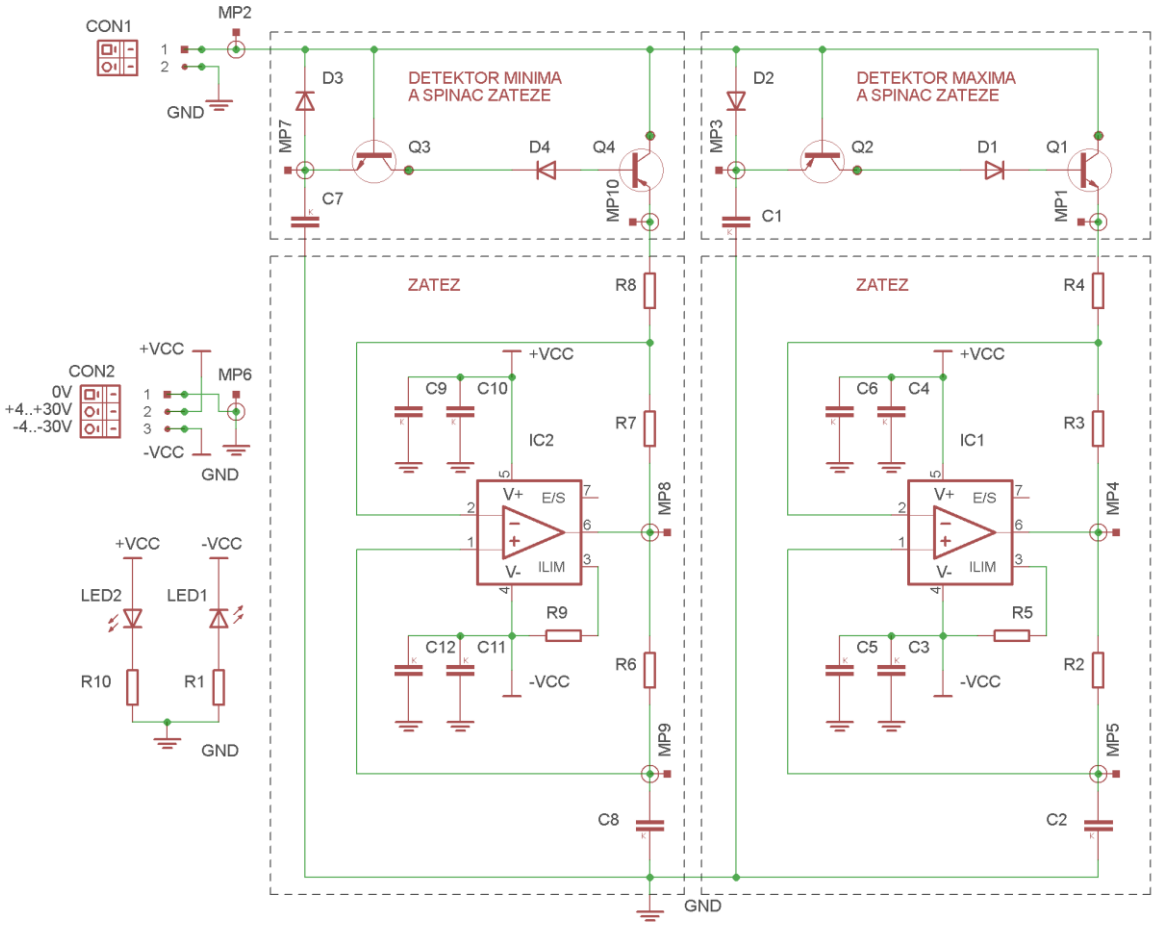
Zátěž R-NC je dvojice obvodů pro semi-aktivní tlumení kmitů piezoelektrického nosníku zvlášť pro každou půlvlnu signálu. Každá dílčí zátěž obsahuje rezistor a obvod pro syntézu negativní kapacity. Použitý operační zesilovač svým rozsahem napájecího napětí umožňuje pracovat v saturačním i lineárním režimu.

Svorkovnice napájení je určena pro připojení napájecího napětí ze zdroje stejnosměrného symetrického napětí do ±30 V pro napájení operačního zesilovače.



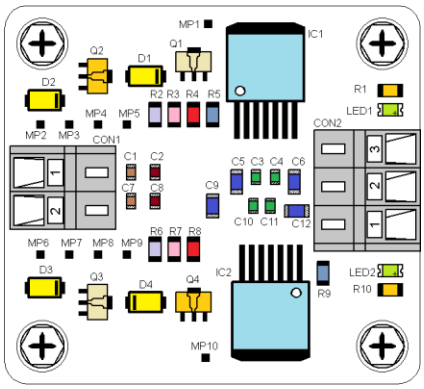
Obr. 26.: Blokové schéma experimentálního přípravku SSDNC s jednoduchou detekcí stavu.

Činnost obvodu je důkladně popsána v citované literatuře, v navrženém zapojení (Obr. 27.) byly nahrazeny odlišnými zejména operační zesilovače IC1 a IC2 pro syntézu záporné kapacity s ohledem na maximální velikost pracovního napětí piezoelektrického měniče.



Obr. 27.: Obvodové schéma experimentálního přípravku SSDNC.

Deska plošných spojů byla navržena pro použití součástek pro povrchovou montáž osazených shora desky Obr. 28. Skrz desku se připájí pouze konektory CON1,2 a případně měřicí body (MP1 až MP10).



Obr. 28.: Strana součástek desky přípravku

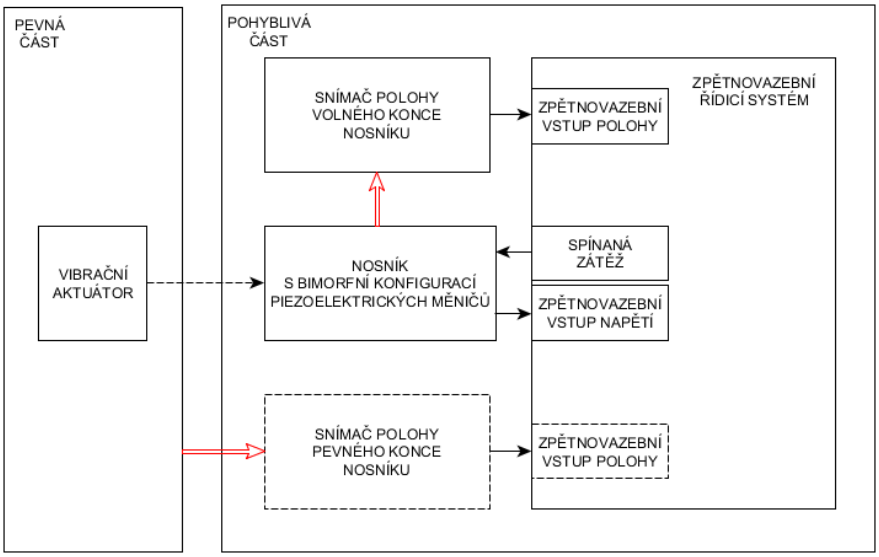
Použité součástky:

IC1, IC2 : OPA547F (TO-263)
D1, D2, D3, D4 : ES1B (SMA)
Q1, Q3 : BCX54 (SOT89)
Q2, Q4 : BCX51 (SOT89)
C3, C4, C10, C11 : CK 100nF/50V (C0805)
C5, C6, C9, C12 : CK 10uF/50V (C1210)
R1, R10 : 10k (C1206)
LED1, LED2 : HSMG-C150 (LED1206)
CON1,CON2 : WAGO236-40x
R5, R9 : 0R (R1206) funkce bez omezení výst. proudu OPA547

C1=C7,C2=C8,R2=R6,R3=R7,R4=R8 nastavené podle konfigurace piezoelektrického měniče s ohledem na vlastní kapacitu měniče C_p, velikosti detekčních kapacit C1, C7 podle vztahu cCN = - c2 × R2 / R3. Pro kapacitu C_p = 26 nF a paralelní zapojení PCT se hodnota C1 zvolí 10nF, C2 = 33nF.

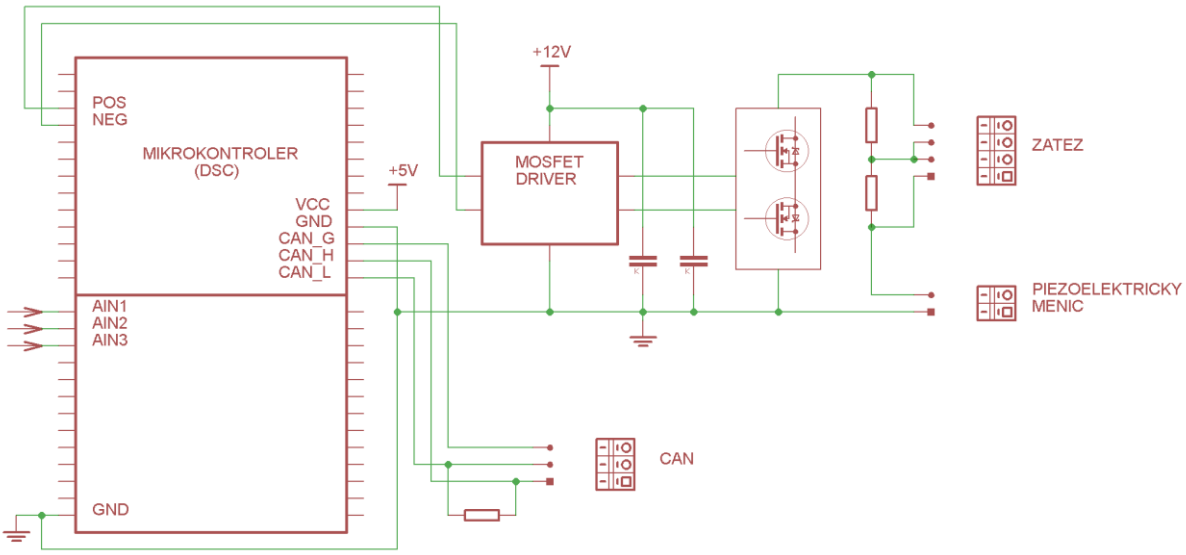
8.1 Návrh univerzálního systému SSD

Oproti přípravku, který je prezentován v předchozí podkapitole je stav systému identifikován složitějším způsobem, zpracován zpětnovazebním řídícím systémem a na základě vstupních veličin je spínána tlumící zátěž. Systém znázorněný v blokovém schématu Obr. 29. využívá pro tlumení první část bimorfního nosníku. Zpětnovazebním signálem je napětí měřené v druhé části bimorfního nosníku. Vzhledem k tomu, že není zaručený konstantní fázový posuv mezi mechanickou výchylkou volného konce nosníku a napětím na měřícím bimorfu pro různé frekvence buzení je žádoucí vybavit systém druhým vstupním kanálem pro měření výchylky volného konce nosníku. Pro kontrolu parametrů buzení je vhodné systém vybavit třetím vstupem – snímačem polohy pevného konce nosníku.



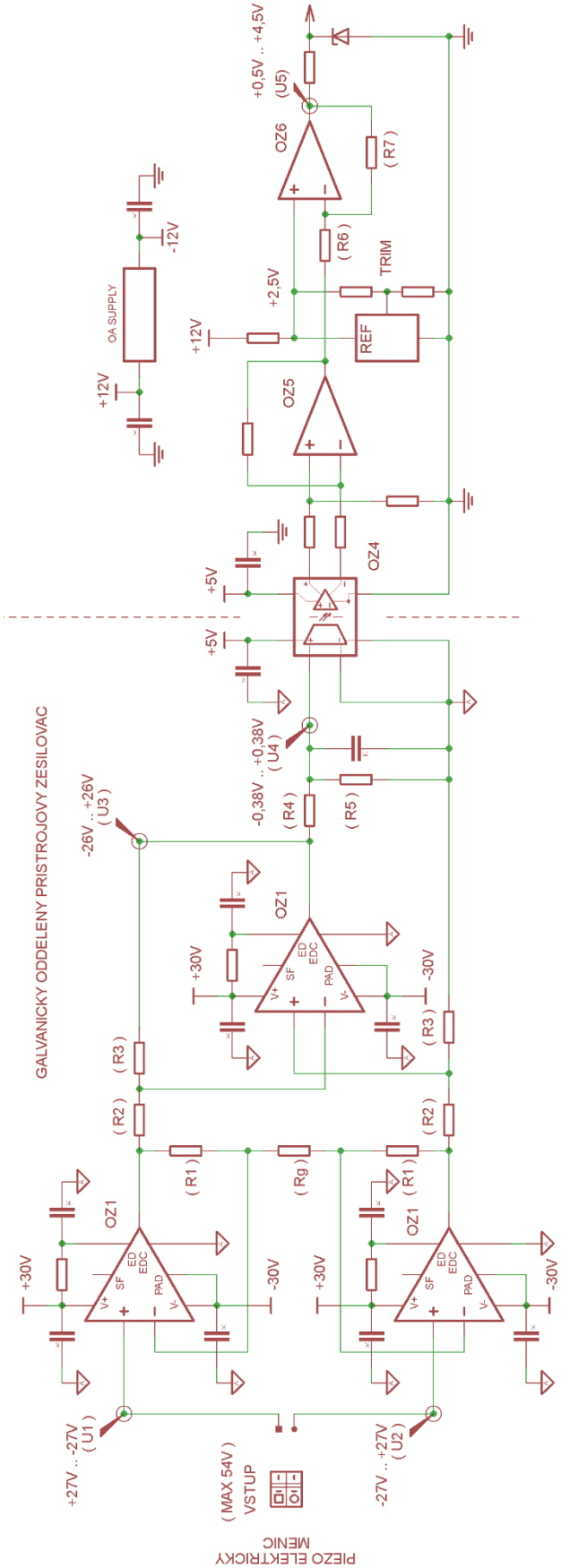
Obr. 29.: Blokové schéma univerzálního SSD přípravku.

Základ systému tvoří mikrokontroler s výstupními obvody pro spínání zátěže v obou polaritách napětí z piezoelektrického měniče. Spínač zátěže je tvořen tranzistory MOSFET a vhodnými budiči. Mikrokontroler Obr. 30. je součástí modulární řady, která umožňuje změnou modulu v kompatibilní patici jednoduše zvýšit výpočetní výkon mikroprocesorového jádra a výkon potřebných periferních obvodů v případě, že přestanou vyhovovat parametry nižší verze pro konkrétní řešení. Zátěž se buď instaluje na desku plošného spoje nebo se připojí přes svorkovnici.



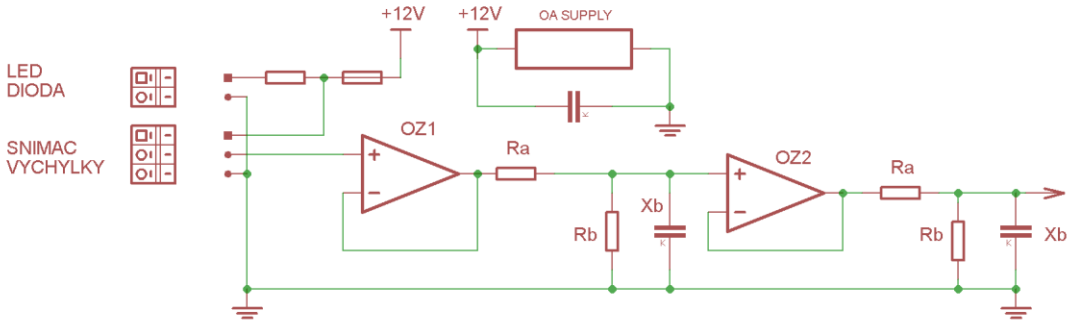
Obr. 30 Řídící a spínací obvody

Zpětnovazební signály se připojí do vstupu analogově digitálního převodníku. V případě, že se u bimorfní konfigurace využije jeden piezoelektrický měnič pro zátěž a druhý pro měření, je možno využít pro zpětnou vazbu určující okamžik sepnutí a rozepnutí obvodu zátěže druhý piezoelektrický měnič. Aby nedocházelo k ovlivňování elektrických parametrů piezoelektrického měniče je použit vstup s přístrojovým operačním zesilovačem Obr. 31., který je schopen pracovat v lineárním režimu v celém napěťovém rozsahu měniče. Pro potlačení rušivých vlivů je navrženo galvanické oddělení v napájecích i signálových obvodových částech.



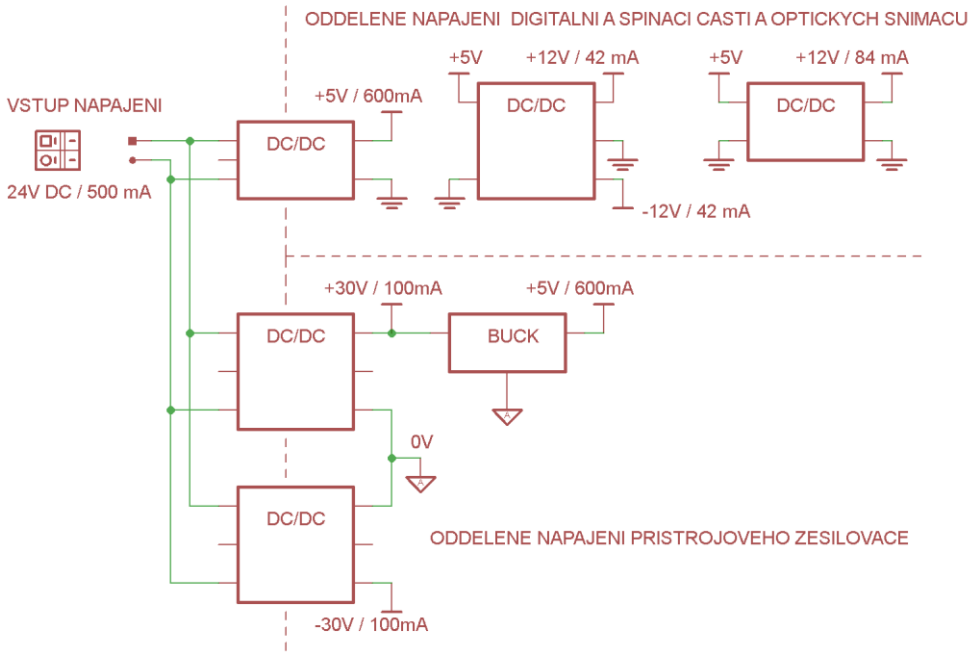
Obr. 31.: Analogový vstup pro měření napětí piezoelektrického měniče

Dalším zpětnovazební vstup je možno použít pro připojení snímače výchylky Obr. 32. volného konce nosníku z rovnovážné polohy. Vzhledem k nižším nárokům z hlediska vzájemného ovlivňování obvodů je tento vstup neoddělený a využívá vstupní napěťový rozsah analogově digitálního převodníku použitého mikrokonroleru bez předchozího zesilování signálu, možné je pouze zeslabení. V návrhu se počítá se situací, že například z důvodu vysoké hmotnosti komerčně dostupného snímače polohy bude potřeba realizovat vlastní snímač. Proto je připraveno napájení snímače a výstup pro zdroj světla pro optické snímání výchylky.



Obr. 32.: Analogové vstupy pro snímače výchylky.

Na podobném principu jako v předchozím případě je možno systém rozšířit o měření vzájemné polohy pevné části vibračního aktuátoru a pevné části rozkmitávaného nosníku.



Obr. 33.: Napájecí obvody.

Napájecí obvody Obr. 33. využívají jednotného napájení ze stejnosměrného zdroje 24 V / 1 A. Jsou řešeny jednak s využitím spínaných zdrojů (DC/DC převodníků) v provedení s galvanickým oddělením výstupu a jednak s využitím neoddělených spínaných zdrojů snižujících napětí (BUCK).

9. Závěr

Úvodem práce je obecný popis piezoelektrického jevu, který nám dává představu o vlastnostech použitého piezoelektrického materiálu při tlumení. Byla provedena rešerše publikovaných metod tlumení, kde jsou popsány typy tlumících zátěží. Na základě rešerše byly posouzeny vlastnosti jednotlivých metod tlumení, jejich výhody a nevýhody. Byl proveden odhad složitosti realizace a odhadnut další vývoj metod semi-aktivního tlumení. V budoucnu se dá očekávat vývoj adaptivních metod tlumení založených na výkonné spínačové technice.

Analýza tlumících schopností jednotlivých metod tlumení byla provedena na teoretickém modelu založeném na parametrech Midé V21BL. Při modelování se vycházelo z redukovaného analytického modelu popisující dynamiku vetknutého nosníku s piezoelektrickou vrstvou. Byly sestaveny modely založené na jednoduše realizovatelných principech pasivního tlumení, dále lineární model semi-aktivního tlumení využívající syntetickou negativní kapacitu a nelineární model spínání odporové zátěže.

Výsledky získané srovnáním metod pasivního a semi-aktivního tlumení byly v souladu s výsledky publikovanými v prostudované literatuře. Jako účinná a použitelná byla vyhodnocena metoda semi-aktivního tlumení se syntetizovanou negativní kapacitou. Pro ověření získaných výsledků a další zkoumání této zátěže v kombinaci se synchronním spínáním byl proveden návrh testovacího přípravku, který je připraven na realizaci a vyhodnocení.

Vzhledem k odhadovanému vývoji perspektivních spínaných zátěží byl proveden úvodní návrh zpětnovazebních obvodů, na které navazuje řídící systém schopný dynamicky spínat vhodnou zátěž. Uvedený ideový návrh synchronního spínače je pouze koncepční. Obsahuje zjednodušená schémata bez uvedení konkrétních typů součástek a výpočtů hodnot součástek. Na jeho základě je možno zvážit konkrétní konfiguraci zpětnovazebního řešení a systém realizovat. Prostor pro další rozšíření koncepčního návrhu je zejména v oblasti spínače zátěže využitím modulačních technik (obousměrné modulované spínání zátěže). Další prostor pro rozvíjení je v oblasti návrhu jednoduchého a z hlediska hmotnosti lehkého snímače výchylky kmitajícího nosníku.

Citace

[1] CURIE, J., CURIE, P. Bulletin de la Société minéralogique de France. *Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinées* [online]. 1880, vol. 3, p. 90–93. Available from: https://www.persee.fr/doc/bulmi_0150-9640_1880_num_3_4_1564.

[2] GRAF, R. F. Modern Dictionary of Electronics, 7th Ed. *The term crystal oscillator refers to the circuit, not the resonator* [online]. 1999, vol. 7, p. 162–163. Available from https://books.google.cz/books?id=AYEKAQAAQBAJ&hl=cs. *ISBN 978-0750698665*.

[3] HOROWITZ, P., WINFIELD, H. Cambridge University Press. *The Art of Electronics Second Edition* [online]. 1989, vol. 2, p. 300. Available from https://www.academia.edu/23116033/The_Art_Of_Electronics_2nd_Edition. *ISBN* 0-521-37095-7.

[4] Byrappa, K.; Yoshimura, M. *Handbook of Hydrothermal Technology A Technology for Crystal Growth and Materials Processing*, 1st ed.; DOI: 978-0-8155-1445-9; William Andrew, 2001; pp 167–314. https://www.sciencedirect.com/book/9780815514459/handbook-of-hydrothermal-technology.

[5] Uchino, K. *The development of piezoelectric materials and the new perspective* [online]; DOI: 10.1533/9781845699758.1; Elsevier Ltd., 2010; pp 17–43. https://www.researchgate.net/publication/284511126_The_development_of_piezoelectric_materials_and_the_new_perspective.

[6] DAHIYA, R. S., VALLE, M. *Physics, and Applications* [online]. 1st ed. Springer, Dordrecht, 1995 Available from: https://link.springer.com/content/pdf/bbm%3A978-94-007-0579-1%2F1.pdf.

[7] IEEE Standard on Piezoelectricity, in *ANSI/IEEE Std 176-1987* , vol., no., pp.0_1-, 1988, doi: 10.1109/IEEESTD.1988.79638. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/26560.

[8] SAPPATI, K. K., BHADRA, S. Sensors (Basel). *Piezoelectric Polymer and Paper Substrates: A Review* [online]. 2018, vol. 18. DOI: 10.3390/s18113605. Available from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6263872/.

[9] Uchino, K. (2010). *Advanced Piezoelectric Materials - Science and Technology - 1.2.4.2 MEMS Application*. (pp. 21-41). Woodhead Publishing. Available from: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0094K2IO/advanced-piezoelectric/thin-films-mems-application

[10] UCHINO, K. *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology* [online]. Second Editionth ed. Woodhead Publishing, 2017; p. 77-81. Available from: https://www.elsevier.com/books/advanced-piezoelectric-materials/uchino/978-0-08-101254-3. ISBN 9780081012550.

[11] Ransley, J. Piezoelectric Materials: Understanding the Standards, 2014. Comsol. https://www.comsol.com/ (accessed May 07, 2021).

[12] TZOU, H. S., NATORI, M. C. *PIEZOELECTRIC MATERIALS AND CONTINUA* [online]. Elsevier, 2001 DOI:10.1006/rwvb.2001.0076.[cited 07 May 2021]. Available from: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004QROU4/encyclopedia-vibration/linear-piezoelectricity.

[13] Yang, B. (2001). *Encyclopedia of Vibration, Volumes 1-3 - Fundamentals*. (pp. 1290-1304). Academic Press, 2001. DOI: 10.1006/rwvb.2001.0112. Available from: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004QS0A2/encyclopedia-vibration/theory-vibration-fundamentals.

[14] KAPAT, K., SHUBHRA, Q. T. H., ZHOU, M., LEEUWENBURGH, S. Advanced Functional Materials. *Piezoelectric Nano-Biomaterials for Biomedicine and Tissue Regeneration* [online]. 2020, vol. 30, no. 44 ;DOI: 10.1002/adfm.201909045. Available from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.201909045.

[15] GAZZOLA, F. *Brief History of Suspension Bridges* [online]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. Available from: https://www.researchgate.net/publication/295258027_Brief_History_of_Suspension_Bridges. ISBN 10.1007/978-3-319-15434-3_1.

[16] Ewins, D. J. (2001). *Encyclopedia of Vibration, Volumes 1-3 - Modal Analysis, Experimental - Basic Principles* (pp. 1290-1304). Academic Press, 2001. DOI: 10.1006/rwvb.2001.0026. Available from: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004QRGN1/encyclopedia-vibration/modal-analysis-basic-principles.

[17] LYAN, I. P, et al. On the issue of energy consumption of vibration technological machines. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, p. 8. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012055. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/747/1/012055/pdf.

[18] Wikipedia contributors. Tuned mass damper. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tuned_mass_damper&oldid=1016886897 (accessed May 08, 2021), Date of last revision: 9 April 2021. Page Version ID: 1016886897.

[19] LÁN, R.; HADAŠ, Z. *Modelování a verifikace piezoelektrického generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015, str. 16.

[20] WANG, S., RONG, W., WANG, L., XIEA, H., SUN, L., K. MILLSB, J. Mechanical Systems and Signal Processing. *A survey of piezoelectric actuators with long working stroke in recent years: Classifications, principles, connections and distinctions* [online]. 2019, vol. 123 [cited 2021-05-07], p. 591–605. Available from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019300457#f0010. ISSN 0888-3270.

[21] Robert L. Forward, *Electronic damping of vibrations in optical structures*, Appl. Opt. 18, 690-697 (1979). Available from: https://doi.org/10.1364/AO.18.000690.

[22] Dosch JJ, Inman DJ, Garcia E. A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1992;3(1):166-185. doi:10.1177/1045389X9200300109

[23] Aktas, Kerim & Esen, İsmail. (2020). *State-Space Modeling and Active Vibration Control of Smart Flexible Cantilever Beam with the Use of Finite Element Method*. 10. 6549-6556. 10.48084/etasr.3949.

[24] Marakakis K, Tairidis GK, Koutsianitis P and Stavroulakis GE (2019) *Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review*. Front. Built Environ. 5:64. doi: 10.3389/fbuil.2019.00064.

[25] Ondřej Rubeš; Martin Brablc; Zdeněk Hadaš. *Verified nonlinear model of piezoelectric energy harvester*. MATEC Web Conf., 211 (2018) 05005. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201821105005.

[26] Wikipedia contributors. Euler-Bernoulli beam theory. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory (accessed May 08, 2021), Date of last revision: 7 May 2021.

[27] Dell'isola, Francesco & Maurini, Corrado & Porfiri, Maurizio. (2004). *Passive damping of beam vibrations through distributed electric networks and piezoelectric transducers: Prototype design and experimental validation*. Smart Materials and Structures. DOI: 13. 10.1088/0964-1726/13/2/008. Available from: https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/2/008.

[28] Clark W.W. *Vibration Control with State-Switched Piezoelectric Materials*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2000;11(4):263-271. doi:10.1106/18CE-77K4-DYMG-RKBB.

[29] Hagood N. W.; von Flotow A. (1991) Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electric networks J. Sound Vib. vol. 146, p. 243–68. ISSN 0022-460X, https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90762-9.

[30] Cheng, Jun. (2011). *Semi-active vibration suppression by a novel synchronized switch circuit with negative capacitance*. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 37. 291-308. 10.3233/JAE-2011-1402. Available from: https://www.researchgate.net/publication/264052790.

[31] Lawrence R. Corr; William W. Clark. (2002) *Smart Mater. Struct. Comparison of low-frequency piezoelectric switching shunt techniques for structural damping. Published 24 May 2002. Published under licence by IOP Publishing Ltd* **11** 370. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/11/3/307.

[32] Tang, Wei; Wang, Li-bo;Ren, Yu-mei;Bin Bao;Cao, Jing-jun. (2018*). Design and experimental analysis of self-sensing SSDNC technique for semi-active vibration control.* Published under licence by IOP Publishing. DOI: 10.1088/1361-665x/aad0b9. Available from: http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/aad0b9.

Seznam obrázků

Obr. 1 .: Přímý piezoelektrický jev a nepřímý piezoelektrický jev. 11
Obr. 2.: Polarizace čtyřstěnu křemene. 11
Obr. 3.: Polarizace buňky perovskitu. 11
Obr. 4.: Módy zátěže piezomateriálu, převzato z [20] 13
Obr. 5.: První 4 módy na vetknutém nosníku, převzato z [26]. 17
Obr. 6.: Přehled obvodů zátěže využívaných k tlumení vibrací, převzato z [24]. Konstantin Marakakis et al. 20
Obr. 7.: Tlumení dlouhého vetknutého nosníku pomocí větveného zapojení paralelních RL obvodů, převzato z [27]. Francesco Dell'issola. 21
Obr. 8.: Zapojení SSA, převzato z [22] 22
Obr. 9.: Piezoelektrický VEH a redukce na systém s jedním stupněm volnosti, převzato z [25]. 24
Obr. 10.: Zpětnovazební blokové schéma v simulinku. 25
Obr. 11.: 3D Graf amplitud pro změnu R napříč buzenou frekvencí. 26
Obr. 12.: Graf závislosti mezi primární amplitudou a volenou zátěží R 26
Obr. 13.: Graf závislosti mezi primární frekvencí a odporem. 27
Obr. 14.: Frekvenční charakteristika zapojení: naprázdno, nakrátko a optimální R. . 27
Obr. 15.: Vliv vazebního koeficientu na fázový posuv mezi rychlostí mech. části a napětí na piezomateriálu. 28
Obr. 16.: Vliv vazebního koeficientu na vlastní frekvenci systému při chodu naprázdno. 28
Obr. 17.: Analogie hodnot ekvivalentního zapojení a zapojení pomocí Simulink > Simscape. 28
Obr. 18.: Vliv změny odporu na amplitudu napříč frekvencemi při naladěné L 29
Obr. 19.: Frekvenční charakteristika naladěného RL obvodu 29
Obr. 20.: Ekvivalentní zapojení obvodového prvku se zápornou kapacitou. 30
Obr. 21.: Frekvenční charakteristika naladěného R NC obvodu 30
Obr. 22.: Logika spínání u SSD techniky zobrazená na časovém průběhu veličin, sestupně: rychlost, poloha, stav, napětí. 31
Obr. 23.: Závislost amplitudy na spínané zátěži v daném rozsahu frekvence 32
Obr. 24.: Frekvenční charakteristika pro optimální R spínání. 32
Obr. 25.: Srovnání frekvenčních charakteristik jednotlivých metod tlumění. 33
Obr. 26.: Blokové schéma experimentálního přípravku SSDNC s jednoduchou detekcí stavu 34
Obr. 27.: Obvodové schéma experimentálního přípravku SSDNC. 35
Obr. 28.: Strana součástek desky přípravku 35
Obr. 29.: Blokové schéma univerzálního SSD přípravku. 36
Obr. 30 Řídící a spínací obvody 37
Obr. 31.: Analogový vstup pro měření napětí piezoelektrického měniče 38
Obr. 32.: Analogové vstupy pro snímače výchylky. 39
Obr. 33.: Napájecí obvody. 39

Seznam symbolů

A	stavová matice
B	matice vstupů
C	matice výstupů
D	dopředná matice
x	stavový vektor
y	výstupní vektor
u	vektor vstupů
T	mechanické napětí (N/m²)
S	deformace (-)
d	piezoelektrická konstanta přetvoření (C/N)
e	piezoelektrický koeficient (C/m²)
s^E	elastická poddajnostní konstanta (m²/N) při konst. E
c^E	elastická tuhostní konstanta (N/m²) při konst. E
E	elektrické pole (V/m)
D	elektrická indukce (C/m²)
ε^S	dielektrická konstanta (F/m) při konst. S
ε^T	dielektrická konstanta (F/m) při konst. T
g	piezoelektrická nábojová konstanta (Vm/N)
d	piezoelektrická deformační konstanta
σ	mechanické napětí (Pa)
s	tenzor poddajnost (m/N)
c	tenzor tuhosti (N/m)
z	poloha hmotného bodu (m)
m	redukovaná hmota (Kg)
k	redukovaná tuhost (N/m)
d	mechanické tlumení (Ns/m)
y''	akcelerace buzení (m/s²)
v	napětí (V)
i	proud (A)
f	frekvence (Hz)
$f_{\text{vlastní}}$	frekvence vlastních kmitů (Hz)
f_{o}	frekvence vlastních kmitů (Hz)
f_{max}	frekvence kmitů blízkých rezonanci (Hz)
$f_{\text{budící}}$	frekvence buzení (Hz)
t	čas (s)
C_{p}	kapacita piezoelektrické vrstvy (F)
Θ	piezoelektrický vazební koeficient (N/V)
Z	impedance zátěže (Ω)
ε_{r}	relativní permitivita (F/m)
ε_{m}	permitivita materiálu (F/m)
ε_{o}	permitivita vakua (F/m)
Q_{m}	faktor kvality (-)
L	indukčnost (H)
R	odpor (Ω)
C	kapacita (F)
T_c	Curieho teplota (°C)
N	převodní poměr (-)