



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

INTEGRACE SMART MATERIÁLU DO MECHANICKÉ KONSTRUKCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Běhal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Josef Běhal
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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 diplomové práce:

Integrace SMART materiálu do mechanické konstrukce

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Snímání a monitorování vibrací je součástí většiny kritických aplikací nejen s točivými stroji. Úkolem práce je analyzovat řešení snímání mechanických vibrací s využitím SMART materiálu jako jsou piezoelektrické vrstvy či piezokeramické kompozitní materiály. Dále také analyzovat a vyhodnotit chování těchto vrstev a navrhnout vhodný příklad aplikace SMART materiálu pro potřeby snímání mechanických vibrací v technické soustavě.

Cíle diplomové práce:

- 1) Analýza současného stavu techniky v oblasti snímání pomocí piezoelektrických vrstev,
- 2) Analýzy citlivosti elektrického signálu na mechanické přetvoření u vybraných piezoelektrických vrstev,
- 3) Vytvoření modelu piezoelektrické vrstvy pro potřeby návrhu technické soustavy s integrovanou SMART snímací vrstvou,
- 4) Návrh technické soustavy s integrovanými SMART vrstvami pro snímání vibrací.

Seznam doporučené literatury:

VIVES, Antonio Arnau, ed., 2008. Piezoelectric Transducers and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

JANOCHA, Hartmut, 2007. Adaptronics and Smart Structures [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

SOOBUM LEE a Byeng D YOUN, 2011. A new piezoelectric energy harvesting design concept: multimodal energy harvesting skin. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control [online]. 58(3), 629–645.

POZZI, Michele, Shijun GUO a Meiling ZHU, 2012. Harvesting energy from the dynamic deformation of an aircraft wing under gust loading. In: Tribikram KUNDU, ed. Proceedings of the SPIE Health Monitoring of Structural and Biological Systems 8348: Smart Structures/NDE 2012. pp834831–1/11.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá modelováním piezoelektrického kompozitního materiálu pomocí MKP (metoda konečných prvků). Práce se dá rozdělit do tří částí. V první části je provedena rešeršní studie zaměřující se na možnosti využití piezoelektrických vrstev pro snímání mechanických veličin. Druhá část se zabývá homogenizací MFC (macro fibre composite) vrstvy. Materiálové a piezoelektrické charakteristiky jsou získány modelováním různých zátěžných stavů elementární strukturální buňky a následně jsou ověřeny srovnáním s experimentálními daty. Ve třetí části je prezentován návrh zařízení umožňujícího simulovat buzení rotoru rotující nevyváhou. Jsou určena místa vhodná pro aplikaci MFC snímačů a pomocí MKP je modelována jejich odezva na buzení soustavy. Na závěr je vyhodnocena vhodnost použití MFC pro snímání vibrací na daném zařízení.

Klíčová slova

SMART součást, piezoelektrické kompozity, MFC, MKP, rotorstnad

Abstract

This diploma thesis deals with the modelling of the piezoelectric composite material using the finite element method. The thesis is divided into three parts. Research study is done in the first part. It focuses on the possibility of use of the piezoelectric layers as sensors. The second part concerns the homogenization of MFC (macro fiber composite). Material and piezoelectric parameters are obtained by modelling elementary structural cell under different loading conditions. Determined characteristics are verified with experimental data. The third part proposes the design of the experimental device, which allows the simulation of the rotor excitation by rotating unbalance. Excitation responses of MFCs placed in specific locations are calculated using FEA model of the device. The conclusion includes the description of the suitability to vibration measurement on the device.

Keywords

SMART component, piezoelectric composite, MFC, FEA, rotorstand

Bibliografická citace

BĚHAL, J. *Integrace SMART materiálu do mechanické konstrukce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Integrace SMART materiálu do mechanické konstrukce vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, 20. května 2019

.....
Bc. Josef Běhal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D. za vstřícný přístup a podněty k rozvíjení dílčích částí práce. Dále děkuji Ing. Petru Lošákovi, Ph.D. a Ing. Ondřeji Rubešovi za cenné rady v oblastech rotodynamiky a piezoelektrických materiálů.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přítelkyni za jejich podporu během studia.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Popis problémové situace	13
2.1	Formulace problému	13
2.2	Cíle práce	13
3	Systém podstatných veličin a volba metody řešení	14
4	Úvod do problematiky piezoelektrických materiálů	16
4.1	Mechanismus piezoelektrického jevu	16
4.2	Piezoelektrické konstanty	17
4.3	Konstitutivní vztahy piezoelektrických materiálů	18
4.4	Piezoelektrické materiály	19
5	Současný stav techniky v oblasti snímání mechanických veličin pomocí piezoelektrických vrstev.....	23
5.1	Měření přetvoření a zrychlení.....	23
5.2	Využití pro monitorování stavu struktury materiálu	24
5.3	Aktivní vrstvy v kompozitních materiálech	25
5.4	Shrnutí	27
6	Analýza citlivosti elektrického signálu u vybraných piezoelektrických vrstev	28
6.1	Naměřené hodnoty	30
6.2	Vyhodnocení měření	32
6.3	Určení tlumení soustavy.....	32
7	Homogenizace MFC vrstvy	34
7.1	Směšovací pravidlo.....	35
7.2	Model elementární buňky MFC	36
7.3	Ověření homogenizovaných materiálových charakteristik	43
8	Návrh technické soustavy s MFC snímači.....	49
8.1	Konstrukce.....	49
8.2	Modální analýza	50
8.3	Harmonická analýza	56
8.4	Výběr pozice pro umístění MFC snímačů.....	61
9	Závěr	66
10	Seznam použité literatury.....	68
11	Seznam obrázků.....	72

12	Seznam tabulek	74
13	Seznam vybraných symbolů	75
14	Seznam zkratek.....	76
15	Seznam příloh	77

1 Úvod

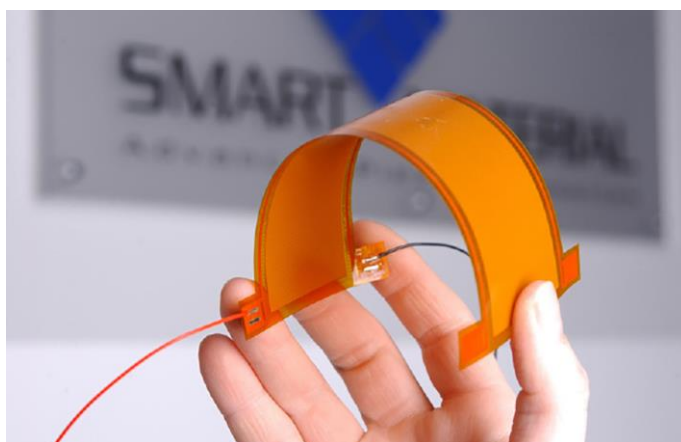
Jako SMART materiály lze souhrnně označovat takové materiály, které jsou schopné reagovat na změny ve svém okolí. To mohou být například změny teplot, tlaku nebo elektrického pole. Do této skupiny spadají i piezoelektrické materiály. Díky přímému piezoelektrickému jevu jsou schopny generovat elektrické napětí jako odezvu na mechanické přetvoření. Obrácený piezoelektrický jev vyvolává přetvoření materiálu jako reakci na přivedené elektrické napětí.

Využití piezoelektrický materiálů je v posledních letech věnována poměrně velká pozornost. Své uplatnění nacházejí při navrhování energeticky soběstačných zařízení, která získávají energii ze svého okolí pomocí tzv. energy harvesting a využívají se také v senzorech.

Lze předpokládat, že význam piezoelektrických materiálů bude v budoucnu růst. Postupná digitalizace výroby, rozšiřování metod monitorování stavu struktury součástí, nástup internetu věcí a průmyslu 4.0 si žádá levné snímače a senzory. Piezoelektrické vrstvy jsou vhodným kandidátem pro uspokojení této poptávky. Ať už jako součásti MEMS, integrované vrstvy v kompozitních materiálech nebo energeticky nezávislé snímače mohou sloužit k monitorování vibrací součástí. Na základě takto získaných dat je možné provádět jejich prediktivní údržbu, která probíhá na základě aktuálního stavu daného dílu.

Nejrozšířenějším piezokeramickým materiálem současnosti je pravděpodobně PZT (olovo-zirkonát-titanát). Nad ostatními vyniká velmi dobrým elektromechanickým couplingem, a přijatelnou cenou. Mezi jeho nevýhody lze zařadit zejména křehkost a malou poddajnost.

Hlavní nevýhody jednodílných PZT vrstev do velké míry odstraňuje MFC (macro fiber composite). Jedná se o kompozitní materiál vyvinutý na přelomu tisíciletí ve výzkumném centru NASA. Jeho struktura je tvořena PZT vlákny, měděnými dělenými elektrodami a epoxidovou matricí. Díky tomu MFC disponuje velmi dobrými piezoelektrickými vlastnostmi. Ve srovnání s jednodílnými PZT vrstvami je odolnější vůči porušení a také se lépe přizpůsobuje tvaru hostujícího povrchu.



Obr. 1.1 MFC vrstva [1]

V některých případech je třeba simulovat odezvu MFC vrstev. Je-li MFC součástí složitých konstrukcí, připadá v úvahu pouze metoda konečných prvků (MKP). Vytvářet výpočtový model piezoelektrického kompozitu včetně všech strukturních detailů by vedlo k neúměrné složitosti výpočtového modelu a je tedy vhodné MFC modelovat jako homogenní celek s příslušnými materiálovými charakteristikami.

V první části této práce byla provedena homogenizace MFC vrstvy a následně ověřena správnost získaných materiálových charakteristik s provedeným experimentem. V poslední části bylo navrženo zařízení simulující buzení rotoru rotující nevývahou a pomocí MKP simulována odezva homogenizovaných MFC vrstev na buzení soustavy.

2 Popis problémové situace

Jak již bylo řečeno v úvodu MFC, má potenciál k tomu být využíván jako levnější alternativa ke stávajícím sensorům. Integrací piezoelektrických vrstev do struktury kompozitu lze vytvářet chytré součásti, které jsou samy o sobě schopné monitorovat svůj stav. Nejprve je tedy třeba provést rešerši zjišťující dosavadní využití MFC pro tyto účely.

V některých případech je třeba simulovat odezvu MFC vrstev na mechanické buzení. Zejména v případě složitějších struktur je za tímto účelem nutné využít MKP. Kvůli snížení výpočtové náročnosti je vhodné modelovat MFC jako homogenní materiál a je tedy nutné znát ekvivalentní materiálové charakteristiky tohoto piezoelektrického kompozitu. V technickém listu MFC [2] nejsou uvedeny všechny potřebné charakteristiky, a proto je nutné provést jejich výpočet. Správnost získaných mat. parametrů je následně nutné ověřit srovnáním experimentálně naměřených dat a odezvy získané pomocí MKP simulace.

Pozice MFC vrstvy na vyšetřované konstrukci má zásadní vliv na měřenou odezvu. Pro určení vhodných lokací a tvaru jednotlivých vrstev je nutné simulovat odezvu dané soustavy na její buzení.

2.1 Formulace problému

Problém je tedy formulován následovně. Zjistit současný stav využití piezoelektrických vrstev pro snímání vibrací. Určit elektrické a mechanické charakteristiky MFC potřebné pro jeho modelování jako homogenního materiálu a ověřit správnost těchto charakteristik srovnáním s experimentem. Dále pak navrhnout zařízení osazené MFC vrstvami, určit vhodné lokace pro umístění vrstev a simulovat jejich odezvu na mechanické vibrace.

2.2 Cíle práce

- analýza současného stavu techniky v oblasti snímání pomocí piezoelektrických vrstev
- analýza citlivosti elektrického signálu na mechanické přetvoření u vybraných piezoelektrických vrstev
- vytvoření modelu piezoelektrické vrstvy pro potřeby návrhu technické soustavy s integrovanou MFC snímací vrstvou
- návrh technické soustavy s integrovanými MFC vrstvami

3 Systém podstatných veličin a volba metody řešení

Vytvoření systému podstatných veličin je nezbytným krokem potřebným pro správné posouzení problému a výběr metody řešení. Zajišťuje také, že nebude opomenuta žádná významná skutečnost související s modelovaným objektem. V rámci této práce byla tímto objektem MFC vrstva. Systém podstatných veličin obsahuje následující kategorie:

Okolí objektu

- hostující struktura (vetknutý nosník, testovací stolice)

Geometrie a topologie objektu

- pozice MFC na hostující struktuře
- rozměry aktivní vrstvy a jednotlivých strukturních složek
- uspořádání strukturních složek

Vazby objektu s okolím

- spojení objektu a hostující struktury
- elektrody

Aktivace objektu

- přetvoření způsobené mechanickými vibracemi

Ovlivnění objektu okolím

- připojení elektrické zátěže
- okolní prostředí (teplota, vlhkost apod.)

Vlastnosti prvků struktury objektu

- homogenní materiál jednotlivých strukturních složek
- mechanické a piezoelektrické materiálové charakteristiky

Procesy a stavy objektu

- přímý a obrácený piezoelektrický jev

Projevy chování a chování objektu

- generované elektrické napětí

Důsledky

- detekce vlastních frekvencí kmitání hostující struktury

Volba metody řešení

Modelování odezvy MFC na mechanické vibrace spadá do kategorie multifyzikálních problémů. Vzhledem ke komplexní povaze úlohy byla pro řešení zvolena metoda konečných prvků. Veškeré analýzy byly řešeny v programovém prostředí ANSYS.

4 Úvod do problematiky piezoelektrických materiálů

Piezoelektrický jev byl poprvé pozorován v roce 1880 francouzskými fyziky a bratry Curie [3], [4]. Ti zjistili, že v turmalínech a křemenech vlivem mechanického namáhání vzniká elektrické napětí.

První praktická aplikace piezoelektrického materiálu byla vyvinuta během 1. světové války [3]. Francouzský fyzik Paul Langevin využil přírodních krystalů křemene pro konstrukci zařízení schopného lokalizovat nepřátelská plavidla – sonar. Krystaly křemene se v daném období začaly také využívat v armádních radiostanicích.

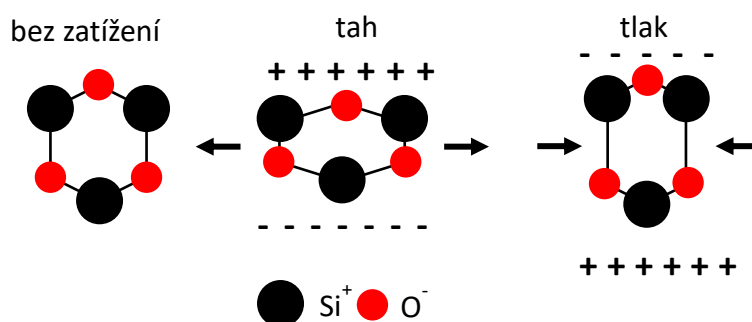
V důsledku rostoucí poptávky po piezoelektrických materiálech byly v průběhu a po skončení 2. světové války vyvinuty metody pro výrobu syntetických krystalů křemene. Byly také objeveny další piezoelektrické materiály jako BaTiO_3 (titaničitan barnatý) nebo PZT keramiky. V 70. letech 20. století byly piezoelektrické vlastnosti pozorovány i u polymerů, konkrétně u PVDF (plyvinildenfluorid) [4]. Na přelomu tisíciletí byly představeny kompozitní materiály kombinující PZT vlákna a polymerovou matici [5].

V současné době mají piezoelektrické materiály široké využití napříč obory. Využívají se při konstrukci senzorů, jako aktuátory, aktivní tlumiče nebo jako budiče v ultrazvukových zařízeních. Významnou roli také hrají při navrhování energeticky autonomních zařízení.

4.1 Mechanismus piezoelektrického jevu

Piezoelektrický jev lze rozdělit na přímý a obrácený. V případě přímého piezoelektrického jevu dochází ke generování elektrického napětí jako odezvy na mechanické namáhání materiálu. Na tomto principu jsou založeny senzory používající piezoelektrické materiály. Obrácený piezoelektrický jev je typický mechanickou deformací materiálu, je-li vystaven působení elektrického pole. Tento jev se využívá pro aktuátory.

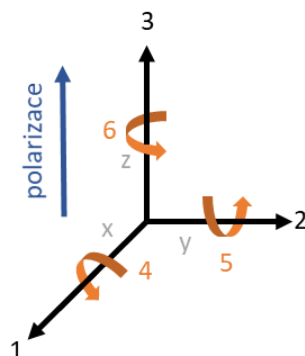
Piezoelektrický jev je úzce spojen se vznikem elektrického dipólu a mikrostrukturou materiálu. Krystalické materiály mají atomy uspořádány v krystalové mřížce tak, že jsou navenek elektricky neutrální [6]. Při mechanickém zatížení dochází k přeskupování atomů a deformaci mřížky, což vede ke ztrátě neutrality krystalu, potažmo vzniku elektrického napětí (Obr. 4.1). Nutnou podmínkou pro piezoelektrické chování materiálu je absence středu symetrie elementární buňky materiálu.



Obr. 4.1 Piezoelektrický jev v krystalu křemene

4.2 Piezoelektrické konstanty

Pro popis piezoelektrického materiálu se využívá několik základních konstant. Vzhledem k anizotropnímu chování materiálu jsou tyto konstanty vztaženy k určitým směrům daným osami souřadného systému. Označení jednotlivých směrů je popsáno na Obr. 4.2 [6].



Obr. 4.2 Standardní označování směrů

Piezoelektrický nábojový koeficient (d_{ij})

V případě přímého piezoelektrického jevu je d_{ij} definován jako poměr elektrického náboje generovaného na jednotkové ploše k zatěžující síle. Pro obrácený piezoelektrický jev odpovídá d_{ij} přetvoření vztaženému k jednotkové intenzitě elektrického pole. Jeho jednotkou je CN^{-1} , případně mV^{-1} .

Index i udává směr polarizace, druhý index j určuje směr mechanického zatížení, případně přetvoření.

Piezoelektrický napěťový koeficient (g_{ij})

Tento koeficient je definován jako poměr generovaného elektrického pole k mechanickému napětí. Jednotkou je VmN^{-1} . S rostoucí hodnotou g_{ij} roste i výstupní napětí, což je nezbytné při použití piezoelektrického materiálu jako senzoru.

Indexová konvence je stejná jako u piezoelektrického nábojového koeficientu.

Permitivita (ϵ_{ij})

Absolutní permitivita udává míru odporu proti vzniku elektrického pole v daném materiálu. Její jednotkou je Fm^{-1} . Využívá se také relativní permitivita. Ta vychází ze vztahu (4.1) a je bezrozměrná.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4.1)$$

Kde:

- ϵ absolutní permitivita
- ϵ_r relativní permitivita
- ϵ_0 permitivita vakua (8,85 nF/m)

Elektromechanický coupling koeficient (k_{ij})

Elektromechanický coupling koeficient určuje efektivitu, s jakou dochází k přeměně mechanické energie v elektrickou a naopak (přímý vs. obrácený piezoelektrický jev).

Indexová konvence je stejná jako u piezoelektrického nábojového koeficientu.

Curieho teplota (T_c)

Při překročení T_c se mění mikrostruktura materiálu (vzniká střed symetrie elem. buňky), případně se obnovuje nahodilá orientace polarizovaných domén (piezokeramické materiály) a dochází ke ztrátě piezoelektrických vlastností materiálu.

4.3 Konstitutivní vztahy piezoelektrických materiálů

Konstitutivní rovnice popisující piezoelektrické materiály vycházejí z klasického Hookova zákona a vztahu popisujícího elektrickou indukci. Tyto dvě základní rovnice jsou rozšířeny o členy zahrnující vliv piezoelektrického jevu. Je předpokládáno, že celkové přetvoření se skládá ze součtu přetvoření vzniklého vlivem mechanického napětí a přetvoření způsobeného aplikací elektrického napětí. Stejně tak celková elektrická indukce je dána součtem indukce způsobené mechanickým napětím a indukce vzniklé působením elektrického pole.

Základní rovnice popisující obrácený piezoelektrický jev mají dle [4] tvar:

$$S_p = s_{pq}^E T_q + d_{pk} E_k \quad (4.2)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (4.3)$$

Pro popis přímého piezoelektrického jevu se dle [4] používají rovnice:

$$T_p = s_{pq}^E S_q + g_{pk} D_k \quad (4.4)$$

$$E_i = g_{iq} S_q + \varepsilon_{ik}^S D_k \quad (4.5)$$

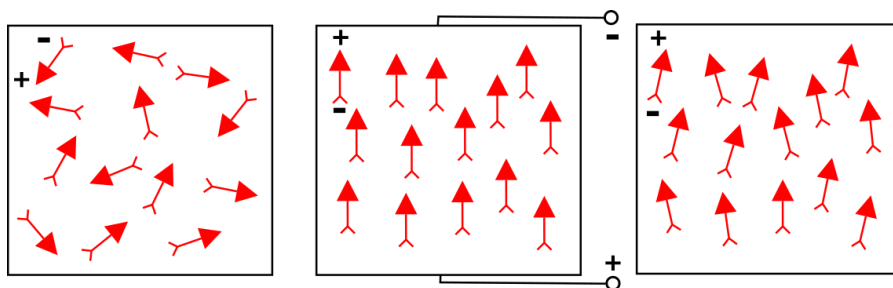
kde:

S	[-]	přetvoření
s^E	[Pa ⁻¹]	elastická poddajnost při konstantním elektrickém poli
T	[Pa]	mechanické napětí
d	[mV ⁻¹]	piezoelektrická nábojová konstanta
g	[VmN ⁻¹]	piezoelektrická napěťová konstanta
E	[Vm ⁻¹]	intenzita elektrického pole
D	[Cm ⁻²]	elektrická indukce
$\varepsilon^T, \varepsilon^S$	[Fm ⁻¹]	permitivita při konstantním mechanickém napětí / přetvoření

Indexy i,k = 1,2,3 a určují jednotlivé směry. Indexy p,q nabývají hodnot 1-6 a určují jednotlivé prvky tenzoru napětí, přetvoření apod.

4.4 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické vlastnosti lze pozorovat u poměrně široké skupiny materiálů. Tyto materiály mohou být přírodní nebo uměle vyráběné. Společnou charakteristikou je absence středu symetrie v elementární buňce krystalické struktury, případně přítomnosti elektrických domén vytvářejících elektrický dipól. Tyto domény mají v základním stavu materiálu nahodilou orientaci a ten tak navenek nejeví žádné piezoelektrické vlastnosti. Za účelem těchto vlastností je proto nutné provést jeho polarizaci viz Obr. 4.3 [4]. Tento proces obvykle probíhá za zvýšených teplot a spočívá ve vystavení materiálu působení silného stejnosměrného elektrického pole. Díky tomu dochází ke sjednocení směru domén, který zůstává zachován i po odstranění elektrického pole. Díky jednotnému směru domén materiál již navenek vykazuje piezoelektrické chování.



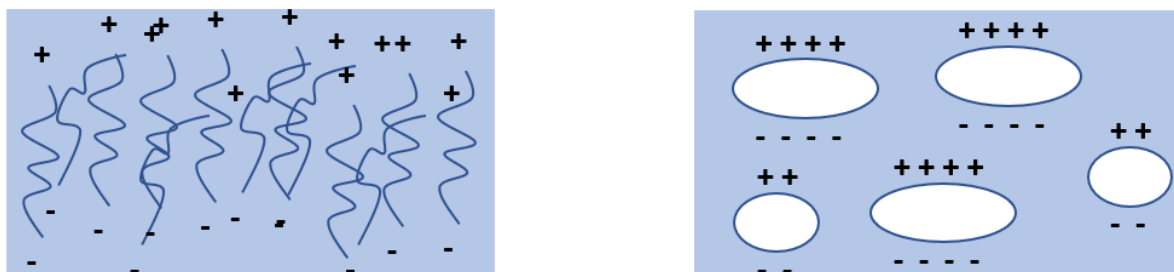
Obr. 4.3 Princip polarizace.

Zleva: nahodilá orientace domén, vystavení el. poli, stav po odstranění el. pole

Jak již bylo zmíněno piezoelektrické vlastnosti byly poprvé pozorovány u krystalů křemene (SiO_2). Ten se využívá v nejrůznějších elektrotechnických aplikacích především jako rezonátor. Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi a chemickou stabilitou [3]. Elektromechanický coupling koeficient není příliš vysoký, a proto se v současnosti věnuje pozornost výzkumu materiálů spadajících do jedné z kategorií uvedených níže.

4.4.1 Polymery

Polymerní materiály lze dělit do několika skupin podle mechanismu vzniku elektrického dipólu. U první skupiny vychází z makromolekulární struktury a uspořádání jednotlivých řetězců. Druhá skupina je charakteristická přítomností makroskopických dutin ve struktuře [7]. Rozdíly mezi těmito skupinami jsou patrné z Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Polymery s orientovanou molekulární strukturou a polarizovanými dutinami

Zástupci první skupiny jsou např. polyvinylidenfluorid (PVDF), polyvinylchlorid (PVDC) a Parylene-C. Orientace makromolekulárních řetězců je nahodilá. Za účelem získání piezoelektrických vlastností je proto třeba provést polarizaci materiálu.

Do druhé skupiny patří materiály souhrnně označované jako VCP (voided charged polymers). Jejich piezoelektrické charakteristiky jsou ovlivněny velikostí, hustotou dutin. Významnou roli hraje také druh plynu uvnitř dutin. I u této skupiny je nutná polarizace materiálu.

Díky své poddajnosti nacházejí polymery s piezoelektrickými vlastnostmi využití při konstrukci snímačů tlaku, případně síly, v robotice [8].

4.4.2 Keramiky

Nejvýznamnějším zástupcem piezoelektrických keramik je olovo-zirkonát-titanát označovaný jako PZT [9]. Tento materiál vykazuje velmi dobré piezoelektrické charakteristiky.

Piezoelektrické keramiky obsahují náhodně orientované domény. Pro dosažení piezoelektrických vlastností je tedy nutné provést polarizaci keramiky. Vlastnosti PZT lze také ovlivňovat přidáváním různých dopantů [10]. V závislosti na použitých prvcích se pak keramika dá dělit na tvrdou a měkkou. Tvrdá keramika je stabilnější a hodí se pro vysokofrekvenční aplikace např. rezonátory. Naopak měkká keramika má vyšší piezoelektrické nábojové konstanty, permitivitu a je poddajnější. Využívá se pro aktuátory a senzory.

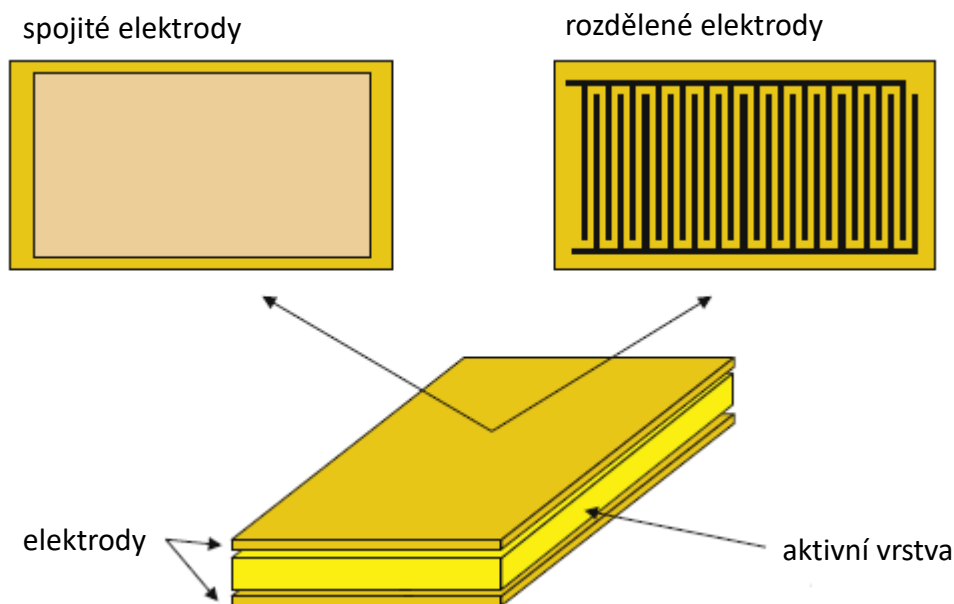
Nad ostatními piezoelektrickými materiály vynikají PZT keramiky vysokým elektromechanickým couplingem. Další výhodou je také jejich nízká cena a možnost vyrábět různé tvary. Mezi hlavní nevýhody patří jejich křehkost a poměrně nízká Currieho teplota.

4.4.3 Kompozitní materiály

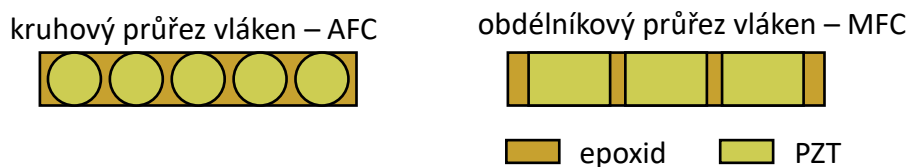
Vhodnou kombinací materiálů lze vytvořit kompozity s piezoelektrickými vlastnostmi. Jednotlivé složky struktury mohou mít piezoelektrické vlastnosti samy o sobě nebo se mohou kombinovat i piezoelektrické materiály s obyčejnými.

Velmi výhodná je kombinace PZT vláken a epoxidové matrice [11], [12]. Odstraňují se tak nevýhody spojitých PZT vrstev, zejména jejich křehkost a nepoddajnost. Takto vyrobené kompozity jsou flexibilní a zároveň si zachovávají dobré piezoelektrické vlastnosti. Jsou proto vhodné k aplikaci na zakřivené plochy nebo na tenké membrány, jelikož minimálně ovlivní mechanické vlastnosti podkladu.

Významnou skupinu tvoří AFC (active fiber composite) a macro fiber composite (MFC) kompozity. Takto navržené kompozity se skládají z aktivní vrstvy umístěné mezi poddajnými vrstvami tvořícími elektrody. Celková šířka nepřesahuje 0,5 mm. Elektrody jsou tvořeny spojitou vrstvou nebo rozdělenou mřížkou Obr. 4.5 [12]. Hlavní rozdíl mezi AFC a MFC je ve tvaru použitých PZT vláken – viz Obr. 4.6 [12].



Obr. 4.5 Základní struktura piezokompozitu



Obr. 4.6 Vnitřní struktura AFC a MFC

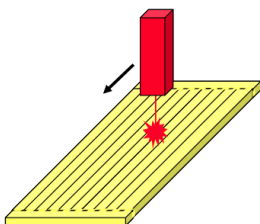
AFC byl vyvinut Active Materials and Structures Laboratory na MIT [11]. Skládá se z rovnoběžně orientovaných PZT vláken s kruhovým průřezem a epoxidové matrice. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí 100–250 μm . Elektrody uzavírají aktivní vrstvu z obou stran. Výhodou AFC je, že trhliny vznikají a šíří se pouze v jednotlivých vláknech. Díky tomu je kompozit schopen odolat vyššímu namáhání než jednodílná vrstva PZT. AFC dále disponuje vysokou hustotou elektrického náboje a dlouhou životností. Nevýhodou je malá styčná plocha mezi elektrodami a vlákny, což vede k nízké efektivitě přenosu elektrického napětí. Problematická je i výroba kompozitu jako takového, zejména pak udržení orientace a celistvosti vláken během manipulace a zalévání epoxidovou pryskyřicí.

Vývoji MFC se věnoval NASA Langley Research Center a navázal na výhody AFC [11]. V současnosti tyto kompozity vyrábí společnost Smart Material Corp. Na rozdíl od AFC však MFC využívá vláken s obdélníkovým průřezem. Tento tvar umožňuje dosáhnout vyššího objemového podílu vláken ve struktuře, což vede k vyšší hustotě elektrického náboje. Ztráty elektrického napětí jsou nižší než u AFC v důsledku větší stykové plochy elektrod a vláken. Elektrody mají tvar rozdělené mřížky.

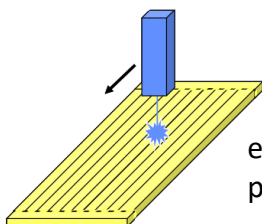
Jednodušší je také výroba MFC [5]. Jednotlivá piezokeramická vlákna se vyřezávají z PZT plátek pomocí laserového nebo vodního paprsku. Případně se mohou PZT pláty navrstvit na sebe, spojit epoxidovou pryskyřicí a následně z takto vzniklého bloku odřezávat přímo aktivní vrstvy MFC, viz Obr. 4.7 [5].

vyřezávání jednotlivých vláken z PZT plátku

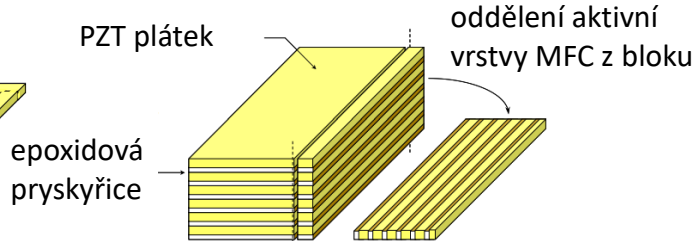
laserový paprsek



vodní paprsek

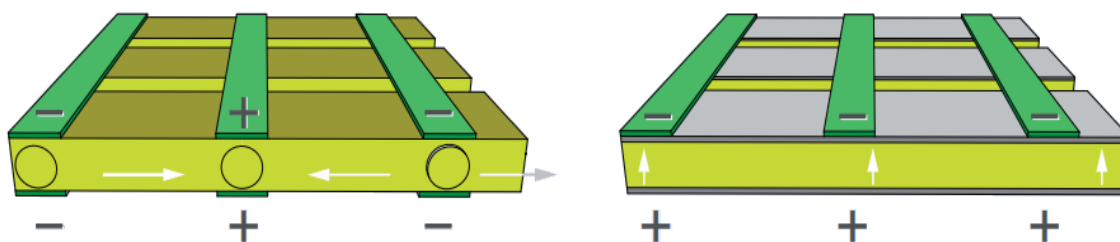


výroba aktivní vrstvy MFC



Obr. 4.7 Způsob vyřezávání jednotlivých PZT vláken a výroba aktivní vrstvy MFC

MFC může pracovat ve dvou módech, a to d_{31} a d_{33} . Tyto dva módy se mezi sebou liší ve směru polarizace PZT vláken a způsobu zapojení elektrod, jak je zobrazeno na Obr. 4.8 [2], kde bílé šipky označují směry polarizace. MFC pracující v módu d_{33} bývá označován jako tzv. elongator. Deformace spojená s tímto typem je charakteristická protažením vrstvy ve směru vláken. Jako tzv. contractor jsou označovány MFC pracující v módu d_{31} a po připojení napětí dochází k jejich zkracování ve směru vláken.



Obr. 4.8 Zapojení elektrod: d_{33} (vlevo) a d_{31} (vpravo)

5 Současný stav techniky v oblasti snímání mechanických veličin pomocí piezoelektrických vrstev

Využití piezoelektrických vrstev v technické diagnostice se věnuje poměrně velká pozornost. Hlavním důvodem je zvyšující se dostupnost těchto vrstev a možnost následně vytvářet SMART součásti. Nejčastěji používané materiály jsou PZT, MFC/AFC případně PVDF. Mnoho autorů se zabývá srovnáním těchto vrstev s klasickými snímači a senzory jako jsou tenzometry nebo akcelerometry. Možnost pracovat v aktivním i pasivním módu umožňuje využití piezoelektrických vrstev v oblasti monitorování stavu struktury materiálu (SHM – structural health monitoring). Díky svým kompaktním rozměrům mohou být také použity pro vytvoření aktivní vrstvy v kompozitních materiálech.

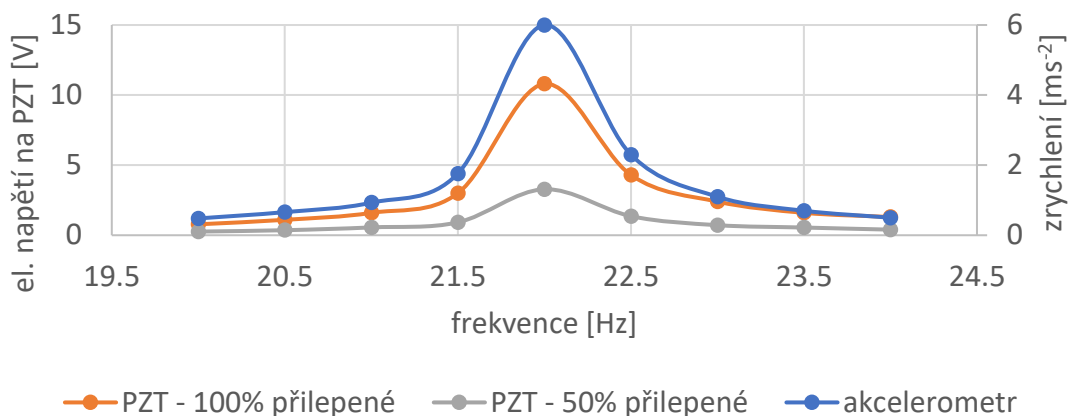
5.1 Měření přetvoření a zrychlení

Piezoelektrické vrstvy velmi úspěšně nahrazují klasické tenzometry. Porovnáním tenzometrů, PVDF a PZT vrstev se zabývá článek [13]. Schéma experimentálního zařízení použitého v článku je zobrazeno na Obr. 5.1. Hlavní výhodou piezoelektrických vrstev oproti tenzometrům je lepší odstup signálu od šumu (SNR – signal to noise ratio) a jejich menší citlivost vůči vysokofrekvenčnímu šumu. Dalším nesporným plusem je, že signál generovaný piezovrstvami nemusí většinou být zesilován. Při porovnání PZT a PVDF vykazuje lepší vlastnosti piezokeramika. Autoři zmíněného článku také zkoumali vliv teploty na odezvu piezoelektrických vrstev. V rozsahu 25–50 °C nezaznamenali výraznější změny.



Obr. 5.1 Experimentální zařízení použité v [13]

Obdobná konfigurace testovacího zařízení jako na Obr. 5.1 byla použita i v [14] pro ověření možnosti použít PZT vrstvy pro měření vibrací. V tomto případě byl tenzometr nahrazen akcelerometrem. Nosník byl buzen ve frekvenčním rozsahu 20–24 Hz a byly zaznamenávány hodnoty zrychlení a elektrické napětí na PZT vrstvě. Autoři vyšetřovali dva případy. V prvním byla PZT vrstva připevněna k nosníku po celé své ploše. Druhý případ simuloval nedokonalé připevnění PZT. Kontaktní plocha byla pouze 50 % celkové plochy vrstvy. Výsledky měření jsou na Obr. 5.2. Je patrné, že průběhy křivek mají stejný charakter. Pro správnou interpretaci výsledků je však nutné zvolit správný přepočtový koeficient mezi elektrickým napětím na PZT vrstvě a hodnotou zrychlení, který je pro každý případ jiný. Koeficienty, určené pro jednotlivé frekvence v daném pásmu, vykazovaly také velký rozptyl vůči střední hodnotě.



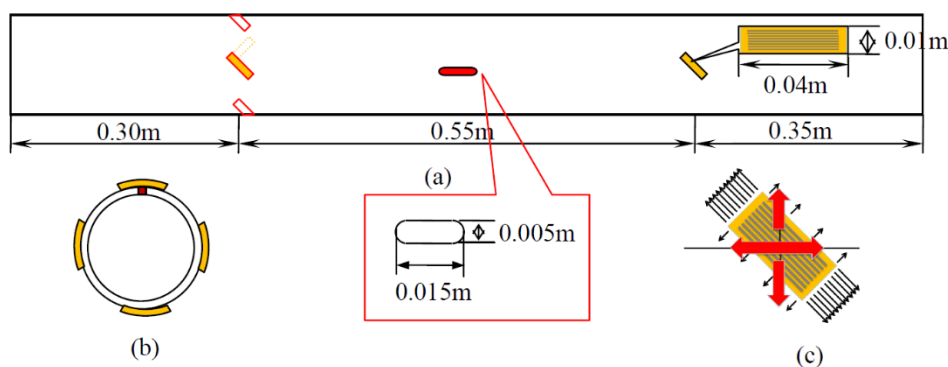
Obr. 5.2 Porovnání signálů mezi PZT a akcelerometrem

5.2 Využití pro monitorování stavu struktury materiálu

Hlavním cílem SHM je průběžné sledování charakteristických veličin za účelem detekce, určení typu a polohy poruchy, která nastala ve struktuře materiálu. SHM je důležité zejména u součástí, při jejichž selhání hrozí velké škody na životech nebo majetku. Existuje široká škála nedestruktivních zkoušek materiálů (NDT – non destructive testing) použitelných za tímto účelem.

Jednou z používaných NDT metod je vyhodnocování akustické emise (AE). Ta spočívá ve snímání vysokofrekvenčního elastického vlnění, které se šíří v materiálu jako důsledek probíhajících dynamických procesů. Autoři článku [15] srovnávali použitelnost AFC pro AE se standardními AE snímači. Jako modelový případ si vybrali simulaci úniků média z potrubí. Vyšetřovali vliv změny tlaku v potrubí a rychlost unikání plynu. Hodnoty získané při měření s využitím AFC vykazovali dobrou shodu se standardními AE senzory.

Využitím MFC pro detekci poruch v potrubí se zabývá také zdroj [16]. Pro detekci poruchy v potrubí byla použita ultrazvuková průchodová metoda. Pro vybuzení ultrazvukového signálu byla použita čtveřice MFC rozmístěných na obvodu vnější plochy trubky. Tento signál byl po průchodu přes poruchu zaznamenáván pátým MFC snímačem. Konfigurace experimentu je schématicky zobrazena na Obr. 5.3. Vyhodnocením získaných dat z pátého snímače bylo možné určit polohu, tvar a orientaci poruchy.



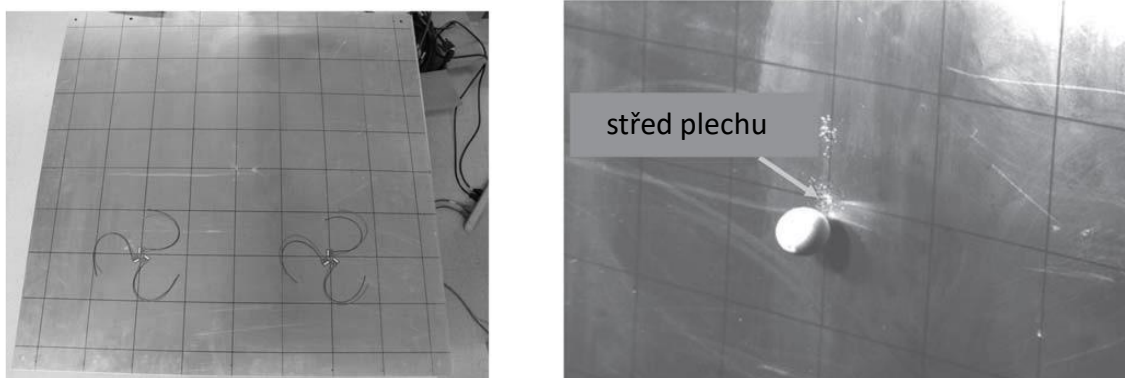
Obr. 5.3 Konfigurace experimentu pro průchodovou ultrazvukovou metodu.

Další metodou, kde lze piezoelektrické vrstvy využít je vyšetřování přenosové funkce systému (FRF – frequency response function). Poruchy ovlivní lokální tuhost a tlumení, což se následně projeví i na přenosové funkci. Autoři článku [17] použili tuto metodu pro detekci poruchy na listu větrné turbíny při únavové zkoušce. Lopatka byla osazena 12 MFC vrstvami, z nichž jedna sloužila jako zdroj signálu a zbylých 11 zaznamenávalo odezvu systému viz Obr. 5.4 [17]. Únavové porušení bylo vizuálně zjištěno po 2,3 milionech cyklů v oblasti kořene listu. FRF získaná ze senzorů v blízkosti poruchy vykazovala změny již po 1,5 milionech cyklů. Naopak vzdálenější snímače nezaznamenaly téměř žádnou změnu.



Obr. 5.4 Lopatka větrné turbíny osazená MFC snímači

Ve zdroji [18] byl proveden experiment, který simuloval náraz odletujícího ledu do konstrukce trupu letadla. Cílem bylo lokalizovat místo nárazu. Při experimentu byl ostřelován hliníkový a kompozitní plát ledovými koulemi letícími přibližnou rychlostí 30 m/s. Pláty byly osazeny dvěma páry MFC růžic viz Obr. 5.5 [18], které zaznamenávaly vlnění šířící se v materiálu od místa nárazu. To bylo možné lokalizovat díky rozložení snímačů a jejich rozdílné podélné a příčné citlivosti. Rozdíl mezi skutečným bodem střetu a bodem získaným vyhodnocením signálů byl v obou případech menší než 2 cm.



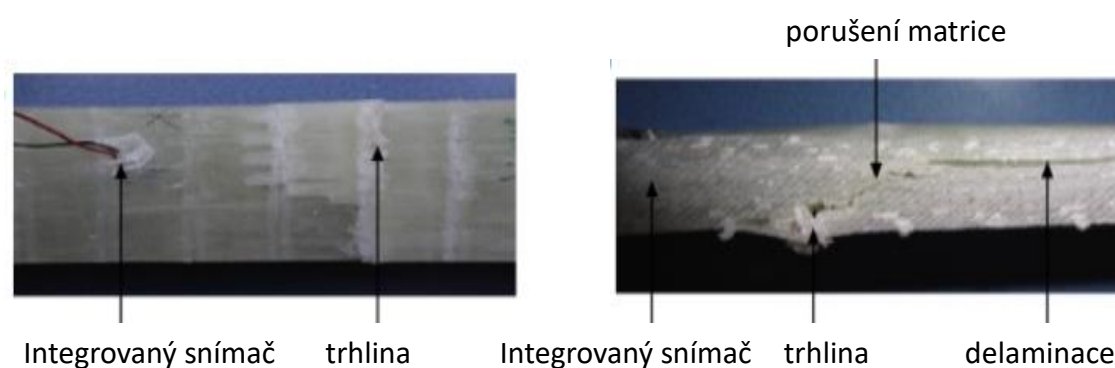
Obr. 5.5 Plech osazený dvěma páry MFC růžic (vlevo) a náraz ledové koule do plechu (vpravo)

5.3 Aktivní vrstvy v kompozitních materiálech

Další oblastí, kde mohou být piezoelektrické vrstvy s výhodou využity, je jejich implementace do kompozitních vrstev. Mohou tak být vytvořeny SMART součásti, které budou schopné podávat informace o svém stavu, případně získávat energii ze svého okolí. Mimo jiné jsou takovéto kompozity schopny aktivně měnit svůj tvar, čehož lze využít např. v leteckém

průmyslu. Další výhodou snímačů implementovaných ve struktuře součástí je, že nijak nenarušují jejich vnější povrch a jsou zároveň chráněny proti vnějším vlivům. Naopak mezi nevýhody patří složitější výroba kompozitního materiálu, komplikovaná oprava v případě poškození snímače a přenos měřeného signálu.

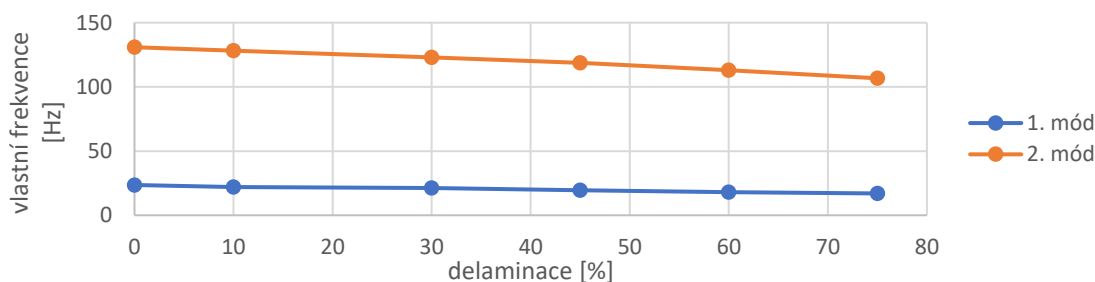
Články [19] a [20] se zabývají ovlivněním hostující struktury vloženým piezoelementem a rozdílem v citlivosti mezi snímačem ve struktuře kompozitu a snímačem připevněným na povrchu. PZT disky různých rozměrů byly vloženy do laminátů a sendvičových struktur. Pro porovnání citlivosti byly vzorky s integrovaným snímačem osazeny ještě jedním snímačem umístěným na povrchu a následně zatěžovány tříbodovým ohybem. Probíhající strukturální změny byly vyhodnocovány pomocí AE. Výsledky ukázaly, že integrovaný snímač jeví vyšší citlivost vůči AE událostem než snímač umístěný na povrchu. Důležité také je, že k poruše materiálu nedošlo v oblasti, kde byl snímač umístěn viz Obr. 5.6 [19].



Obr. 5.6 Porušení laminátu s integrovaným snímačem

Jednotlivé PZT snímače mohou do kompozitního materiálu vnášet výrazné koncentrátoři napětí, které vznikají na rozhraní PZT a matrice. Vhodnější je proto použít MFC (AFC) namísto PZT. Vliv piezoelektrické vrstvy na mechanické vlastnosti kompozitu je popsán v [21]. Jako testovací vzorek byl použit sklolaminátový vzorek s vloženým PZT případně MFC senzorem. Tyto vrstvy snížily pevnost v tahu v případě MFC o 3 % a o 6 % při použití PZT.

V článku [22] je vyšetřována odezva integrovaného MFC snímače ve sklolaminátovém vzorku. Z experimentů vyplývá, že MFC vykazuje dobrou citlivost i na malá přetvoření. Pozorovaná závislost mezi napětím a přetvořením byla lineární. Integrovaný senzor byl také použit k měření modálních vlastností vzorku a byl tak schopen odhalit delaminaci, ke které v materiálu došlo.



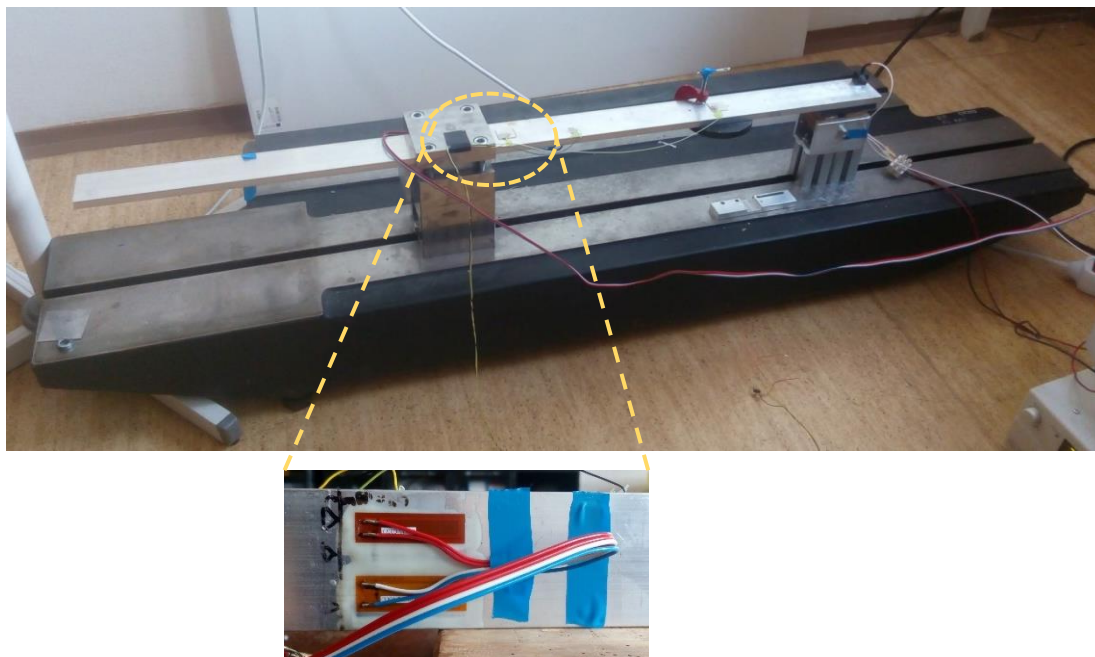
Obr. 5.7 Změna vlastní frekvence v závislosti na delaminaci

5.4 Shrnutí

Piezoelektrické vrstvy mají široké využití v oblasti technické diagnostiky a měření. Uvedené experimenty prokázaly jejich použitelnost namísto klasických snímačů, jako jsou tenzometry, standardní akcelerometry apod. a také možnost využití v různých diagnostických metodách. Z podstaty piezoelektrického jevu vyplývá, že generované napětí vždy vychází z přetvoření materiálu. Je tedy nutné určit korelační koeficienty mezi měřenými veličinami a hodnotou napětí. Jednou z výhod je, že piezoelektrické vrstvy mohou pracovat v aktivním i pasivním módu. Mohou tedy být jak zdrojem buzení soustavy, tak i snímat její odezvu na různé zatěžující stavy. Nabízí se také možnost navrhovat SMART struktury schopné nejen měření, ale i aktivního zásahu (např. tlumení vibrací, změna tvaru). Dále je zajímavá možnost vytvářet autonomní systémy, které energii potřebnou pro svůj provoz získávají z okolního prostředí. Mezi nevýhody lze zařadit křehké chování a malou poddajnost některých vrstev (zejména PZT). Při použití aktivních vrstev v kompozitních materiálech dochází také ke drobnému zhoršení mechanických vlastností hostující struktury.

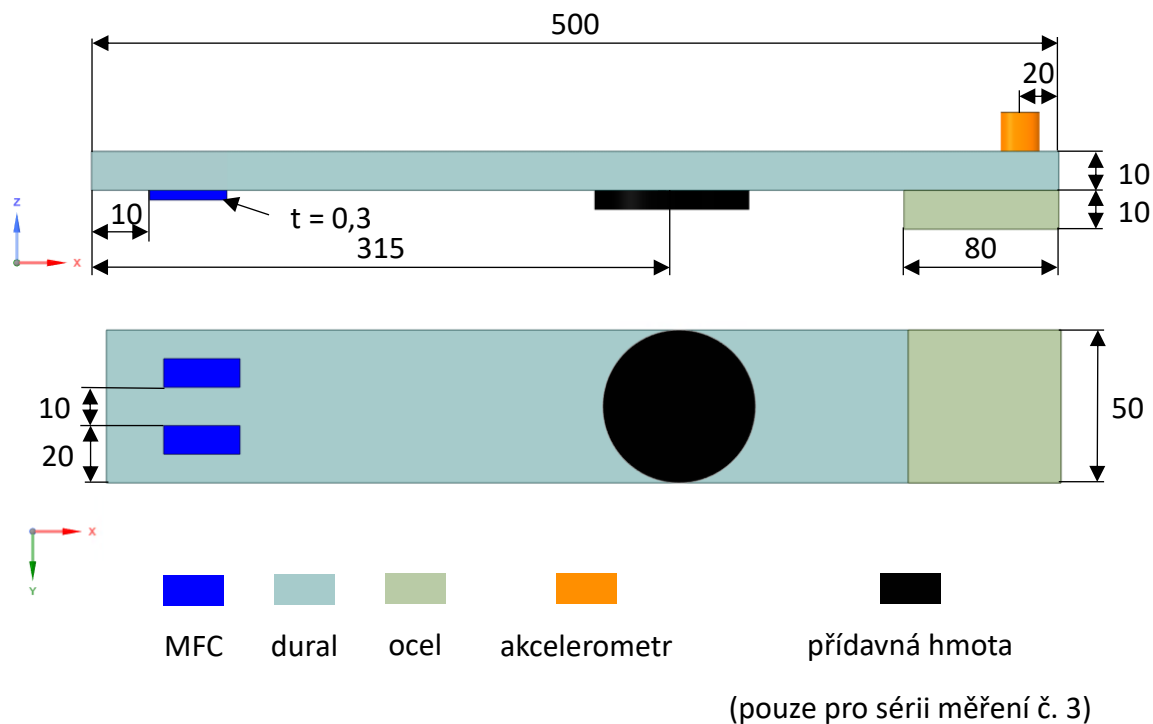
6 Analýza citlivosti elektrického signálu u vybraných piezoelektrických vrstev

Pro analýzu citlivosti elektrického signálu byly vybrány MFC snímače vyráběné firmou Smart Material corp. Tato firma je výhradním distributorem MFC snímačů a její evropská pobočka sídlí v Drážďanech. Konkrétně se jednalo o výrobky s katalogovým číslem M2807-P1 a M2807-P2. První typ pracuje v módu d_{33} , druhý v módu d_{31} a jejich rozměry jsou 30x10x0,3 mm.



Obr. 6.1 Experimentální zařízení pro měření odezvy MFC

Experimentální zařízení je zobrazeno na Obr. 6.1. Duralový nosník byl uchycen k základové desce tak aby bylo simulováno vetknutí na jednom jeho konci. Na volný konec byla zesponu přilepena ocelová deska, díky které bylo možné nosník budit pomocí cívky. Pro poslední sérii měření bylo na nosník přidáno závaží o hmotnosti 465 g ve vzdálenosti 315 mm od vetknutí. Cívka byla napájena z elektrického zdroje, přičemž pomocí LabVIEW skriptu bylo možné měnit frekvenci a šířku pulzů elektrického napětí. Tím byla řízena amplituda a frekvence budící síly. Na horní straně volného konce nosníku byl připevněn akcelerometr, který zaznamenával hodnotu zrychlení. Výše zmíněné MFC snímače byly nalepeny na spodní stranu nosníku 10 mm od vetknutí. Efektivní hodnota generovaného elektrického napětí byla měřena pomocí osciloskopu. Rozměry nosníku v milimetrech, použité materiály, umístění MFC a akcelerometru jsou znázorněny na Obr. 6.2.



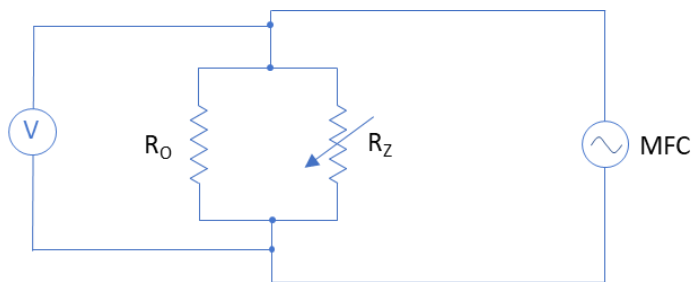
Obr. 6.2 Geometrické rozměry nosníku a pozice snímačů (uvedené rozměry jsou v mm).

Pro zjištění odezvy MFC byly provedeny tři série měření, rozdělené podle budicí frekvence. V každé sérii byly voleny různé hodnoty amplitudy budicí síly a elektrické zátěže.

Frekvence buzení byla zvolena jako 1. a 2. vlastní frekvence kmitání nosníku pro konfiguraci bez závaží. Pro konfiguraci s přidanou hmotou byly měřeny hodnoty odezvy pouze pro 2. vlastní frekvenci, protože při buzení na 1. vlastní frekvenci docházelo k vymezení vůle mezi nosníkem a cívkou a mohlo by tak dojít k poškození zařízení. Hodnoty budicích frekvencí byly rovny 19,8 Hz a 165,4 Hz pro konfiguraci bez závaží. Pro konfiguraci s přidanou hmotou byla volena hodnota 120,5 Hz.

Budicí síla vyvozená cívkou byla řízena velikostí elektrického napětí zdroje a modulací šířky pulzu. Tyto parametry byly nastaveny tak, aby pro každou měřenou budicí frekvenci dosahovala amplituda zrychlení na konci nosníku hodnot 4 g a 2 g.

Velikost elektrické zátěže byla volena tak, aby byla dostatečně popsána přechodová křivka elektrického napětí generovaného MFC a výkonová charakteristika. Pro správnou interpretaci bylo třeba vzít v úvahu i odpor osciloskopu a způsob zapojení. Z Obr. 6.3 je patrné, že proměnný odpor zátěže R_z , jehož hodnoty byly měněny, a odpor osciloskopu R_o byly zapojeny paralelně. Skutečnou hodnotu elektrické zátěže R_c bylo tedy nutné přepočítat pomocí obecně známého vzorce pro sčítání paralelních odporů.



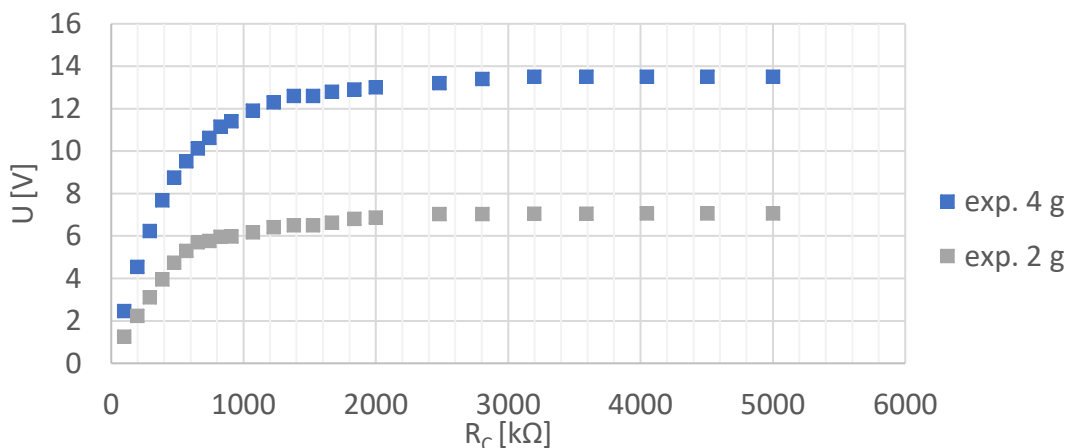
Obr. 6.3 Schematické zapojení

6.1 Naměřené hodnoty

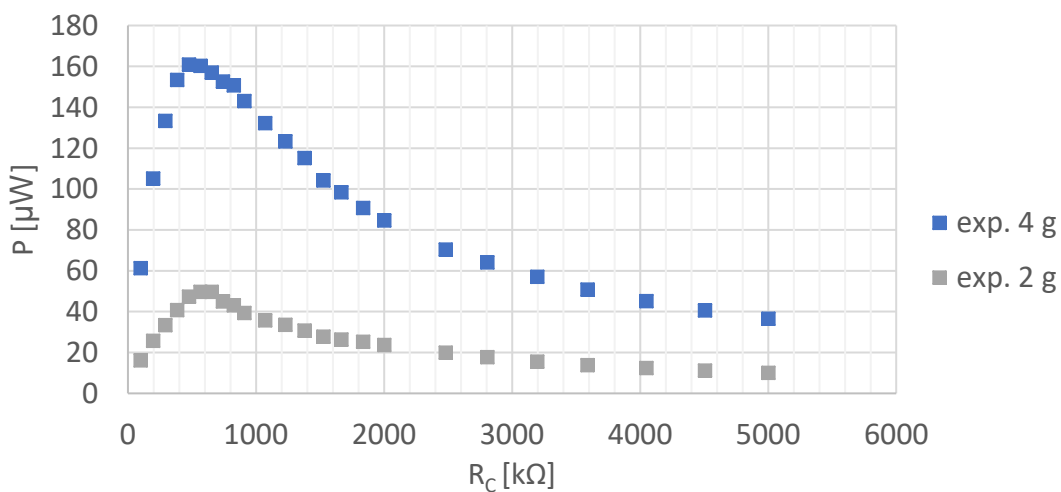
Naměřené hodnoty efektivního elektrického napětí byly zaznamenány a vyneseny do grafů jako závislost na odporu. Dále z těchto hodnoty byl dopočítán výkon a následně určen jeho průběh v závislosti na odporu. Níže uvedené grafy vycházejí z měření MFC s katalogovým číslem M2807-P2.

Série měření č. 1

V této sérii byl nosník bez přidané hmoty buzen na první vlastní frekvenci 19,8 Hz. Závislost napětí na odporu je na Obr. 6.4, průběh výkonu je pak na Obr. 6.5.



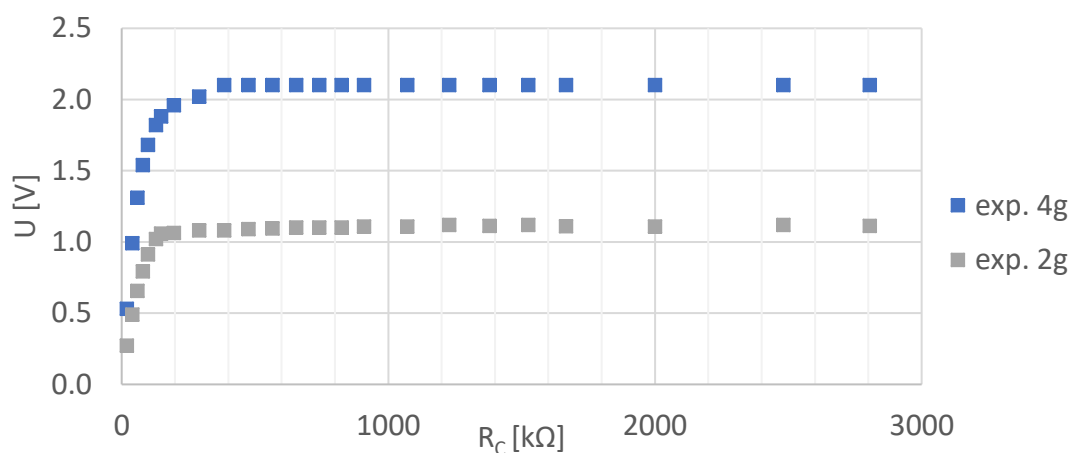
Obr. 6.4 Závislost napětí na odporu pro první sérii měření



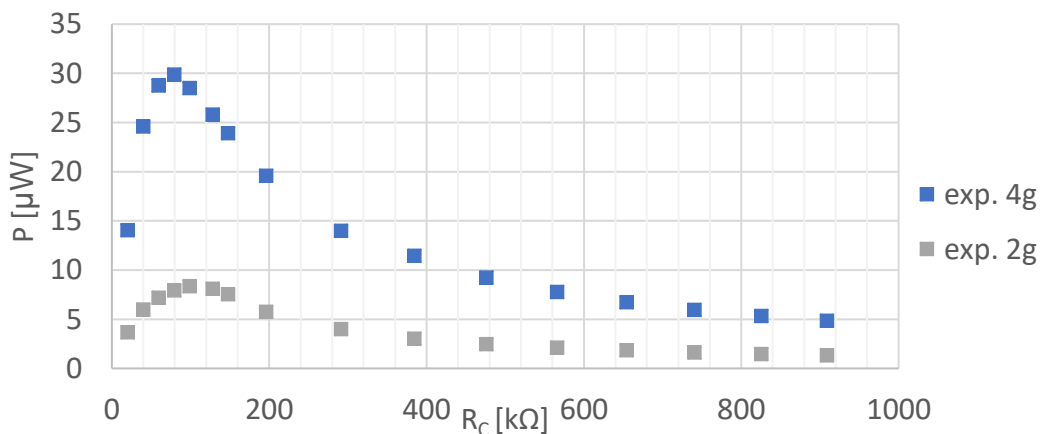
Obr. 6.5 Závislost výkonu na odporu pro první sérii měření

Série měření č. 2

V této sérii byl nosník bez přidané hmoty buzen na druhé vlastní frekvenci 165,4 Hz. Obr. 6.6 zobrazuje závislost napětí na odporu, na Obr. 6.7 je závislost výkonu na odporu.



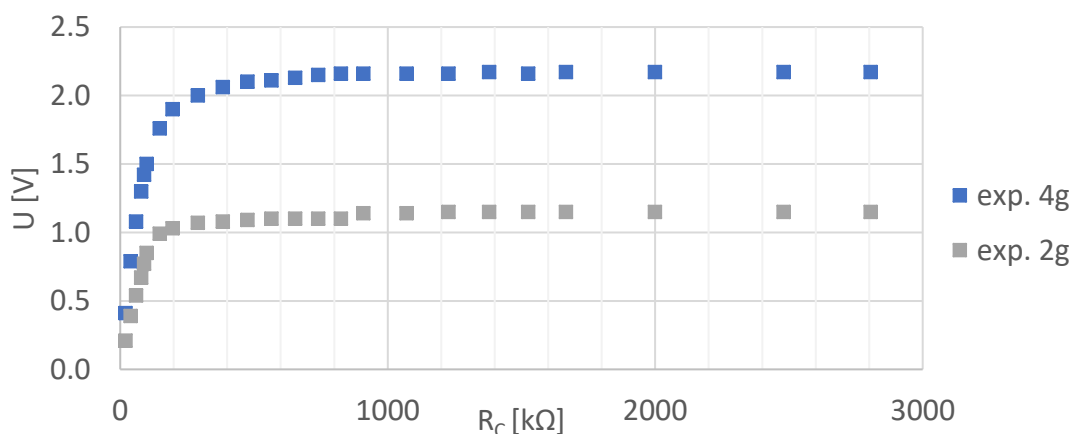
Obr. 6.6 Závislost napětí na odporu pro druhou sérii měření



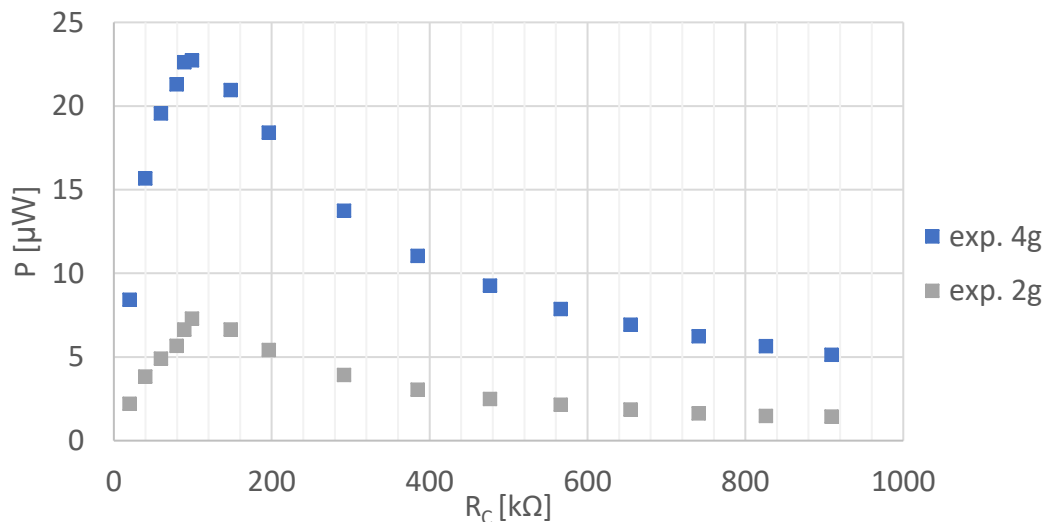
Obr. 6.7 Závislost výkonu na odporu pro druhou sérii měření

Série měření č. 3

V této sérii byl nosník s přidaným závažím buzen na druhé vlastní frekvenci 120,5 Hz. Průběh napětí v závislosti na odporu je na Obr. 6.8, průběh výkonu je na Obr. 6.9.



Obr. 6.8 Závislost napětí na odporu pro třetí sérii měření



Obr. 6.9 Závislost výkonu na odporu pro třetí sérii měření

6.2 Vyhodnocení měření

Z naměřených dat vyplývá několik zjevných faktů. Hodnota generovaného elektrického napětí je přímo úměrná přetvoření. Tento fakt splňuje teoretický předpoklad podle rovnice (4.5). Z té také vyplývá, že závislost mezi elektrickým napětím a přetvořením je lineární.

Elektrické napětí je také silně závislé na hodnotě připojené elektrické zátěže. S její rostoucí hodnotou roste i generované elektrické napětí. To se po překročení určitého mezního odporu již dále nezvyšuje a zůstává na své maximální hodnotě, která je pro jednotlivá měření patrná z uvedených grafů. Srovnáním Obr. 6.4, Obr. 6.6 a Obr. 6.8 lze dojít k závěru, že hodnota odporu, při jehož překročení se již elektrické napětí nezvyšuje, klesá s rostoucí frekvencí buzení. Mezní hodnotu odporu, za kterou dosáhne elektrické napětí svého maxima, lze tedy stanovit jako **3 MΩ** pro všechna měření.

Při druhé a třetí sérii měření byl vybuzen druhý tvar kmitání. Rozdíl ve frekvencích je způsoben přeladěním soustavy přidáním závaží. Lze předpokládat, že přetvoření u kořene nosníku je v obou případech stejné. Z Obr. 6.6 a Obr. 6.8 je patrné, že nedošlo k téměř žádným změnám v průběhu elektrického napětí, jeho maximální hodnotou a hodnotou mezního odporu.

Průběh výkonu je taktéž závislý na odporu. S rostoucí hodnotou odporu se asymptoticky blíží k určité hodnotě, která však není maximální. Pro naměřené hodnoty je maximálního výkonu dosaženo při 500 kΩ pro první sérii měření a 90 kΩ pro druhou a třetí sérii. Stejně tak jako u mezní hodnoty odporu pro maximální elektrické napětí lze konstatovat, že hodnota odporu pro maximální výkon klesá s rostoucí frekvencí buzení.

6.3 Určení tlumení soustavy

V rámci experimentů bylo provedeno také měření potřebné pro určení poměrného útlumu nosníku. Měření probíhalo následovně. Nosník byl vychýlen do krajní polohy a poté uvolněn. Došlo tedy k vybuzení prvního tvaru kmitání, který byl postupně utlumen. Po celou dobu kmitání byl zaznamenáván signál z akcelerometru. Použitá vzorkovací frekvence byla 1 kHz.

Naměřená data byla následně zpracována v programu Matlab. Ze signálu byla vybrána maxima jednotlivých kmitů, která zároveň spadala do rozmezí 2-4 g viz Obr. 6.10 . Tato data byla poté proložena exponenciální funkcí popsanou rovnicí (6.1), z níž byla určena hodnota poměrného útlumu pro první vlastní frekvenci. Pro daný případ bylo $b_p = 0,0015$. Je nutné podotknout, že průběh tlumení není ani v takto jednoduchém případě lineární. Pokud je to možné, je tedy vhodné určovat poměrný útlum pouze pro určité pásmo zrychlení. Určený poměrný útlum byl také ověřen pomocí logaritmického dekrementu útlumu, přičemž v daném pásmu bylo dosaženo řádově stejných hodnot.

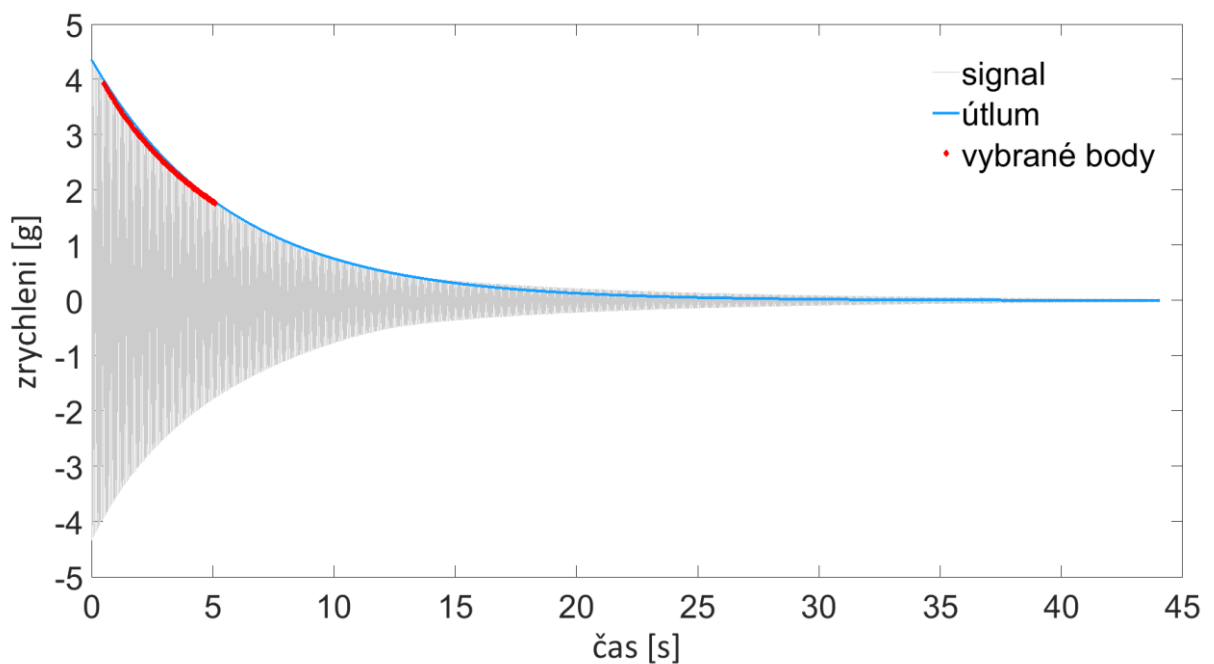
$$a(t) = a_{max}e^{-b_p\Omega t} \quad (6.1)$$

Kde:

a_{max} maximální zrychlení na počátku měření

b_p poměrný útlum

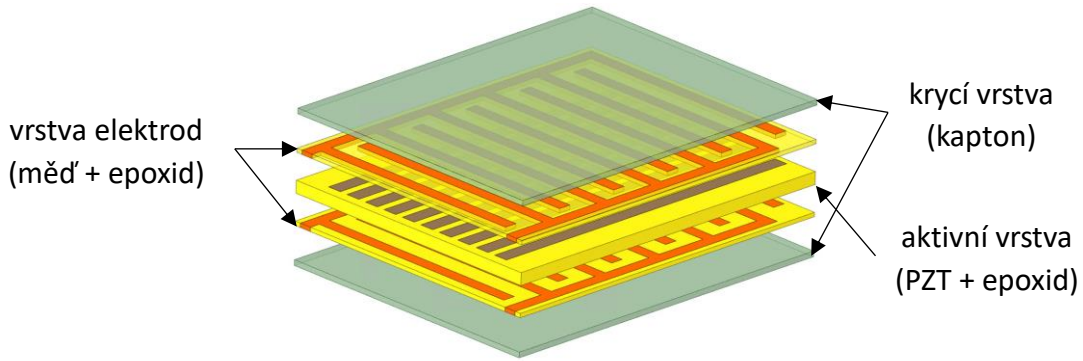
Ω úhlová vlastní frekvence



Obr. 6.10 Záznam dokmitávání nosníku a určení poměrného útlumu

7 Homogenizace MFC vrstvy

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.4.3 MFC snímače jsou kompozitní materiály. Skládají se z PZT vláken zalitých v epoxidové pryskyřici. Připojeny měděné elektrody mají tvar dvou do sebe zapadajících hřebenů a zajišťující přenos elektrického napětí z vláken. Z obou stran je struktura překryta krycí vrstvou ochraňující vnitřní strukturu vůči vnějším vlivům. Struktura MFC, jak je popsána v technickém listě [2], je zobrazena na Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Vnitřní struktura MFC

Je zjevné, že modelovat MFC v této podobě by bylo velmi pracné a vedlo by k velké složitosti výpočtového modelu. Také by bylo nutné vytvářet nové modely pro jednotlivé typy snímačů, které se od sebe liší svými rozměry, a tedy i počtem PZT vláken. Modelovat MFC jako homogenní materiál s příslušnými mechanickými a elektromechanickými parametry je proto mnohem lepší přístup. Výrobce však v technickém listě [2] poskytuje pouze omezené informace, které nejsou dostačující pro vytvoření vypovídajícího numerického modelu. Potřebné charakteristiky lze získat pomocí rozšířeného směšovacího pravidla [23], asymptotické metody homogenizace [24], [25] nebo pomocí MKP modelu elementární buňky kompozitu [26]. V této práci jsou porovnány hodnoty získané použitím směšovacího pravidla a modelováním elementární buňky pomocí MKP.

Pro určení ekvivalentních charakteristik je nutné znát konstitutivní rovnice popisující MFC. Ty vycházejí z rovnic (4.2) a (4.3) a mají tvar uvedený níže.

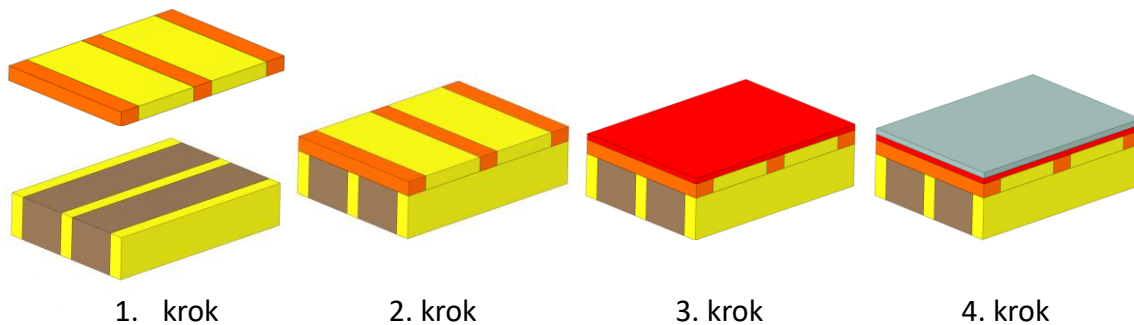
$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

7.1 Směšovací pravidlo

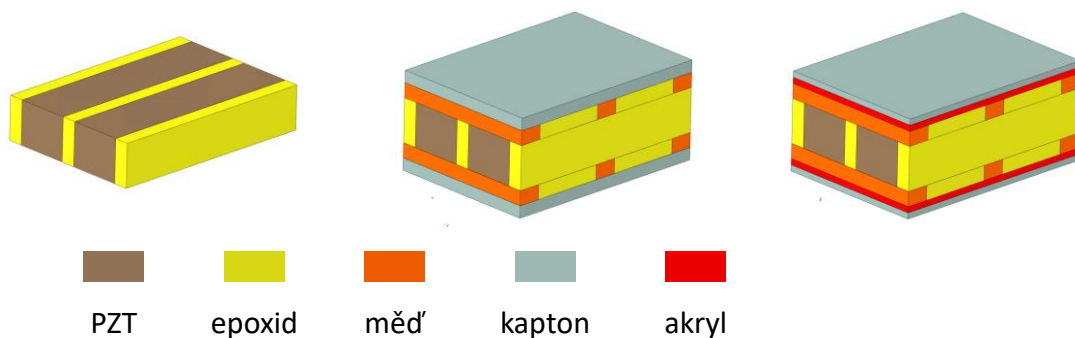
Směšovací pravidlo je prvním možným způsobem, jak získat homogenizované materiálové charakteristiky MFC. Klasickou formulaci pro lamináty formulovanou např. ve skriptech [27] je třeba rozšířit o členy zohledňující elektromechanický coupling. Tímto rozšířením se zabývali autoři článků uvedených níže.

Postup homogenizace MFC je ve zdrojích [23], [28], a [26] stejný. Nejprve jsou vypočítány ekvivalentní materiálové charakteristiky aktivní vrstvy a vrstvy s elektrodami. Takto získané vlastnosti jsou následně použity v dalších krocích, kdy jsou díky postupnému skládání všech vrstev vypočítány konstanty celého MFC. Schéma postupu je na Obr. 7.2.



Obr. 7.2 Postup homogenizace

Jednotliví autoři uvažují rozdílnou strukturu MFC viz Obr. 7.3. Nejjednodušší reprezentaci poskytuje článek [28], který homogenizuje pouze aktivní vrstvu MFC, tedy PZT vlákna a epoxidovou matici. Zdroj [23] uvažuje 4 strukturální složky. Jsou to aktivní vrstva (PZT vlákna, epoxid), vrstva elektrod (měděné elektrody, epoxid) a krycí vrstvu (kapton). Článek [26] rozšiřuje složení krycí vrstvy na kapton a akryl. Celková tloušťka MFC a objemový podíl měděných elektrod jsou stejné ve všech článcích.



Obr. 7.3 Strukturální složení jednotlivých vrstev použité v článcích [28] (vlevo), [23] (střed) a [26] (vpravo)

Zdroje [23] a [26] předpokládají v aktivní vrstvě elektrické pole konstantního průběhu, a rovnoběžné se směrem polarizace. Tento předpoklad je v reálu splněn pouze u MFC pracujících v módu d_{31} . Pro mód d_{33} je průběh elektrického pole složitější a je silně ovlivněn šířkou elektrod [29]. Dalším rozdílem v předpokladech je, že [23] uvažuje pouze rovinnou napjatost ve vrstvách.

Odvozené vztahy jsou závislé na objemovém podílu PZT vláken, pro MFC to je 53 %. Tab. 7.1 uvádí porovnání mechanických vlastností homogenizovaného MFC s tímto objemovým podílem. Uvedené konstanty platí pro módy d_{31} a d_{33} . Oba dva modely prezentované v [23] a [26] vykazují dobrou shodu mechanických vlastností s daty v technickém listě, a to i přes rozdílnou strukturu krycích vrstev. To může být vysvětleno tím, že Yongův modul a Poissonův poměr pro kapton a akryl jsou v podstatě stejné. Stejně tak si jsou rovny i tloušťky jednotlivých vrstev. Směr 1 je totožný se směrem PZT vláken, směr 2 označuje směr elektrod a směr 3 je kolmý k rovině tvořené směry 12.

Tab. 7.1 Porovnání mechanických vlastností

	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	E_3 [GPa]	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	G_{23} [GPa]	μ_{12} [-]
Tech. list [2]	30,34	15,86	-	5,52	-	-	0,31
Zdroj [23]	27,27	14,76	-	4,13	-	-	0,32
Zdroj [26]	29,35	14,91	11,04	4,83	2,52	2,48	0,29

V případě piezoelektrické nábojové konstanty jsou v technickém listě uvedeny pouze hodnoty $d_{31} = 170$ pC/N pro MFC pracující v módu d_{31} a $d_{33} = 400$ pC/N pro mód d_{33} . Relativní permitivita MFC není uvedena. Hodnoty veličin získaných pomocí vztahů z [23] a [26] jsou určeny pro aktivní vrstvu (Tab. 7.2). I v tomto případě lze prohlásit, že vzájemná shoda (včetně shody s technickým listem) je uspokojivá.

Tab. 7.2 Porovnání piezoelektrických nábojových konstant a relativní permitivity

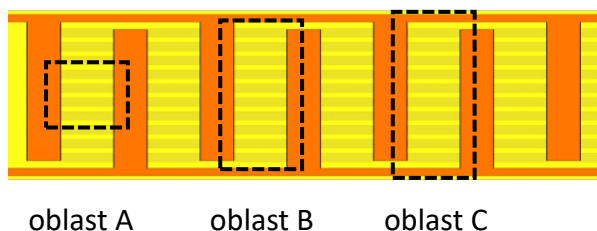
	mod d_{31}				mod d_{33}			
	d_{31} [pC/N]	d_{32} [pC/N]	d_{33} [pC/N]	ϵ_{r33} [-]	d_{31} [pC/N]	d_{32} [pC/N]	d_{33} [pC/N]	ϵ_{r33} [-]
Zdroj [23]	-183	-153	-	1600	-	-176	436	1593
Zdroj [26]	-170	-125	298	1700	-148	-143	415	950

7.2 Model elementární buňky MFC

Dalším z možných přístupů, jak získat materiálové charakteristiky pro homogenní model MFC je modelovat elementární buňku pomocí MKP. Elementární buňkou je takový objem, který obsahuje všechny podstatné části struktury a jehož periodickým opakováním vznikne celek. Je proto nutné znát nejen materiálové charakteristiky a objemové podíly jednotlivých složek, ale i jejich geometrické rozměry.

7.2.1 Hranice elementární buňky

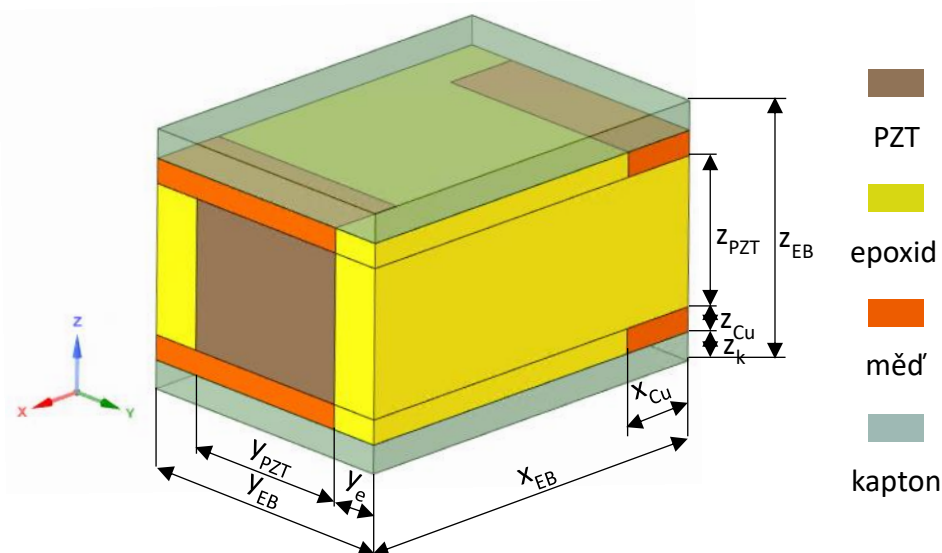
V článcích [26], [30], [31] a [32] je elementární buňka vytvořena výřezem z oblasti A (viz Obr. 7.4). Hodnoty E_2 získané při použití této konfigurace jsou o více než 30 % vyšší než hodnoty, které uvádí technický list. Jedním z možných vysvětlení je, že takto navržená buňka nerespektuje skutečné uspořádání elektrod. Ty v reálném MFC nejsou navzájem spojeny. Elementární buňku lze vytvořit také řezem z oblasti B. V tomto případě je již respektováno přerušení elektrod. Realitu nejvíce respektuje řez z oblasti C, nicméně tato oblast je závislá na šířce MFC. Lze předpokládat že E_1 určené z oblastí B a C se vzhledem k objemovým podílům nebude výrazněji měnit.



Obr. 7.4 Možné hranice řezu pro vytvoření elementární buňky

7.2.2 Model geometrie

S ohledem na výše zmíněné důvody byl v rámci této práce vytvořen MKP model v programu ANSYS 19.1 reprezentující elementární buňku z oblasti B, která nabízí kompromis mezi oblastmi A a C. Všechny konstanty byly zadávány a vyhodnocovány v základních jednotkách. Pro zjednodušení struktury modelu, bylo uvažováno pouze jedno PZT vlákno. Geometrické rozměry jsou uvedeny v Tab. 7.3 a byly získány ze zdroje [30] a elementární buňka je znázorněna na Obr. 7.5.



Obr. 7.5 Použitá elementární buňka

Tab. 7.3 Geometrické rozměry elementární buňky v μm

x_{Cu}	x_{EB}	y_e	y_{PZT}	y_{EB}	z_k	z_{Cu}	z_{PZT}	z_{EB}
80	580	28	344	400	40	20	180	300

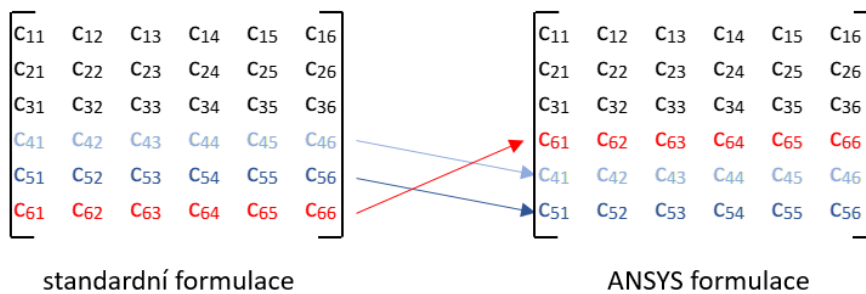
7.2.3 Model materiálu

Takto navržený model se skládá ze čtyř strukturních složek. Jmenovitě jsou to PZT vlákna, epoxidová matrice, měděné elektrody a krycí kaptonová vrstva. Materiálové charakteristiky byly získány ze zdrojů [31], [32] a jsou uvedeny v Tab. 7.4.

Tab. 7.4 Materiálové vlastnosti

	PZT vlákno	epoxid	měď	kapton
modul pružnosti v tahu [GPa]	$E_1 = 54,05$ $E_2 = 54,05$ $E_3 = 48,30$	2,80	117,20	2,50
poissonův poměr [-]	$\mu_{12} = 0,41$ $\mu_{23} = 0,44$ $\mu_{13} = 0,44$	0,30	0,35	0,34
modul pružnost ve smyku [GPa]	$G_{12} = 19,14$ $G_{23} = 19,48$ $G_{13} = 19,48$	1,08	43,41	0,93
piezoel. nábojová konstanta [pC/N]	$d_{31} = -185$ $d_{32} = -185$ $d_{33} = 440$	-	-	-
rel.permitivita [-]	$\epsilon_{r11}^T = 1950$ $\epsilon_{r22}^T = 1950$ $\epsilon_{r33}^T = 1850$	-	-	-

Pro měď, kapton a epoxid byl uvažován izotropní lineárně elastický model materiálu a nulová relativní permitivita. PZT vlákna vykazují anizotropní vlastnosti a do modelu materiálu je nutné dále zahrnout piezoelektrické a elektrické charakteristiky. Pro definici anizotropních vlastností v programu ANSYS je třeba korektně zadat matici tuhosti případně matici poddajnosti materiálu. Struktura této matice je uvedena na Obr. 7.6. Obdobnou úpravu je třeba provést i s maticí piezoelektrických konstant. V případě zadávání relativní permitivity je třeba zkontrolovat, je-li zadávána ϵ^T nebo ϵ^S . Výpočtový model simuloval MFC pracující v módu d_{31} , vektor polarizace byl tedy rovnoběžný s osou z.



Obr. 7.6 Rozdíly ve formulaci matice tuhosti anizotropního materiálu

7.2.4 Síť a použité elementy

Síť byla tvořena prvky SOLID226 a SOLID186. Prvek SOLID 226 je trojrozměrný 20 uzlový prvek, umožňující modelovat multifyzikální problémy. Pro řešení úlohy bylo zvoleno nastavení se čtyřmi stupni volnosti v uzlu. Jsou to posuvy v osách x , y , z a elektrické napětí. Tento prvek byl použit pro diskretizaci PZT vláknů. Zbylé komponenty struktury byly diskretizovány pomocí prvků SOLID186, které mají rovněž 20 uzlů, ale pouze tři stupně volnosti na uzel, a to posuvy v jednotlivých osách. Po kontrole konvergence sítě byla pro celou elementární buňku nastavena velikost elementu $10\ \mu\text{m}$.

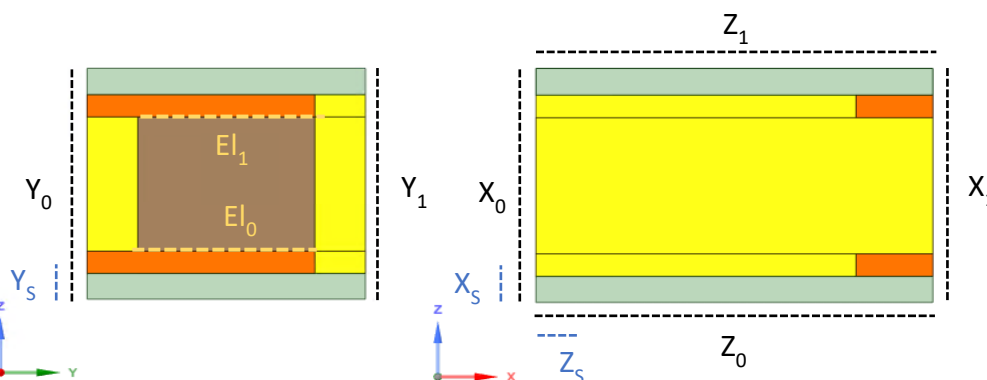
7.2.5 Volba okrajových podmínek

Pro získání jednotlivých konstant popisujících homogenizovanou MFC vrstvu bylo třeba provést celkem sedm samostatných výpočtů s různými zatěžujícími stavy (dále jen ZS). Plochy, na které byly aplikovány okrajové podmínky (dále jen OP), jsou znázorněny na Obr. 7.7.

V 1. ZS byla na plochu X_0 předepsána OP zamezující posuvu uzlů ve směru x , na plochu X_1 byla aplikována silová OP vyvolávající v elementární buňce jednoosý tah σ_x ve směru osy x . Na plochách Y_0 a Z_0 bylo zamezeno posuvům ve směru osy y , respektive z . Na plochách Y_1 a Z_1 byly svázány posuvy uzlů pomocí vazebných rovnic v příslušných směrech – CP_y a CP_z . Na elektrody El_0 a El_1 byl předepsán nulový elektrický potenciál. Okrajové podmínky pro zatěžující stavy 2 a 3 byly voleny obdobně a jsou vypsány v Tab. 7.5

Ve 4. ZS byly na plochy X_s a Y_s předepsány OP zamezující posuvům ve směrech os x a y . Rozměry těchto ploch byly totožné s délkou hrany jednoho elementu. Na plochy X_1 a Y_1 byla aplikována jednotková zatížení v kladných směrech osy y respektive osy x . Na ploše Z_0 byla zvolena OP zamezující posuvům ve směru osy z a na ploše Z_2 byly svázány posuvy – CP_z . Elektrický potenciál na elektrodách byl opět nulový. Zatěžující stavy 5 a 6 vyvolávají napjatost ve zbylých dvou rovinách a jsou popsány v Tab. 7.5

V 7. ZS bylo na plochách X_0 , Y_0 , Z_0 zamezeno posuvům v příslušných směrech, stejně tak na plochách X_1 , Y_1 , Z_1 byly svázány posuvy uzlů v daných směrech. Na elektrodě El_0 byl zvolen nulový potenciál, na El_1 byla předepsána jednotková hodnota potenciálu ϕ_z .



Obr. 7.7 Plochy pro předepsání okrajových podmínek

Tab. 7.5 Okrajové podmínky pro jednotlivé zatěžující stavy

ZS	okrajová podmínka											
	X ₀	X _s	X ₁	Y ₀	Y _s	Y ₁	Z ₀	Z _s	Z ₁	El ₀	El ₁	
1	u _x = 0	-	σ _x = 1	u _y = 0	-	CP _y	u _z = 0	-	CP _z	φ _z = 0	φ _z = 0	
2	u _x = 0	-	CP _x	u _y = 0	-	σ _y = 1	u _z = 0	-	CP _z	φ _z = 0	φ _z = 0	
3	u _x = 0	-	CP _x	u _y = 0	-	CP _y	u _z = 0	-	σ _z = 1	φ _z = 0	φ _z = 0	
4	-	u _x = 0	σ _y = 1	-	u _y = 0	σ _x = 1	u _z = 0	-	CP _z	φ _z = 0	φ _z = 0	
5	u _x = 0	-	CP _x	-	u _y = 0	σ _z = 1	-	u _z = 0	σ _y = 1	φ _z = 0	φ _z = 0	
6	-	u _x = 0	σ _z = 1	u _y = 0	-	CP _y	-	u _z = 0	σ _x = 1	φ _z = 0	φ _z = 0	
7	u _x = 0	-	CP _x	u _y = 0	-	CP _y	u _z = 0	-	CP _z	φ _z = 0	φ _z = 1	

7.2.6 Výpočet ekvivalentních charakteristik homogenizované buňky

V případě MFC lze předpokládat, že hodnoty d_{15} , d_{24} , $\epsilon^{T_{11}}$ a $\epsilon^{T_{22}}$ jsou rovny nule. Předepsání nulových elektrických potenciálů v krocích 1–6 způsobí, že se rovnice (7.1) a (7.2) zredukuje na tvary:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{21}^E & S_{22}^E & S_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{31}^E & S_{32}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Pro první tři ZS jsou hodnoty napětí T_1 – T_3 rovny jednotkovému zatěžujícímu napětí. Hodnoty S_1 – S_3 jsou z definice určeny jako poměr prodloužení v daném směru k původní délce.

Hodnoty T_4 – T_6 a S_4 – S_6 jsou vypočítány dle rovnic (7.5) resp. (7.6). Oblast pro výpočet průměrného napětí a přetvoření byla volena tak, aby předepsané OP minimálně ovlivňovaly výsledky.

$$T_j = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{T}_{ji} V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad j = 4, 5, 6 \quad (7.5)$$

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{S}_{ji} V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad j = 4, 5, 6 \quad (7.6)$$

Kde:

- T_j průměrné napětí ve směru j
- S_j průměrné přetvoření ve směru j
- \tilde{T}_{ji} napětí ve směru j na elementu i
- \tilde{S}_{ji} přetvoření ve směru j na elementu i
- V_i objem elementu i
- N počet elementů ve vybrané oblasti

Pro určení piezoelektrických nábojových koeficientů je nutné znát hodnotu elektrické indukce. Ta je vypočítána podle rovnice (7.7).

$$D_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} \tilde{D}_{3i} V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (7.7)$$

$$E_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} \tilde{E}_{3i} V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (7.8)$$

Kde:

- D_3 průměrná elektrická indukce v celém objemu elementární buňky
- \tilde{D}_{3i} elektrická indukce v elementu i
- E_3 intenzita elektrického pole v celém objemu elementární buňky
- \tilde{E}_{3i} intenzita elektrického pole v elementu i
- V_i objem elementu i
- N počet elementů v elementární buňce
- N_e počet elementů v PZT vláknu

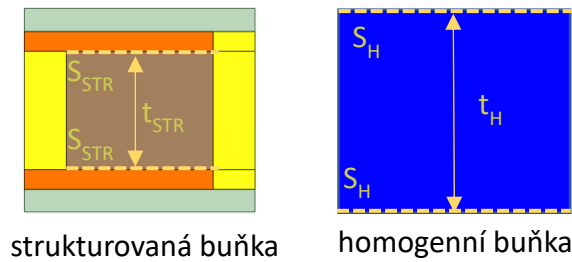
Využitím výše uvedených rovnic lze získat hodnoty průměrného mechanického napětí, přetvoření, elektrické indukce a intenzity elektrického pole v elementární buňce. Následný výpočet piezoelektrických nábojových koeficientů modulů pružnosti v tahu a smyku je pak již triviální záležitostí.

Okrajové podmínky předepsané v kroku 7 zjednodušují rovnici (7.2) na tvar (7.9). Z této rovnice lze určit hodnotu absolutní permitivity. Relativní permitivitu lze vyjádřit ze vztahu (4.1).

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (7.9)$$

Pro určení správné hodnoty relativní permitivity je nutné vzít v potaz, že strukturovaná elementární buňka a homogenní buňka musí mít stejnou elektrickou kapacitu. Pro výpočet kapacity lze vycházet z obecně známého vzorce pro deskový kondenzátor. Jak je patrné

z Obr. 7.8, plocha a vzdálenost elektrod pro strukturovanou a homogenizovanou buňku se liší. Je proto třeba hodnotu relativní permitivity přepočítat dle vztahu (7.11).



Obr. 7.8 Rozdíl ve vzdálenosti a ploše elektrod

$$C_{STR} = C_H \Rightarrow \epsilon_0 \epsilon_{rSTR} \frac{S_{STR}}{t_{STR}} = \epsilon_0 \epsilon_{rH} \frac{S_H}{t_H} \quad (7.10)$$

$$\epsilon_{rH} = \epsilon_{rSTR} \frac{S_{STR} t_H}{S_H t_{STR}} \quad (7.11)$$

Kde:

ϵ_{rH} relativní permitivita homogenní buňky

ϵ_{rSTR} relativní permitivita strukturované buňky

S_H plocha elektrody homogenní buňky

S_{STR} plocha elektrody strukturované buňky

t_H vzdálenost elektrod v homogenní buňce

t_{STR} vzdálenost elektrod ve strukturované buňce

Číselné hodnoty materiálových charakteristik získané modelováním elementární buňky jsou vyčísleny v Tab. 7.6. Mechanické vlastnosti a hodnoty piezoelektrických nábojových konstant vykazují dobrou shodu s hodnotami získanými pomocí směšovacího pravidla, jak je uvedeno v předchozí podkapitole. Naproti tomu relativní permitivita se výrazně liší. Nicméně vztahy odvozené v článcích [23], [28], [26] nezohledňují změnu plochy a vzdálenosti elektrod. Při využití přepočtu podle vztahu (7.11) se hodnoty relativní permitivity liší přibližně o 5 %.

Tab. 7.6 Mechanické, piezoelektrické a elektrické konstanty homogenizovaného MFC

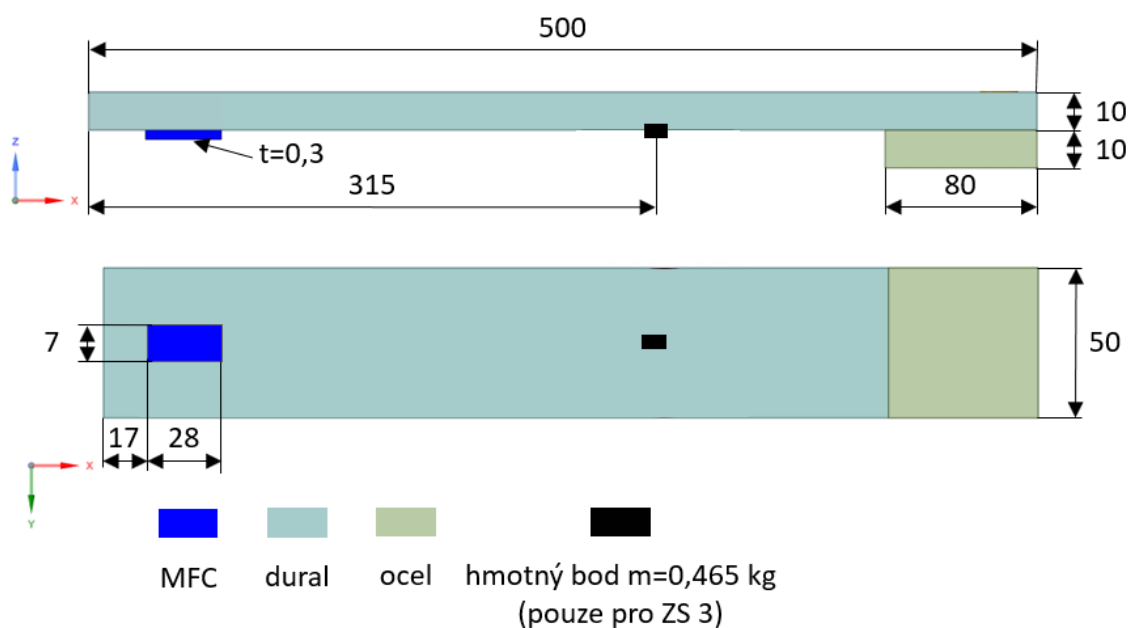
modul pružnosti v tahu [GPa]		poissonův poměr [-]		modul pružnosti ve smyku [GPa]		piezoel. nábojová konstanta [pC/N]		relativní permitivita [-]	
E_1	31,6	μ_{12}	0,4	G_{12}	4,9	d_{31}	-173	ϵ_{rH33}^T	2253
E_2	17,1	μ_{23}	0,2	G_{23}	2,5	d_{32}	-150		
E_3	9,5	μ_{13}	0,4	G_{13}	2,4	d_{33}	325		

7.3 Ověření homogenizovaných materiálových charakteristik

V rámci validace materiálových charakteristik homogenizovaného MFC byl vytvořen konečnoprvkový model simulující experiment popsaný v kapitole 6. Materiálové charakteristiky pro MFC byly převzaty z Tab. 7.6. Cílem bylo získat hodnoty generovaného napětí a ty následně porovnat s naměřenými daty. Za tímto účelem byla provedena harmonická analýza nosníku v klasickém prostředí programu ANSYS. Všechny hodnoty byly zadávané v základních jednotkách.

7.3.1 Model geometrie

Geometrické rozměry nosníku jsou dány na Obr. 7.9. Přidaná hmota byla modelována jako hmotný bod. Hmotnost akcelerometru je ve srovnání s hmotností celého nosníku zanedbatelná, a proto nebyla v analýze uvažována. Vzhledem k poddajnosti MFC není ve výpočtu zahrnuta adhezivní vrstva mezi piezoelektrickou vrstvou a nosníkem. V případě MFC snímače je třeba mít na paměti, že charakteristiky určené v předchozí podkapitole platí pouze pro aktivní oblast. Rozměry této oblasti pro M2807-P2 jsou 28x7 mm, tloušťka je 0,3 mm. Dále je také důležité určit správnou vzdálenost této oblasti od vetknutí, která byla v případě experimentu 17 mm. Směr PZT vláken byl totožný se směrem osy x.



Obr. 7.9 Schematický náčrt model geometrie nosníku (uvedené rozměry v mm)

7.3.2 Model materiálu

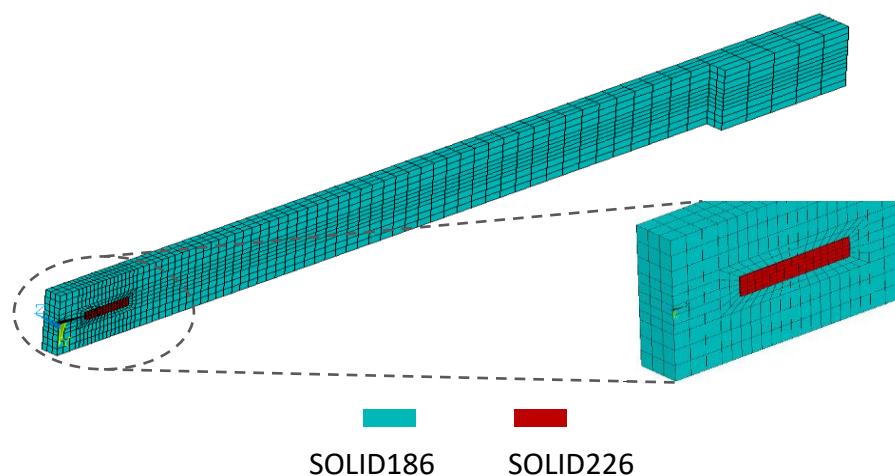
Pro výpočtový model je nutné uvažovat materiálové charakteristiky oceli, duralu a homogenizovaného MFC. Pro ocel a dural byl použit lineárně elastický izotropní model materiálu, pro MFC je třeba použít model zahrnující anizotropní chování materiálu, piezoelektrické a elektrické vlastnosti. Pro harmonickou analýzu je také třeba zadat hustoty.

Tab. 7.7 Materiálové vlastnosti

	homogenní MFC	ocel	dural
modul pružnosti v tahu [GPa]	$E_x = 31,6$ $E_y = 17,1$ $E_z = 9,5$	210,0	68,9
poissonův poměr [-]	$\mu_{xy} = 0,4$ $\mu_{yz} = 0,2$ $\mu_{xz} = 0,4$	0,30	0,33
modul pružnost ve smyku [GPa]	$G_{xy} = 4,9$ $G_{yz} = 2,5$ $G_{xz} = 2,4$	80,7	25,9
hustota [kg/m³]	5440	7850	2700
piezoel. nábojová konstanta [pC/N]	$d_{31} = -170$ $d_{32} = -150$ $d_{33} = 350$	-	-
rel. permitivita [-]	$\epsilon_{r33}^T = 2253$	-	-

7.3.3 Síť a použité elementy

Duralový nosník a ocelová deska byly diskretizovány pomocí prvků SOLID186. MFC vrstva byla tvořena elementy SOLID226 a je zobrazena na Obr. 7.10. Popis těchto prvků je uveden v podkapitole 7.2.4. Mimo ně byly ještě použity prvky MASS21 a CIRC94. MASS21 je bodový prvek s až šesti stupni volnosti umožňující simulovat hmotný bod včetně momentů setrvačnosti. Tento prvek byl použit jenom v třetí sérii výpočtů a simuloval pouze hmotnost bez momentů setrvačnosti. Jeho poloha byla totožná s polohou těžiště přídavné hmoty. Hmotnost 0,465 kg byla nastavena pomocí reálné konstanty prvku. CIRC94 je prvek simulující části elektrického obvodu. Pro účely této analýzy nahrazoval elektrický odpor. Hodnotu odporu lze měnit pomocí reálné konstanty prvku. Uzly CIRC94 byly navázané na plochy elektrod E_0 a E_1 , jak je patrné z Obr. 7.11.

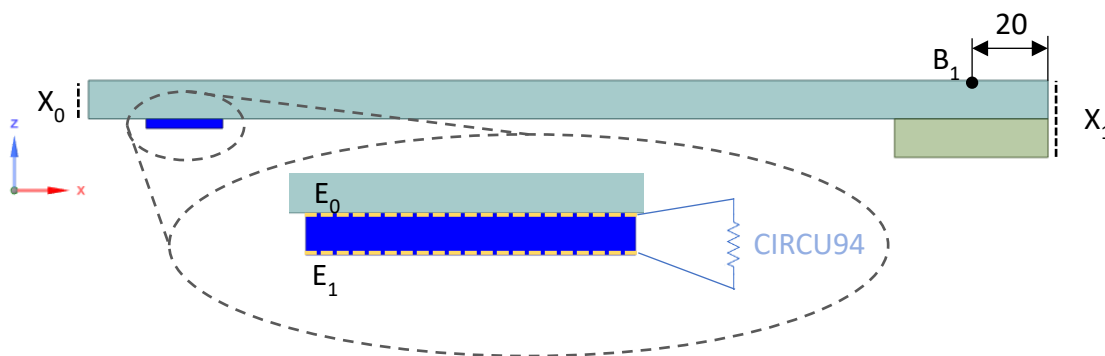


Obr. 7.10 Síť a použité 3D prvky

7.3.4 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly voleny tak aby model co nejvíce odpovídal experimentu. Oblasti pro předepsání OP jsou zobrazeny na Obr. 7.11. Na plochu X_0 bylo předepsáno vetknutí, tzn. bylo zamezeno posuvům uzlů ve všech směrech. Na plochu X_1 byla aplikována síla, jejíž hodnota byla nastavena tak, aby výchylka v bodě B_1 ve směru z odpovídala výchylce u_{zmax} , které tento bod dosahoval při experimentu. Hodnota u_{zmax} byla určena pomocí dvojité integrace hodnoty zrychlení.

Elektrody na plochách E_0 a E_1 náležících objemu homogenizovaného MFC byly vytvořeny svázáním hodnot elektrického potenciálu pomocí vazebných rovnic ($CP_{voltage}$). Dále byla na elektrodě E_0 nastavena nulová hodnota elektrického potenciálu.



Obr. 7.11 Plochy pro předepsání okrajových podmínek

Tab. 7.8 Souhrn okrajových podmínek

Plocha	X_0	X_1	E_0	E_1
Okrajové podmínky	$u_x = 0$ $u_y = 0$ $u_z = 0$	$u_y = 0$ F_z	$\phi = 0$	CP_{VOLT}

7.3.5 Další nastavení analýzy

Metoda řešení harmonické analýzy byla zvolena jako *full harmonic*. Poměrný útlum soustavy, použitý pro výpočet, byl určen v podkap. 6.3.

V rámci validace materiálových charakteristik homogenizovaného MFC byla provedena série simulací pro různé hodnoty budicí frekvence, síly a elektrického odporu. Hodnoty frekvence a odporu byly voleny stejné jako při experimentu, budicí síla byla určena dle postupu popsaného v podkapitole věnující se volbě okrajových podmínek. Hmotný bod byl aktivní pouze pro třetí sérii výpočtů.

7.3.6 Porovnání výsledků s experimentem

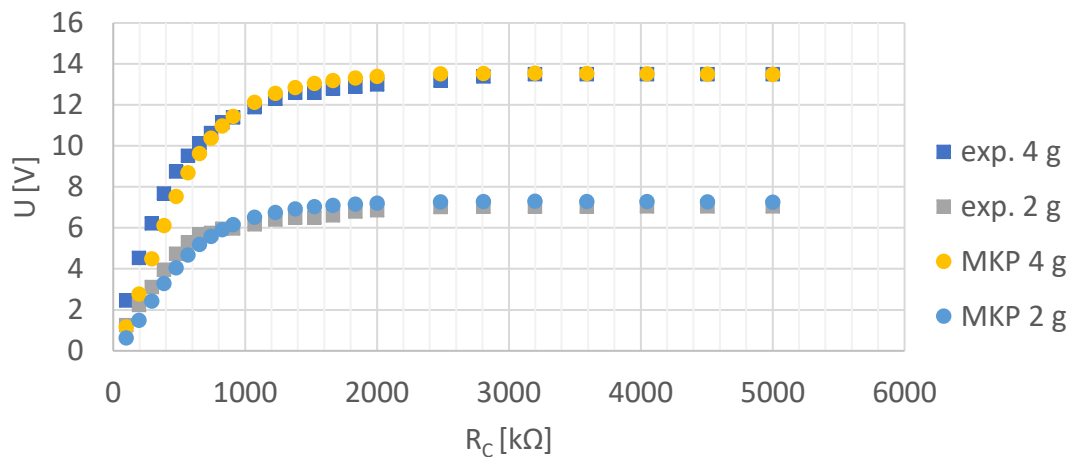
Při vyhodnocování výsledků byla kontrolována shoda výchylky získané z výpočtového modelu v bodě B_1 ve směru osy z s hodnotou, které bod dosahoval při experimentu. Dále byl kontrolován tvar kmitání. Závislosti napětí a výkonu na odporu jsou pro jednotlivé série analýz zobrazeny na Obr. 7.12 až Obr. 7.17.

Z uvedených grafů je patrné, že numerická simulace dobře odpovídá experimentu. Průběhy závislostí jsou ve všech případech téměř shodné. Při porovnávání napětí lze pozorovat významnější rozdíly pouze při nižší elektrické zátěži. Ustálené hodnoty za mezním odporem se neliší o více jak 5 %. V případě výkonů jsou rozdíly již znatelnější, nicméně maximálního výkonu je dosaženo při řádově stejném odporu a rozdíl vůči měření je do 15 %.

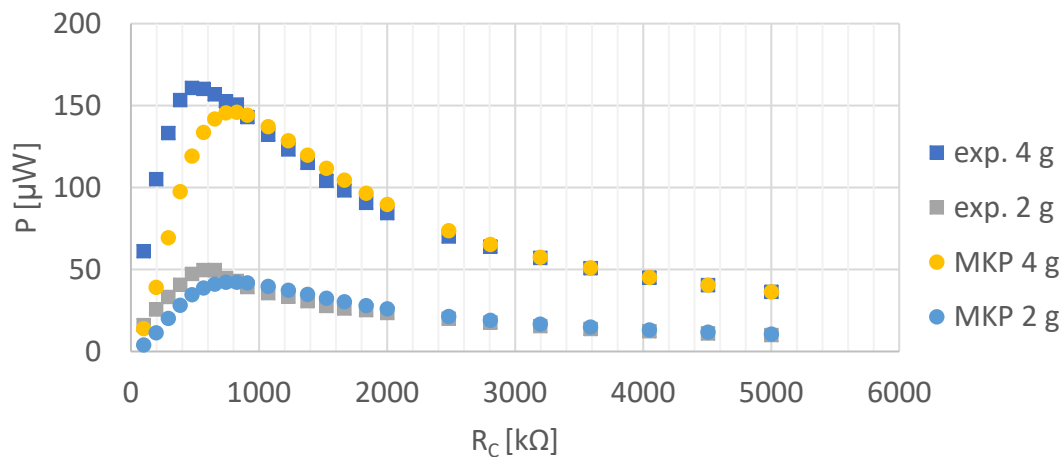
Závěrem lze říci, že materiálové charakteristiky vypsáné v Tab. 7.6 lze použít pro modelování MFC jako homogenního materiálu. Je však třeba zvolit adekvátní hodnotu elektrické zátěže a správné rozměry aktivní vrstvy.

Porovnání se sérií měření č. 1

Nosník bez přidané hmoty buzen na první vlastní frekvenci.



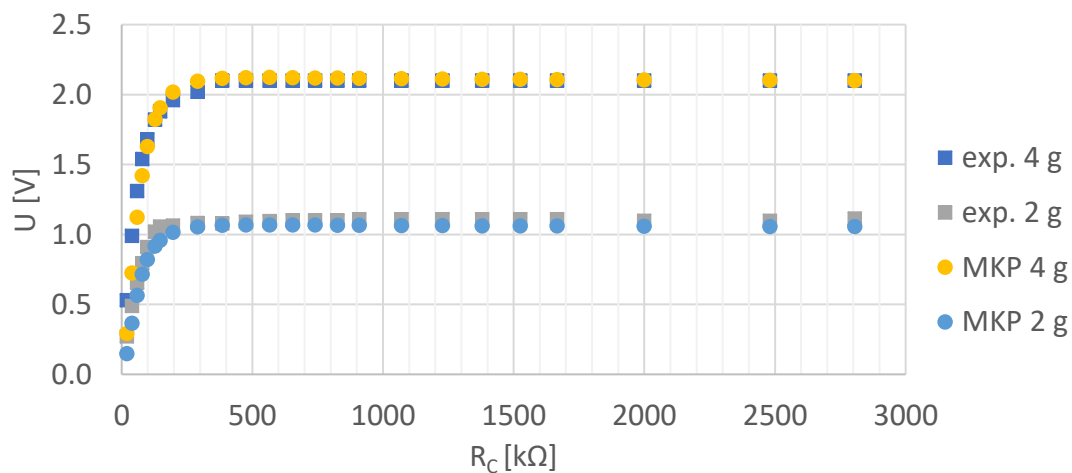
Obr. 7.12 Porovnání závislosti napětí na odporu pro $f = 19,8$ Hz



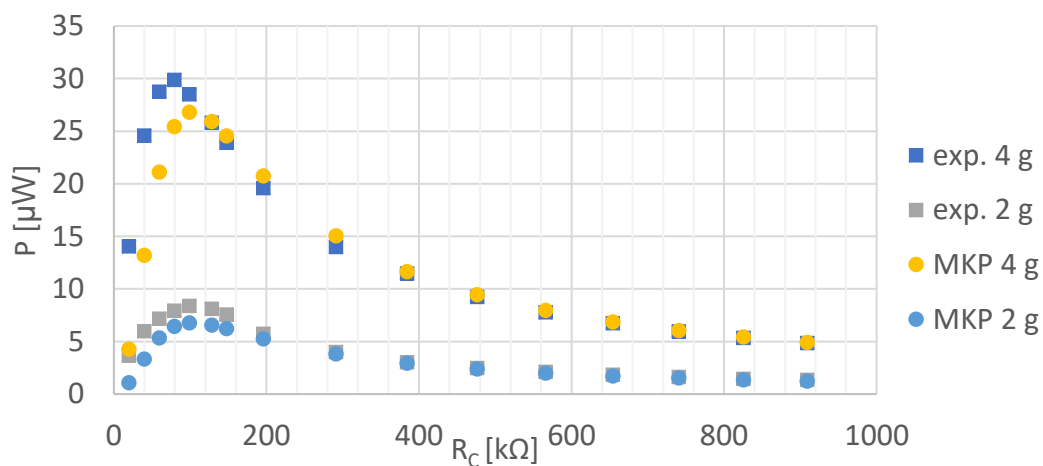
Obr. 7.13 Porovnání závislosti výkonu na odporu pro $f = 19,8$ Hz

Porovnání se sérií měření č. 2

Nosník bez přidané hmoty buzen na druhé vlastní frekvenci.



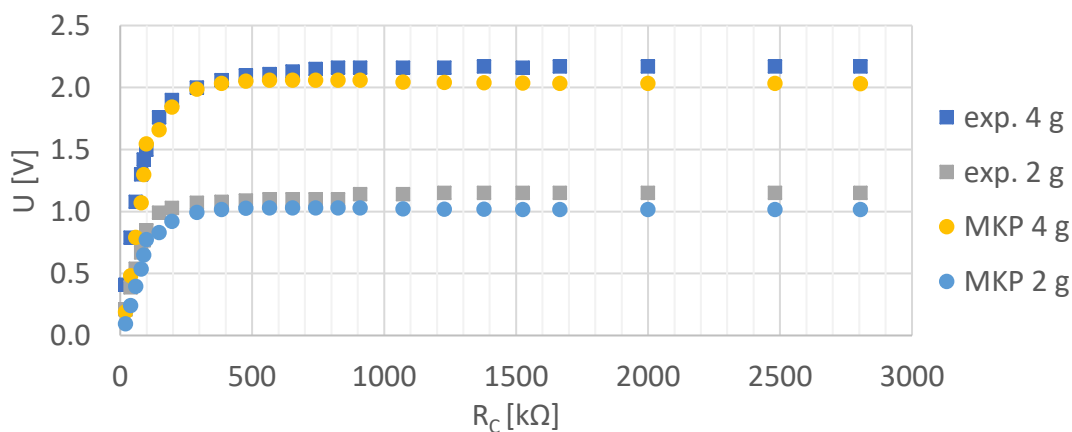
Obr. 7.14 Porovnání závislosti napětí na odporu pro $f = 165,4$ Hz



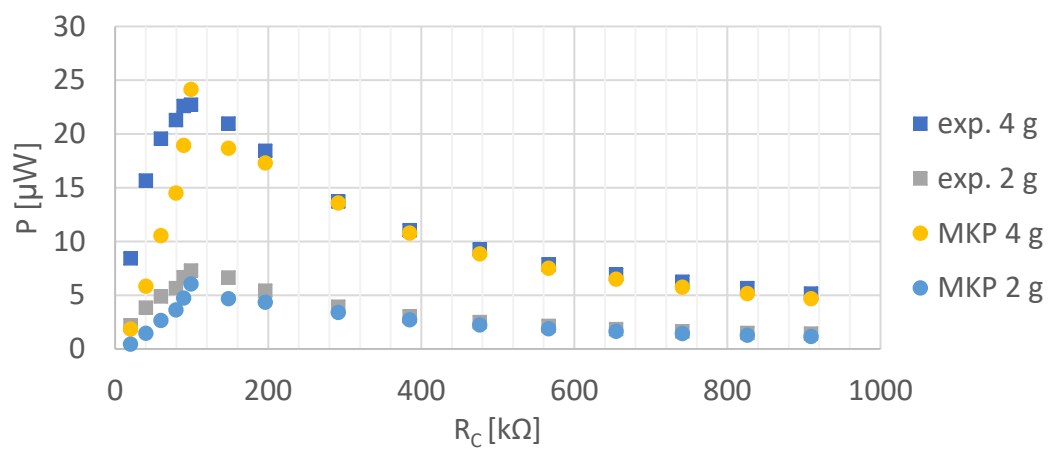
Obr. 7.15 Porovnání závislosti výkonu na odporu pro $f = 165,4$ Hz

Porovnání se sérií měření č. 3

Nosník s přidanou hmotou buzen na druhé vlastní frekvenci.



Obr. 7.16 Porovnání závislosti napětí na odporu pro $f = 120,5$ Hz



Obr. 7.17 Porovnání závislosti výkonu na odporu pro $f = 120,5$ Hz

8 Návrh technické soustavy s MFC snímači

Ve spolupráci Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky a Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky bylo v rámci této diplomové práce navrženo multifunkční testovací zařízení, které v následujícím textu bude označováno jako *rotorstand*. Primárním účelem této testovací stolice je simulace zatížení rotoru rotující nevyváhou.

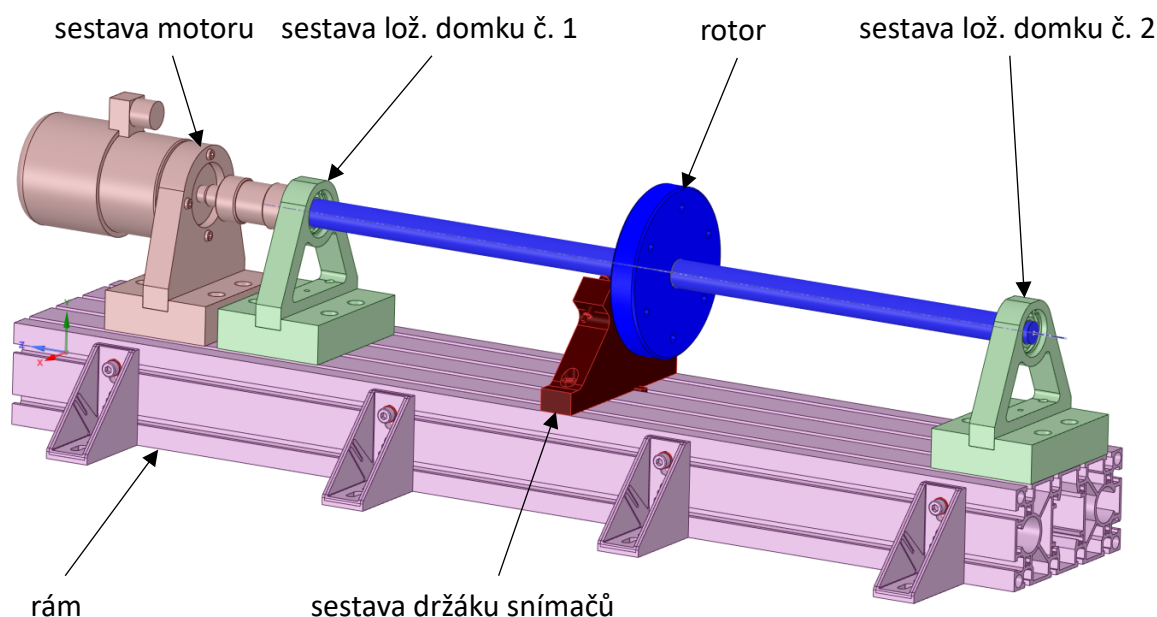
Na zařízení byly kladeny následující požadavky:

- modulární provedení s možností jednoduché výměny jednotlivých konstrukčních celků
- snadná změna nevyváhy
- první vlastní frekvence rotoru v provozním pásmu motoru
- vlastní frekvence rámu mimo provozní pásmo motoru
- měření orbity rotoru pomocí indukčních snímačů
- měření odezvy soustavy pomocí MFC

Pro posouzení návrhu bylo nutné provést modální a harmonickou analýzu soustavy. Veškeré simulace byly provedeny v programu ANSYS 2019 R1. Je nutné brát v potaz, že výše zmíněné typy analýz v daném programu nejsou schopny postihnout nelineární chování. Dále byla vytipována místa vhodná pro umístění MFC a následně byla určena jejich odezva na buzení rotující nevyváhou.

8.1 Konstrukce

Navržené zařízení lze rozdělit do několika konstrukčních celků, a to: rám, rotor, sestava ložiskových domků, sestava motoru a sestava držáku indukčních senzorů. Celé zařízení je zobrazeno na Obr. 8.1, jednotlivé výkresy součástí a sestav jsou uvedeny v přílohách.



Obr. 8.1 Navržená konstrukce

Pro návrh rámu bylo využito konstrukčního profilu vyráběného společností MiniTec. T-drážky v profilu umožňují snadnou montáž dalších konstrukčních celků a také slouží pro jejich vzájemné ustavení. Pro připevnění rámu k základové desce slouží čtyři páry pravouhlých patek.

Rotor se sestává z hřídele a disku. Vzdálenost mezi ložisky je 700 mm. Disk je umístěn ve středu hřídele, což odpovídá konfiguraci Lavalova (Jeffcotova) rotoru. Nevývahu lze vyvolat zašroubováním závrtných šroubů různých hmotností do disku.

Konstrukční celek ložiskových domků se skládá zejména z ložisek, vodící desky a ložiskových domků jako takových. Vodící deska a ložiskový domek jsou vzájemně ustaveny pomocí kolíku. Tato konfigurace umožňuje snadnou výměnu domků pro různé velikosti a typy ložisek. V navrženém zařízení jsou použita kuličková ložiska SKF 6004-ZNR.

K pohonu rotoru slouží trojfázový asynchronní elektromotor Atas FT4C s maximálními otáčkami 24 000 ot./min. Ten je upevněn v držáku obdobné konstrukce, jako je použito v případě sestavy ložiskových domků. S hřídelí je spojen pomocí pružné spojky RotexGS.

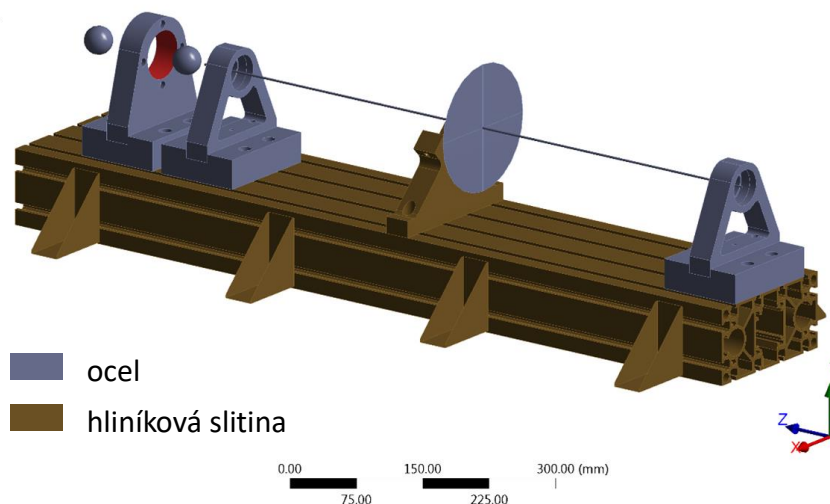
Indukční snímače polohy jsou umístěny v držáku indukčních snímačů. Poloha vůči ose hřídele je zajištěna opět pomocí T-drážky v profilu.

8.2 Modální analýza

Cílem modální analýzy bylo získat vlastní frekvence a tvary kmitání soustavy. Podle požadavků na návrh musí být první vlastní frekvence rotoru v provozním pásmu otáček motoru (0–400 Hz) a vlastní frekvence rámu musejí ležet mimo toto pásmo.

8.2.1 Model geometrie

Navrženou soustavu bylo nutné pro výpočet zjednodušit. Byly odstraněny všechny drobné komponenty, jejichž hmotnost je vzhledem k celku nepodstatná. Jednalo se o šrouby, podložky, matky apod. Motor a spojka byly nahrazeny hmotnými body. Hřídel byla nahrazena pouze její střednicí. Disk ve středu hřídele byl modelován pomocí střednicové plochy s danou tloušťkou, stejně tak patky připevňující rám k základu. Při úpravě geometrie byl kladen důraz na zachování hmotnosti jednotlivých komponent použitých ve výpočtu. Model geometrie je zobrazen na Obr. 8.2.



Obr. 8.2 Model geometrie použitý pro modální analýzu

8.2.2 Model materiálu

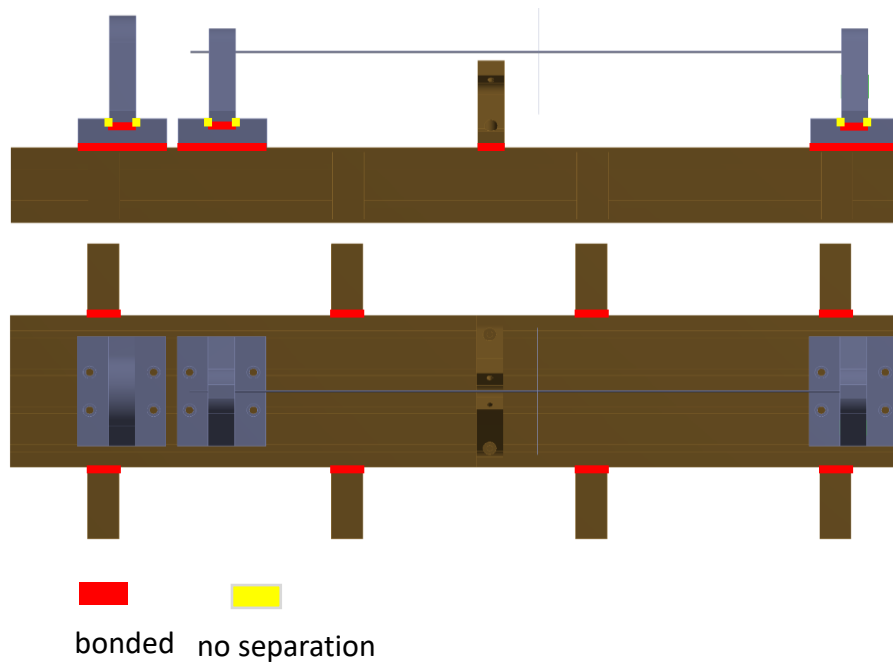
Ve výpočtovém modelu byly použity materiálové modely pro ocel a hliníkovou slitinu. V obou případech byl zvolen izotropní, lineárně elastický model materiálu. Materiálové charakteristiky jsou uvedeny v Tab. 8.1.

Tab. 8.1 Materiálové charakteristiky jednotlivých komponent

	ocel	dural
použito na	hřídel disk ložiskové domky držák motoru vodící desky	nosný profil patky držák snímačů
E [GPa]	210,0	68,9
μ[-]	0,30	0,33
G [GPa]	80,7	25,9
ρ[kg/m³]	7850	2700

8.2.3 Model kontaktů

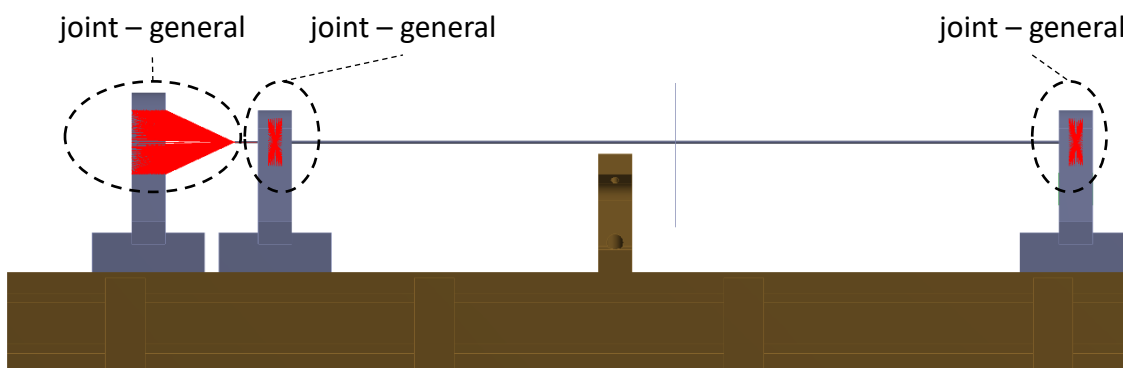
Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, použité typy analýz podporují pouze lineární řešení. Lze tedy použít pouze kontakty typu *bonded* a *no separation*. Kontakty typu *bonded* byly aplikovány na plochy, které jsou navzájem sešroubované. Tento typ zajišťuje, že kontaktní plochy se po sobě navzájem nemohou pohybovat. Kontakt typu *no separation* zajišťuje svázání posuvů kontaktních ploch ve směru jejich normál. Plochy po sobě mohou bez tření klouzat, nicméně nemohou se od sebe oddálit, ani sebou navzájem procházet. Lokace jednotlivých kontaktních párů a typy kontaktů jsou zobrazeny na Obr. 8.3.



Obr. 8.3 Kontaktní plochy a použité typy kontaktů

Bylo také nutné vhodným způsobem modelovat interakci mezi hřídelí a ložiskovými domky. Geometrii ložiska lze nahradit prvkem *bearing* popřípadě *joint*. *Bearing* je definován čtvercovými maticemi 2x2, které popisují tuhost a tlumení ložiska. V případě krátkých tuhých hřídelů je naprosto dostačující. Není však schopen postihnout vzájemné naklápění vnitřního a vnějšího kroužku ložiska, které je způsobeno například výrazným průhybem hřídele. Z tohoto důvodu byl zvolen prvek *joint*, který lze použít v několika různých konfiguracích. Při použití typu *general* je definován maticemi tuhosti a tlumení o rozměrech 6x6. Matice tuhosti použitého ložiska byla získána s ohledem na jeho zatížení pomocí programu MESYS RBC. Tlumení ložiska nebylo uvažováno.

Spojení motoru a hřídele pomocí pružné spojky bylo modelováno také pomocí kontaktů typu *joint – general*. Tuhostní charakteristiky spojky jsou uvedeny v jejím technickém listě [33]. Nahrazení ložisek a spojky je zobrazeno na Obr. 8.4.



Obr. 8.4 Nahrazení ložisek a pružné spojky

8.2.4 Síť a použité prvky

Pro tvorbu sítě bylo v tomto případě použito větší množství druhů elementů než pro modely vytvořené v kapitole 7. Z tohoto důvodu nejsou vypsány jejich přesná označení, ale pouze jednotlivé typy a tělesa, na které byly použity. Při tvorbě sítě pro modální analýzu byl kladen důraz na rovnoměrné rozložení velikosti elementů.

Tab. 8.2 Přehled použitých typů elementů

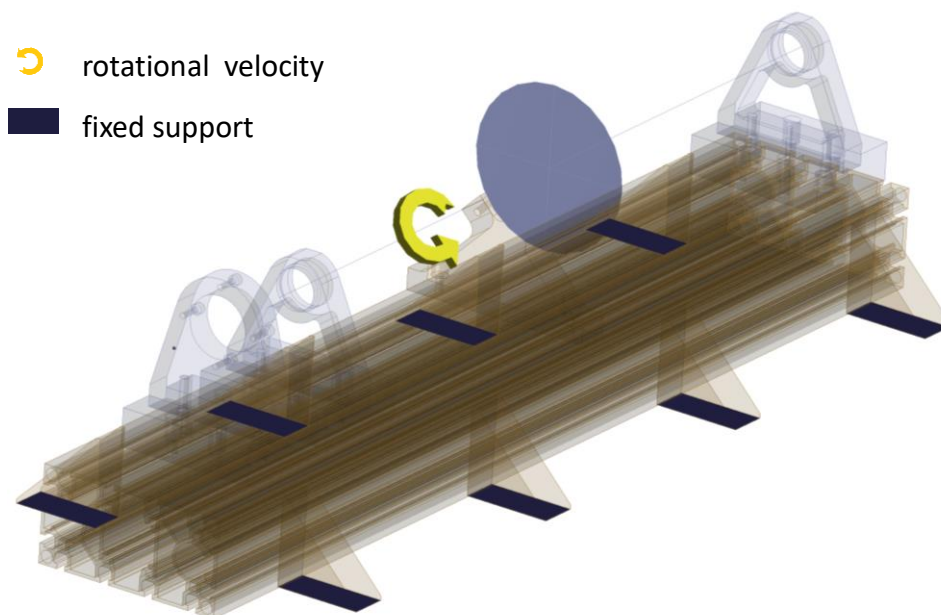
typ elementu	použito na
objemové prvky	ložiskové domky držák motoru vodící desky nosný profil držák snímačů
skořepinové prvky	patky disk
prutové prvky	hřídel
hmotný bod	motor spojka
kontaktní prvky	viz Obr. 8.3
joint	viz Obr. 8.4

8.2.5 Nastavení modální analýzy a okrajové podmínky

Pro analýzu bylo voleno takové nastavení, které zohledňovalo vliv gyroskopických účinků na disk ve středu hřídele. Počet zjišťovaných vlastních tvarů byl roven 10.

Na sestavu hřídele s diskem byla aplikována okrajová podmínka *rotational velocity* simulující otáčky motoru. Zvolené hodnoty otáček byly ekvivalentně rozloženy v rozmezí 0–400 Hz a pokrývaly tak celé provozní pásmo motoru.

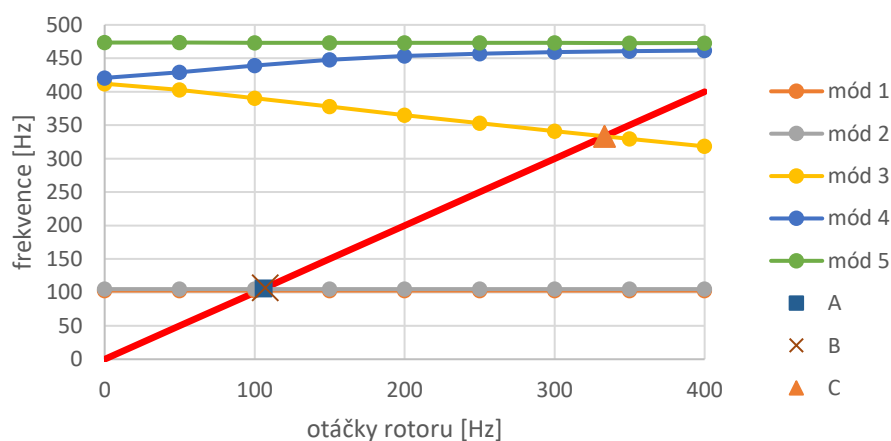
Při provozu bude zařízení pevně přišroubováno k desce přes upevňovací patky. Toto připevnění je simulováno pomocí okrajové podmínky *fixed support*, která odebírá uzlům na příslušných plochách všechny stupně volnosti viz Obr. 8.5. Simulované uložení zařízení je méně tuhé, než bude v reálu. Důvodem je nezahrnutí kontaktu mezi spodní plochou nosného profilu a základovou deskou do výpočtu. Jeho zahrnutí do výpočtu by bylo poměrně složité a lze předpokládat, že výsledná vlastní frekvence rámu by se posunula k vyšším frekvencím, tedy dále od provozního pásma otáček motoru.



Obr. 8.5 Použité okrajové podmínky pro modální analýzu

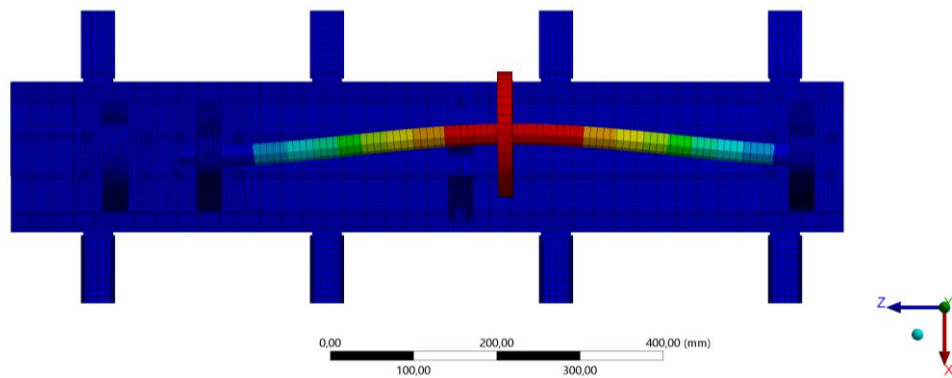
8.2.6 Vyhodnocení výsledků modální analýzy

Ze získaných výsledků byl sestaven Campbellův diagram zobrazený na Obr. 8.6. Z diagramu je patrné, že v provozním pásmu motoru dojde k vybuzení celkem tří vlastních tvarů soustavy. Kritické otáčky, při kterých dojde k vybuzení některého z vlastních tvarů, jsou reprezentovány průsečíky A, B, C a jejich hodnoty jsou 102,3 Hz, 105,8 Hz a 333,4 Hz.

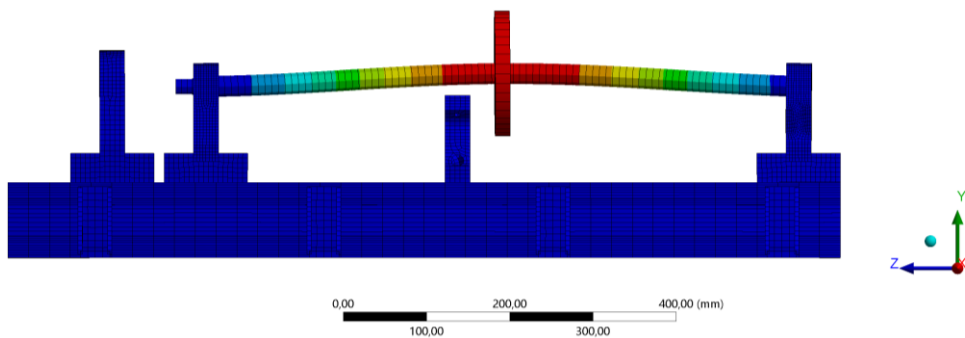


Obr. 8.6 Campbellův diagram

V prvních dvou módech hřídel kmitá na 1. ohybovém tvaru při frekvencích 102,3 Hz a 105,8 Hz v osách x a y viz Obr. 8.7 a Obr. 8.8. Tyto dvě vlastní frekvence se v zadaném rozsahu otáček nemění. To lze zdůvodnit tím, že nedochází k naklápění disku ve středu hřídele, a tudíž se neprojevují vlivy gyroskopických účinků. Rozdíl v hodnotách frekvencí je způsoben rozdílnou tuhostí ložiskových domků v daných směrech.

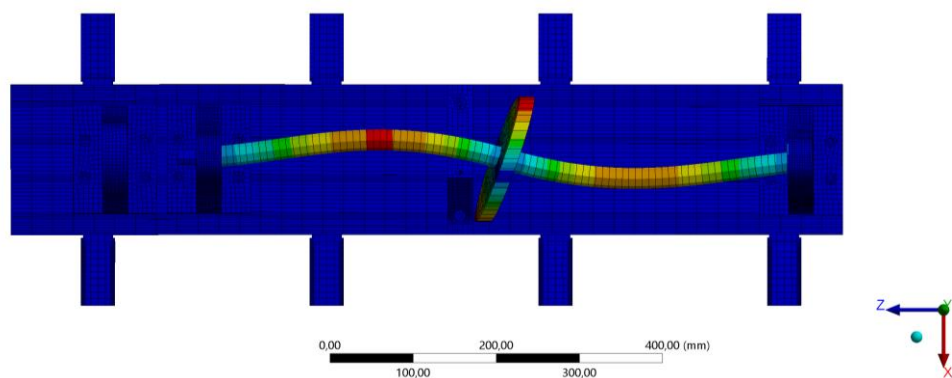


Obr. 8.7 První tvar kmitání soustavy – $\Omega_1 = 102,3$ Hz



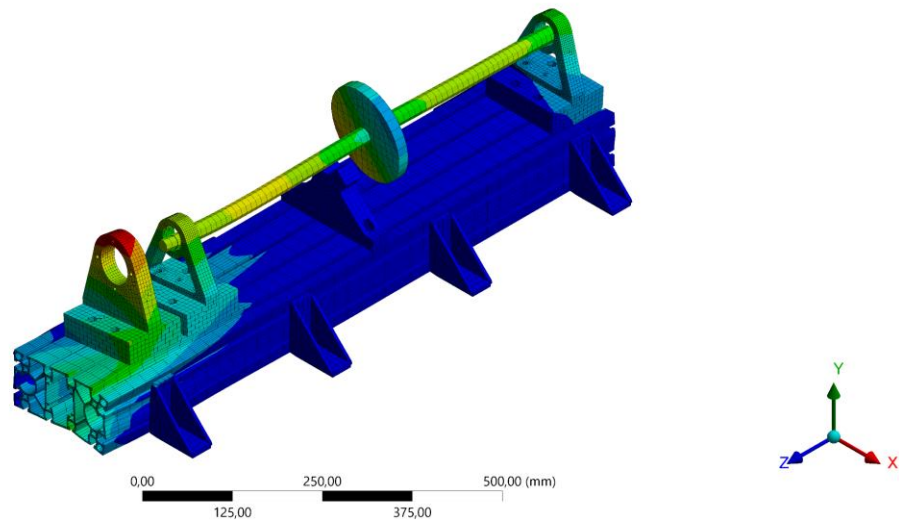
Obr. 8.8 Druhý tvar kmitání soustavy – $\Omega_2 = 105,8$ Hz

Ve třetím módu je dominantní kmitání hřídele na 2. ohybovém tvaru ve směru x viz Obr. 8.9, ve čtvrtém módu pak hřídel kmitá na 2. ohybovém tvaru ve směru y . Při vybuzení těchto tvarů dochází již k naklápění disku ve středu hřídele a projevují se gyroskopické účinky. Ty způsobují, že vlastní frekvence pro třetí mód klesá s rostoucími otáčkami, a proto dojde k vybuzení tohoto vlastního tvaru v provozním pásmu motoru. V případě čtvrtého módu vlastní frekvence narůstá a tento tvar tedy nebude vybuzen.



Obr. 8.9 Třetí tvar kmitání soustavy – $\Omega_3 = 412\text{--}318$ Hz

Kmitání rámu se začíná výrazněji projevovat až na 5. vlastní frekvenci soustavy, jejíž hodnota je 475 Hz. Obr. 8.10 zobrazuje tvar kmitání soustavy na této frekvenci. Jak je patrné z Campbellova diagramu, tato frekvence se v celém provozním pásmu výrazněji nemění.



Obr. 8.10 Pátý tvar kmitání soustavy – $\Omega_5 = 475$ Hz

8.3 Harmonická analýza

Cílem harmonické analýzy bylo posouzení návrhu z hlediska mezního stavu pružnosti a mezního stavu deformace. Mezní stav pružnosti nastává, pokud dojde k překročení meze kluzu na kterékoliv součásti. K dosažení mezního stavu deformace dojde, pokud se vymezí vůle mezi hřídelí a držákem snímačů.

8.3.1 Model geometrie

V případě harmonické analýzy již nebylo možné nahradit hřídel pouze její střednicí. Pro výpočet byla použita originální geometrie včetně konstrukčních detailů jako rádiusy, sražení hran apod. Stejně tak disk ve středu hřídele byl ponechán v originální podobě. Ostatní zjednodušení zůstaly zachovány.

8.3.2 Model materiálu

Použité materiálové modely byly stejné jako v případě modální analýzy a jejich charakteristiky jsou uvedené v Tab. 8.1.

8.3.3 Model kontaktů

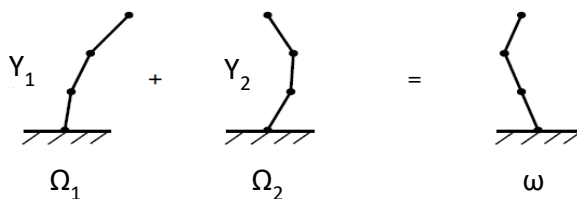
I v tomto bodě nedošlo k téměř žádným změnám. Jediným rozdílem je přidání kontaktního páru mezi hřídel a disk. Ty budou v reálné konstrukci slepeny. Byl proto použit kontakt typu *bonded*.

8.3.4 Síť a použité prvky

Rozdílem oproti předchozímu modelu je, že na hřídel a disk byly použity objemové elementy. Typy prvků použitých pro ostatní části zůstaly zachovány. Pro vytvoření sítě byly zvoleny kvadratické elementy. Lokální nastavení zajišťovala dosažení jemnějšího rozložení prvků v místech, kde lze předpokládat koncentrátoři napětí. Výsledky harmonické analýzy byly vyhodnocovány na síti, u níž byla ověřena její konvergence.

8.3.5 Nastavení harmonické analýzy a okrajové podmínky

Programové prostředí ANSYS umožňuje řešit harmonické analýzy pomocí dvou přístupů. První použitelnou metodou řešení je tzv. *full harmonic*. Při zvolení této metody je vždy počítána harmonická analýza pro danou budící frekvenci. Druhou z nich je *mode superposition method*, zkráceně MSUP. Při řešení touto metodou je využito znalosti vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání dané soustavy. Výsledné řešení pro danou frekvenci je pak dáno superpozicí jednotlivých tvarů kmitání – Obr. 8.11. V úvahu je brán také váhový koeficient závislý na poměru řešené frekvence a vypočtených vlastních frekvencí.

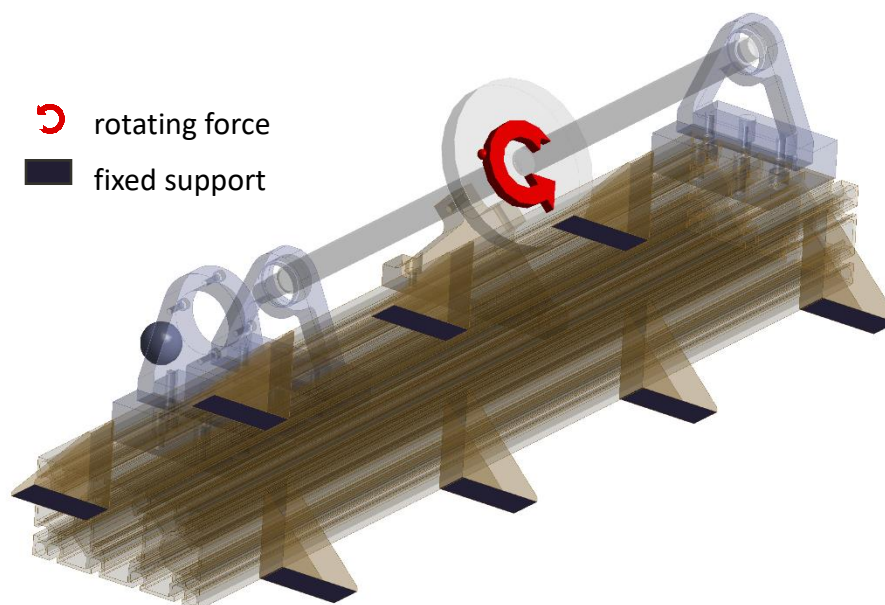


Obr. 8.11 Skládání vlastních tvarů – MSUP

Při řešení této úlohy byla použita metoda *full harmonic*, protože na rozdíl od MSUP umožňuje zohlednit gyroskopické účinky, jejichž vliv nelze opomenout. Vzhledem k její vyšší výpočtové náročnosti byly budící frekvence nerovnoměrně rozmístěny v rozmezí 0–400 Hz. V okolí kritických otáček soustavy bylo voleno jemnější rozložení budících frekvencí.

Hodnota poměrného útlumu soustavy byla zvolena jako standardní hodnota pro ocelové konstrukce, tedy 0,02.

Uchycení k základové desce bylo simulováno stejně jako v případě modální analýzy viz Obr. 8.12. Soustava byla buzena rotující nevývahou o maximální hmotnosti 5 g na poloměru 60 mm – tzn. 300 gmm. Tyto účinky byly simulovány pomocí okrajové podmínky *rotating force*.

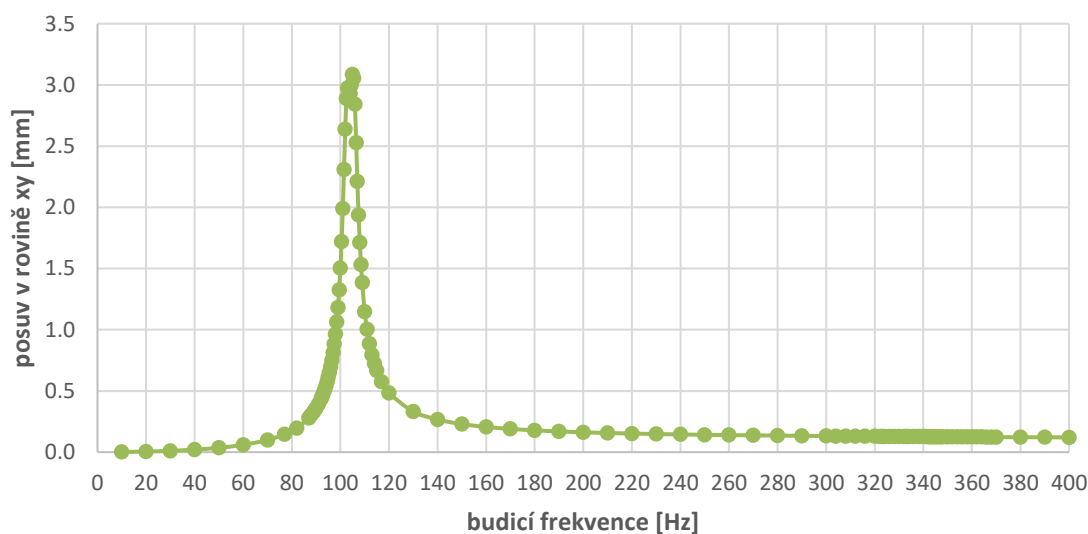


Obr. 8.12 Okrajové podmínky pro harmonickou analýzu

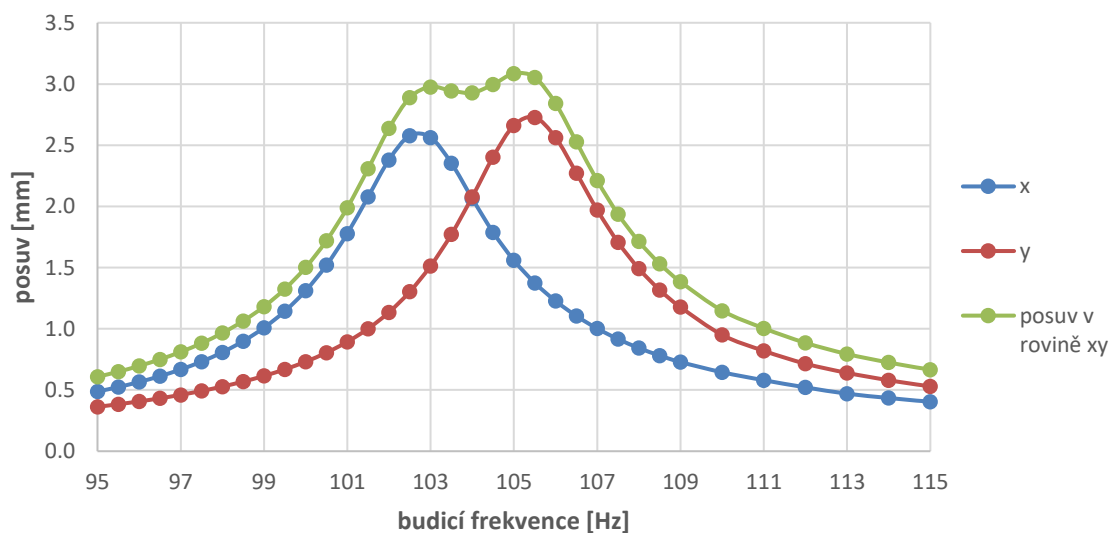
8.3.6 Kontrola mezního stavu deformace

Mezní stav deformace by nastal, pokud by došlo k vymezení vůle mezi hřídelí a držákem indukčních snímačů polohy. Hodnota průhybu byla vyhodnocována ve středu hřídele, který opisuje trajektorii ve tvaru elipsy. Délku hlavní poloosy lze vypočítat z průhybů v jednotlivých směrech x a y . Na Obr. 8.13 je zobrazena závislost maximální výchylky středu hřídele v rovině xy na budicí frekvenci v celém provozním pásmu motoru.

Obr. 8.14 poskytuje detailnější pohled na oblast maxima. Je patrné, že největších posunutí v směrech x a y je dosaženo při frekvencích, kdy dojde k vybuzení příslušných vlastních tvarů. Maximální výchylky v rovině xy je dosaženo při frekvenci 105 Hz a její hodnota je 3,1 mm.



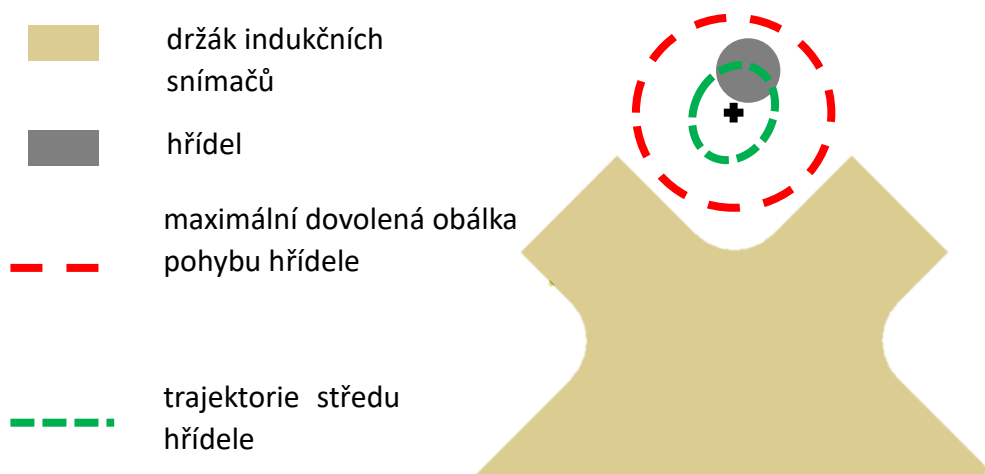
Obr. 8.13 Závislost amplitudy posuvu středu hřídele na budicí frekvenci



Obr. 8.14 Závislost amplitudy posuvu středu hřídele na budicí frekvenci – detail

Dovolená obálka pohybu hřídele má poloměr 20 mm, při rezonanci opisuje vnější povrch hřídele elipsu s délkou hlavní poloosy 15,1 mm. Relativní pohyb držáku indukčních snímačů

vůči hřídeli lze zanedbat. Zmíněná situace je schematicky naznačena na Obr. 8.15 a lze konstatovat, že k meznímu stavu nedojde.



Obr. 8.15 Trajektorie středu hřídele

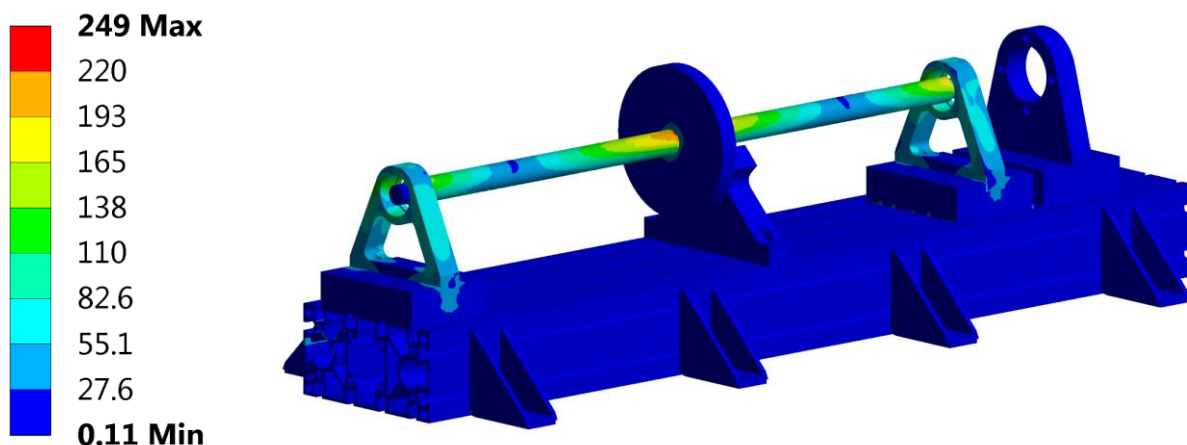
8.3.7 Kontrola mezního stavu pružnosti

Při kontrole mezního stavu pružnosti byla porovnávána hodnota redukovaného napětí HMH (dále v textu pouze redukované napětí) a hodnoty dovoleného napětí – viz Tab. 8.3. Dovolené hodnoty napětí odpovídají koeficientu bezpečnosti 1,5 vůči MS pružnosti.

Tab. 8.3 Meze kluzu a dovolené hodnoty napětí jednotlivých materiálů

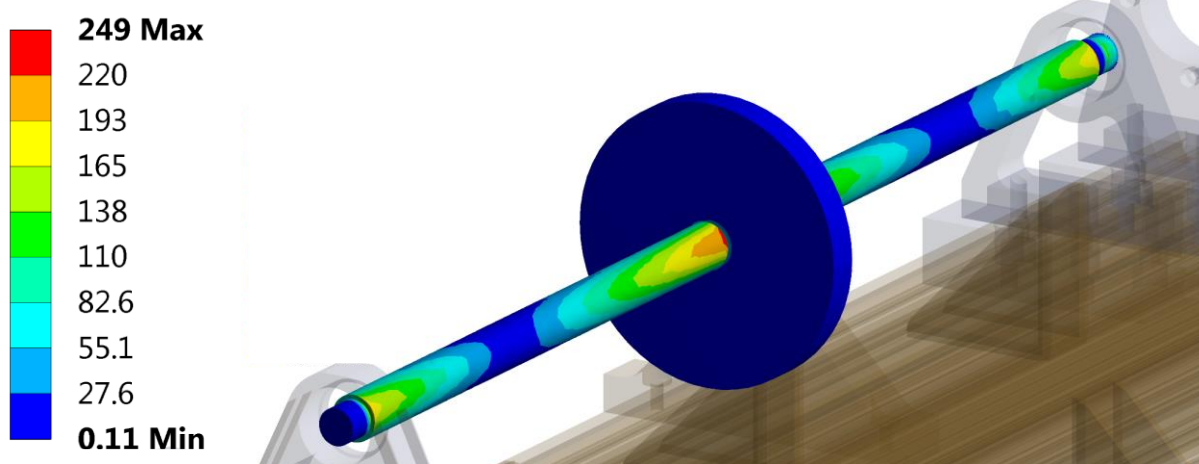
materiál	použito na	mez kluzu [MPa]	dovolené napětí [MPa]
S355 J2	ložiskové domky	355	235
S235 JR	disk držák motoru vodicí desky	235	157
20MnV6	hřídel	440	290
Al6063	nosný profil patky	195	130
Al6061	držák snímačů	250	167

Stejně jako v předchozím případě maximálních hodnot redukovaného napětí je dosaženo při vybuzení prvních ohybových tvarů hřídele. Nejvyšších hodnot napětí dosahuje na ložiskových domcích a hřídeli – viz Obr. 8.16. Na ostatních součástech hodnoty redukovaného napětí nepřesahovaly 100 MPa a MS pružnosti na nich tedy nenastane. Stejně tak při buzení soustavy mimo kritické otáčky je redukované napětí několikanásobně nižší.



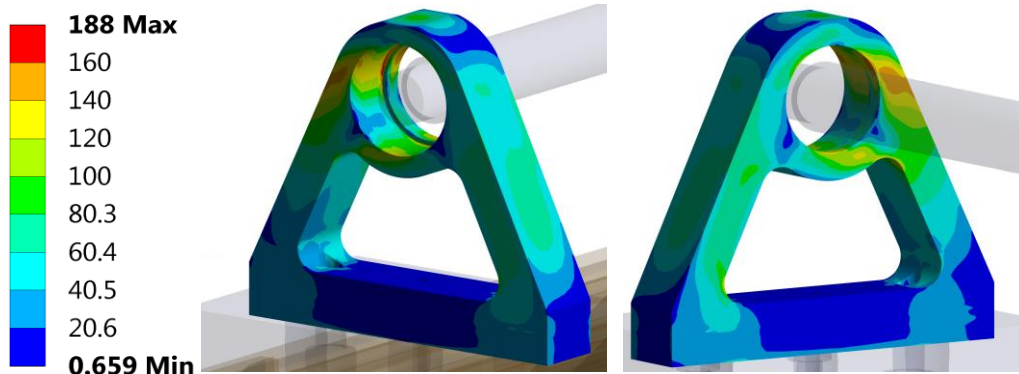
Obr. 8.16 Maximální hodnoty amplitudy redukované napětí HMH v provozním pásmu motoru – celá soustava

Detailnější pohled na průběh redukovaného napětí na rotoru je na Obr. 8.17. Podle očekávání bylo nevyšších hodnot dosaženo ve středu hřídele. Charakter uložení také způsobuje nárůst napětí v blízkosti náhrad ložisek. Nicméně v žádné oblasti nedošlo k překročení maximální dovolené hodnoty 290 MPa.

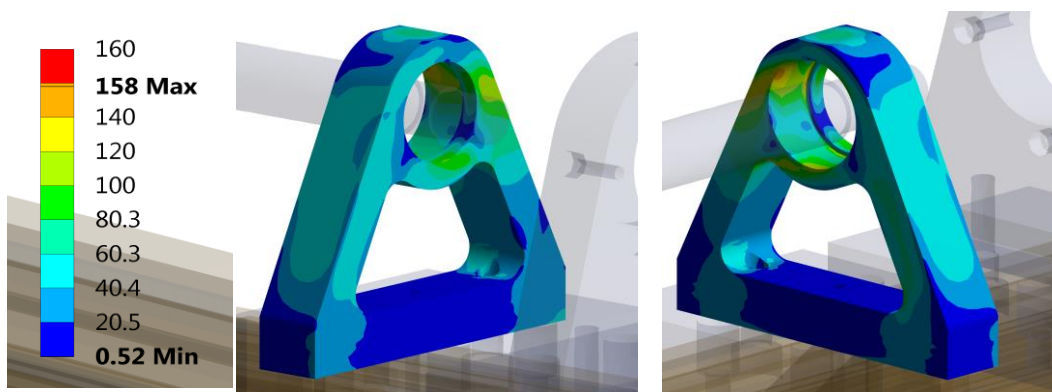


Obr. 8.17 Maximální hodnoty amplitudy redukovaného napětí HMH v provozním pásmu motoru – rotor

K meznímu stavu pružnost nedošlo ani na ložiskových domcích viz Obr. 8.18 a Obr. 8.19. Obecně vyšších hodnot bylo dosaženo na ložiskovém domku č. 1 (vzdálenější od motoru). Ve skutečnosti jsou ložiska jak v domcích, tak i na hřídeli nalisována, což do těchto součástí vnáší další napjatost. Zahrnutí těchto vlivů není uvažováno, protože lze předpokládat, že nemají markantní vliv na hodnocení MS pružnosti.



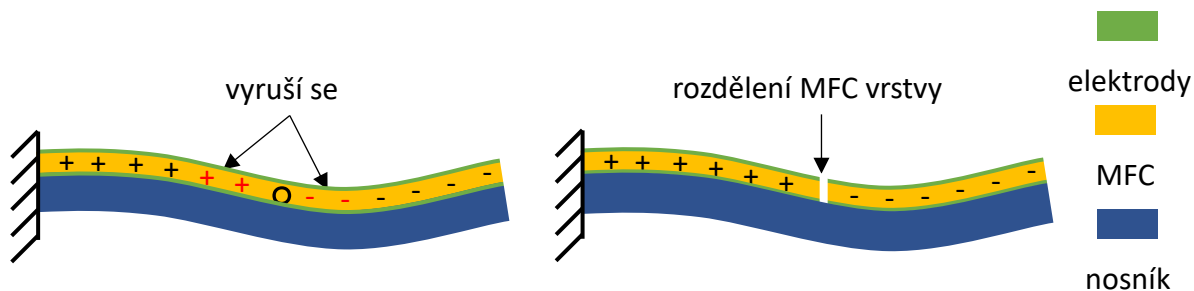
Obr. 8.18 Maximální hodnoty amplitudy redukovaného napětí HMH v provozním pásmu motoru – ložiskový domek č. 1



Obr. 8.19 Maximální hodnoty amplitudy redukovaného napětí HMH v provozním pásmu motoru – ložiskový domek č. 2

8.4 Výběr pozice pro umístění MFC snímačů

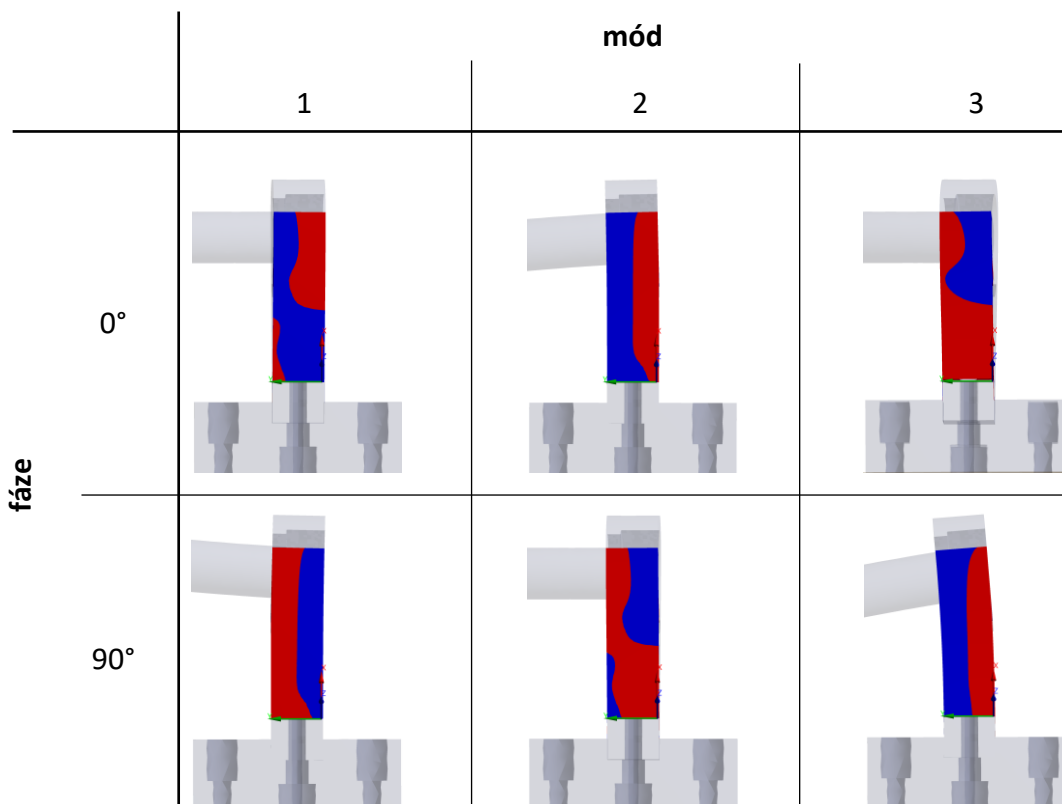
Jak již bylo několikrát zmíněno, napětí generované MFC snímači je závislé zejména na přetvoření. Velikost a umístění snímačů je proto vhodné volit tak, aby se nacházely v oblasti se stejným znaménkem přetvoření. Nevhodná pozice může vést k tomu, že MFC bude generovat menší napětí, než by bylo potenciálně možné. V krajním případě nebude generovat napětí žádné. Často je výhodné piezoelektrickou vrstvu rozdělit podle uzlových linií pro dané tvary kmitání. Demonstrativní příklad je na Obr. 8.20 [34], který znázorňuje 2. vlastní tvar kmitání vetknutého nosníku. Je patrné, že při rozdělení MFC vrstvy nebude docházet k vyrušování náboje a maximální amplituda napětí na jednotlivých vrstvách tak vzroste.



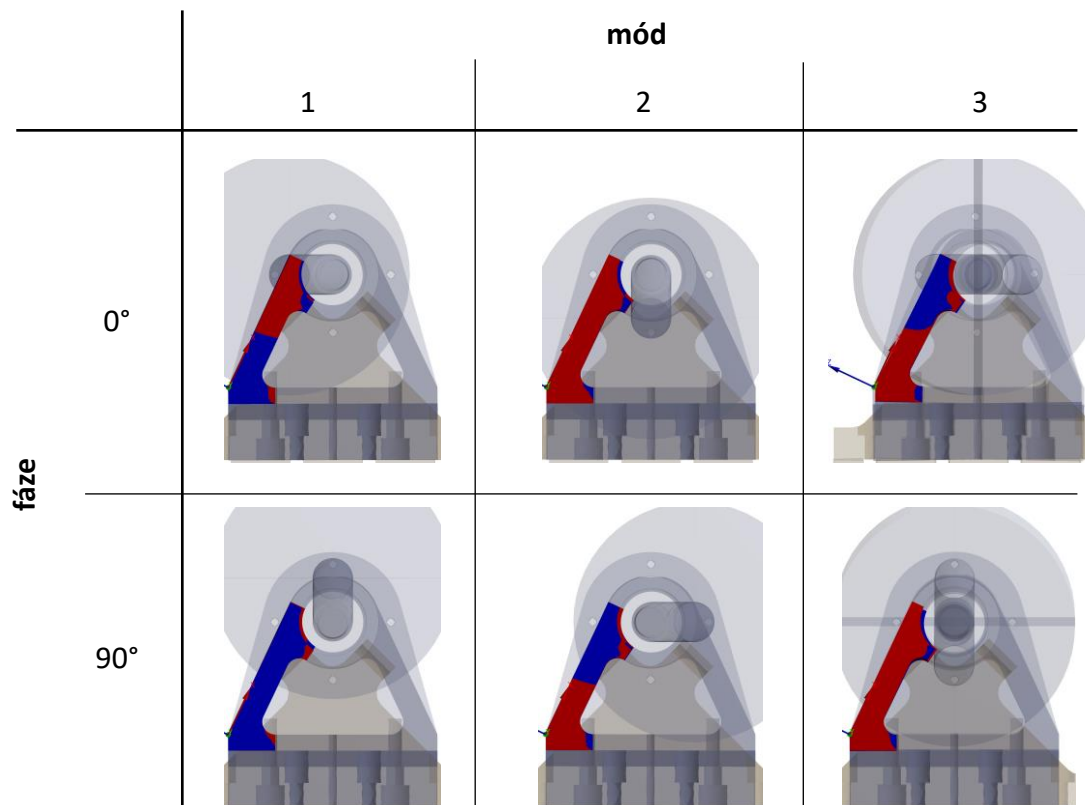
Obr. 8.20 Ukázka vyrušování náboje

V případě rotorstandu je vhodné MFC vrstvy umístit na ložiskové domky, konkrétně na jejich ramena. Oblasti s konstantní hodnotou přetvoření byly určeny vyhodnocením vlastních tvarů získaných při modální analýze. Tvary kmitání pro oba ložiskové domky jsou téměř totožné. Nicméně z harmonické analýzy vyplývá, že vyšších hodnot přetvoření je dosaženo na ložiskovém domku č. 1, a proto byl vybrán k osazení MFC vrstvami. Obr. 8.21 a Obr. 8.22 zobrazují jednotlivé oblasti kladného a záporného přetvoření na ložiskovém domku č. 1 pro dané módy kmitání a fáze. Je nutné podotknout, že se jedná pouze o kvalitativní posouzení polí přetvoření. Vykresleno je přetvoření ve směru osy x , jejíž směr je vždy totožný s delší hranou vybrané plochy. Modré oblasti symbolizují záporné hodnoty přetvoření, červené naopak kladné. Rozložení přetvoření na zadní a vnitřní ploše ramene bylo obdobné jako na zobrazených příkladech, a proto zde není uvedeno.

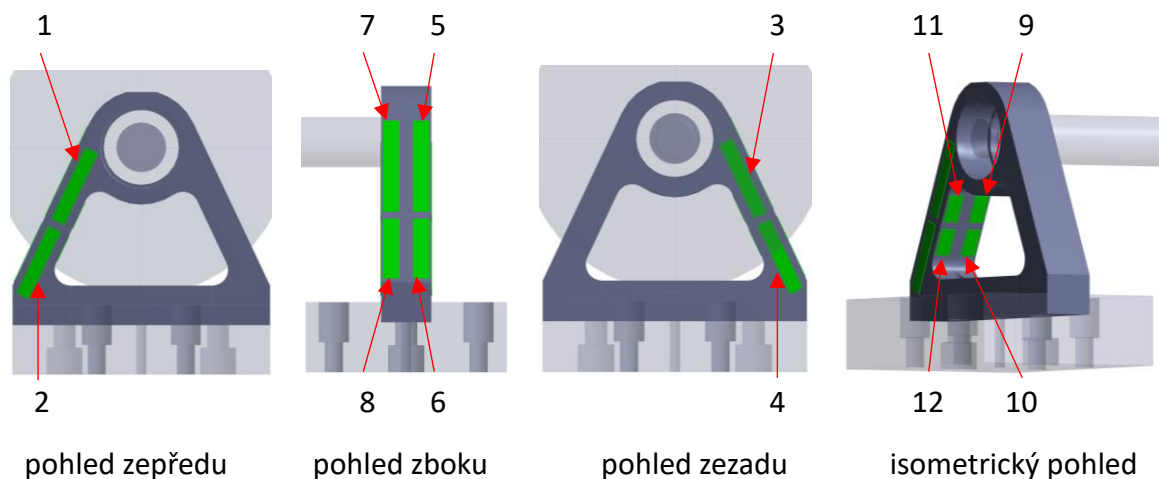
Rozborem zmíněných polí přetvoření lze určit vhodné velikosti a rozmístění jednotlivých snímačů. Pro všechny MFC byla zvolena šířka aktivní vrstvy 8 mm. Jedná se o nejužší běžné dostupné MFC snímače. Délku, na rozdíl od šířky, lze volně přizpůsobovat. Dojde sice k porušení krycích vrstev chránících snímač proti vnějším vlivům, nicméně jeho funkčnost by měla být zachována. Zvolené délky pro jednotlivé oblasti se pohybovaly v rozmezí 10–50 mm. Model geometrie použitý pro harmonickou analýzu byl tedy rozšířen celkem o 12 MFC vrstev, jak je patrné z Obr. 8.23. Tyto vrstvy byly modelovány způsobem popsáním v 7.3, hodnota odporu připojené zátěže byla 10 M Ω . Následně byla provedena harmonická analýza se stejnými okrajovými podmínkami jako v předešlé podkapitole.



Obr. 8.21 Oblasti kladných a záporných přetvoření na ložiskovém domku č. 1 – pohled zboku



Obr. 8.22 Oblasti kladných a záporných přetvořen na ložiskovém domku č. 1 – pohled zepředu

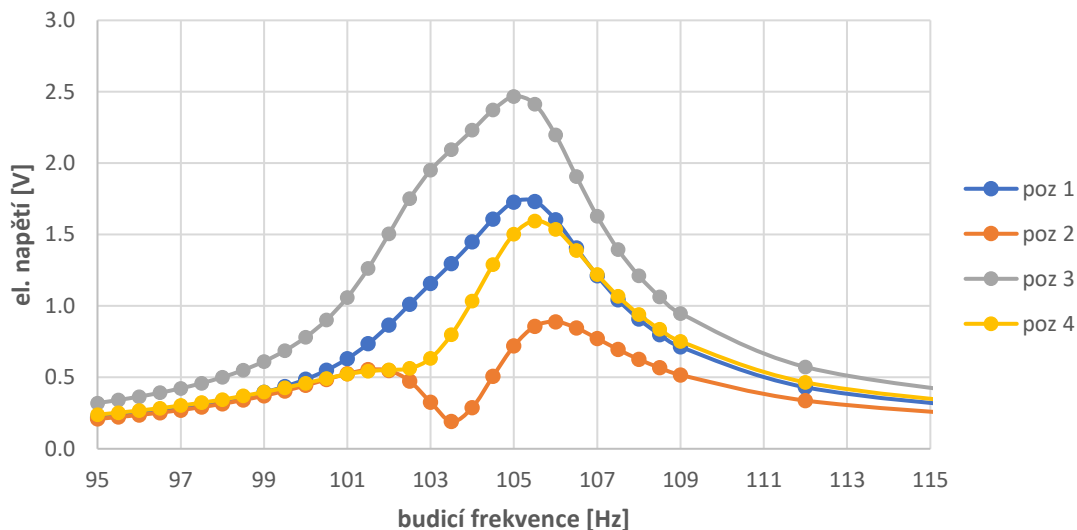


Obr. 8.23 Pozice MFC snímačů na ložiskovém domku č. 1

8.4.1 Vyhodnocení signálu pro jednotlivé lokace

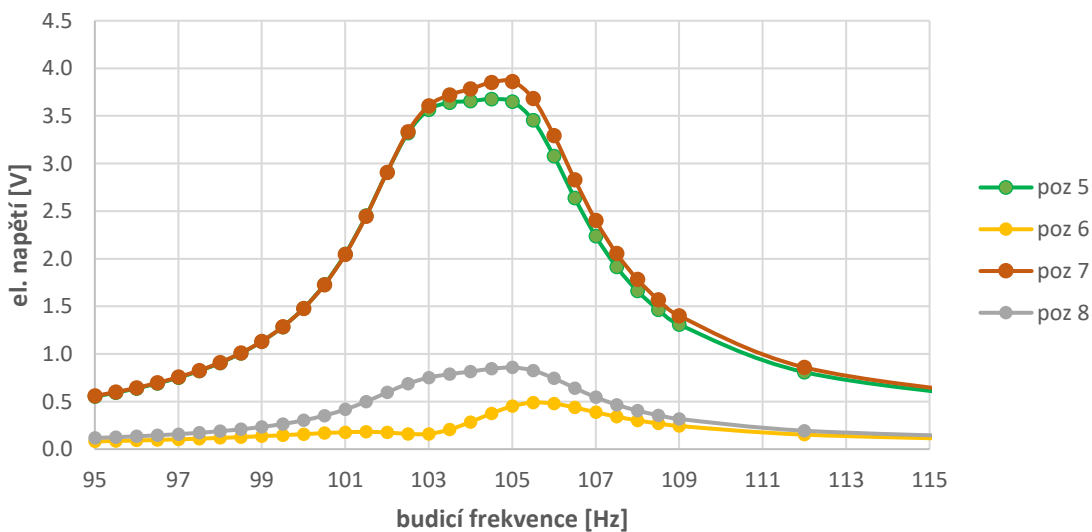
Z harmonické analýzy byly získány amplitudo-frekvenční charakteristiky (AF) odezvy MFC vrstev. MFC snímače na jednotlivých pozicích vykazovaly poměrně velké rozdíly v hodnotách elektrického napětí i jeho průběhu. Tyto rozdíly lze přisoudit rozdílným velikostem vrstev a také různým hodnotám přetvoření v daných lokacích. Maximálních hodnot amplitudy napětí bylo pro všechny pozice dosaženo při frekvencích, ve kterých hřídel kmitá na 1. ohybovém

tvary. Podrobnější rozbor jednotlivých odezev je popsán níže. V pásmu frekvencí, kde dochází k vybuzení 3. tvaru kmitání soustavy, byl nárůst napětí řádově menší než při vybuzení prvních dvou tvarů. Důvodem je nižší hodnota přetvoření na ložiskových domcích. Jak je patrné z hodnocení MS tento tvar nepatří mezi ty nejnebezpečnější, a proto není vyhodnocován detailnější průběh odezvy MFC.



Obr. 8.24 Odezva MFC na pozicích 1–4

Amplitudo-frekvenční charakteristiky elektrického napětí pro MFC na pozicích 1–4 jsou zobrazeny na Obr. 8.24. Průběh napětí pro MFC na pozici 2 se od ostatních odlišuje výskytem lokálního maxima na frekvenci 102 Hz, která je velmi blízká 1. vlastní frekvenci soustavy. Globálních maxim dosahují všechny průběhy přibližně při 105,5 Hz, což odpovídá 2. vlastní frekvenci. Hodnoty napětí pro pozice 1–4 dosahují dobře měřitelných hodnot.



Obr. 8.25 Odezva MFC na pozicích 5–8

Průběhy elektrického napětí pro snímače na pozicích 5–8 jsou uvedeny na Obr. 8.25 a poměrně výrazně se liší od předchozí skupiny viz Obr. 8.24. Mezi pozicemi 5,7 a 6,8 je patrný výrazný pokles hodnot. Co se průběhu týče, maxima není dosaženo v úzkém okolí jedné frekvence, ale v širším pásmu s rozmezím 103–105 Hz. Lze konstatovat, že vzhledem k vyšším hodnotám elektrického napětí jsou pozice 5 a 7 vhodnější pro umístění MFC snímačů než lokace 6 a 8.

AF napětí pro pozice 9–10 vykazovaly obdobný průběh jako pro lokace 1–4. Maximálních hodnoty napětí ani pro jeden případ nepřekročily hodnotu 0,5 V, a proto tyto polohy nejsou, ve srovnání s ostatními, vhodné pro umístění snímačů.

Na základě získaných AF charakteristik lze konstatovat, že MFC vrstvy jsou schopny zaznamenat frekvence, na kterých dochází k vybuzení vlastních tvarů. S přihlédnutím k výše zmíněnému popisu signálu z jednotlivých lokací jsou pro umístění MFC vrstev nejvhodnější pozice 5 a 7. Snímače umístěné na této poloze jsou schopny zachytit 1. i 2. vlastní frekvenci, a také generují nejvyšší hodnoty napětí. Vhodné by bylo umístit MFC vrstvu také na pozici 2, kde je nejvíce patrná přítomnost dvou vlastních frekvencí. Stejně pozice jsou také vhodné pro určení 3. vlastní frekvence soustavy. Pro tuto frekvenci je však již vhodné použít zesílení signálu. Lze předpokládat, že při vyhodnocování signálu z alespoň dvou MFC vrstev na vhodných pozicích v časové oblasti bude také možné určit tvary kmitání soustavy. Těmito vhodnými pozicemi mohou být například pozice 1 a 2, případně jejich ekvivalenty.

9 Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývala homogenizací MFC vrstvy a zhodnocením jejího možného využití v technické diagnostice. V podkapitole 8.4 byl navržen prototyp SMART součásti. Ložiskový domek osazený MFC vrstvami může podávat informace o intenzitě vibrací ve svém okolí. Po připojení k bezdrátové síti a sdílení naměřených dat na centrálním úložišti tak může posloužit k monitorování zařízení v duchu průmyslu 4.0.

Z rešeršní studie vyplývá, že MFC vrstvy mají široké využití v oblasti snímání mechanických vibrací a monitorování stavu struktury součástí. Díky možnosti energy harvesting je možné vytvářet SMART struktury schopné monitoringu technických děl, bez nutnosti vnějšího energetického zdroje.

V první části byl proveden experiment, při kterém byl vetknutý nosník osazený MFC vrstvami (katalogová čísla M2807-P1 a M2807-P2) buzen na jeho 1. a 2. vlastní frekvenci. Z uvedeného měření byly získány křivky popisující závislost generovaného elektrického napětí na odporu a na amplitudě budícího zrychlení. Mezi elektrickým napětím a amplitudou zrychlení byla pozorována přímá úměrnost, dále lze konstatovat, že generované el. napětí není závislé na frekvenci buzení. S rostoucí hodnotou elektrické zátěže se ustaluje na určité hodnotě, která již dále neroste. Mezní odpor pro dosažení maximálního el. napětí byl stanoven na 3 M Ω .

V následující části byla provedena homogenizace MFC vrstvy. Ta může být provedena několika způsoby. V rámci této práce byla zvolena metoda určující materiálové charakteristiky pomocí modelování elementární buňky struktury metodou konečných prvků. Navržená buňka obsahovala všechny podstatné strukturní složky a byla vystavena celkem sedmi zátěžným stavům. Vyhodnocením ZS byly určeny materiálové charakteristiky popisující danou strukturu jako homogenní materiál. Získané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 7.6. Tyto hodnoty při porovnání s materiálovými charakteristikami získanými jinými přístupy vykazovaly dobrou shodu. Jejich správnost byla také ověřena srovnáním se získanými experimentálními daty. I v tomto případě byla pozorována velmi dobrá shoda, včetně průběhu závislosti el. napětí na odporu.

Ve třetí části byl proveden návrh zařízení simulujícího zatížení rotoru rotující nevyváhou. Konfigurace rotoru odpovídá Lavalovu rotoru. Modální analýza ukázala, že v provozním pásmu 0–400 Hz dojde k vybuzení tří vlastních tvarů kmitání soustavy. Vlastní frekvence jsou rovny 102,3 Hz, 105,8 Hz a 333,4 Hz. Harmonická analýza simulovala zatížení rotoru nevyváhou 300 gmm a sloužila k posouzení MS pružnosti a MS deformace. V provozním pásmu uvedené MS nenastaly. Mimo kritické otáčky rotoru jsou hodnoty redukováného napětí HMH několika násobně nižší. Dále se nepředpokládá dlouhodobé setrvávání na kritických otáčkách. Nehrozí proto ani MS únavy. Na zařízení byly dále vybrány oblasti vhodné pro umístění MFC vrstev. Pomocí MKP byla simulována odezva jednotlivých MFC na buzení soustavy. Analýzou amplitudo-frekvenční charakteristiky el. napětí byly posouzeny vrstvy na jednotlivých pozicích. Ze simulace vyplývá, že při správném umístění MFC se s dobrou přesností dají detekovat vlastní frekvence soustavy. Lze také předpokládat, že při vyhodnocení signálu v časové oblasti z více MFC vrstev bude možné určit tvary kmitání soustavy.

Do budoucna se dá na výsledky této práce navázat několika možnými případy. Homogenizované materiálové charakteristiky mohou být využity pro modelování MFC vrstev v dalších případových studiích. Navržený rotorstand také bude skutečně vyroben a bude tak možné provést validaci simulace provedené v poslední kapitole s experimentem. Dále bude nutné vyřešit bezdrátovou komunikaci mezi SMART ložiskovým domkem a centrálním úložištěm dat. V neposlední řadě je možné zabývat se topologickou optimalizací MFC vrstev na různých součástech.

10 Seznam použité literatury

- [1] MFC. In: Smart Material corp. [online]. 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com/index.html>
- [2] MACRO FIBER COMPOSITE - MFC. In: Smart Material Corp [online]. b.r. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: https://www.smart-material.com/media/Datasheets/MFC_V2.3-Web-full-brochure.pdf
- [3] MCGAHEY, Christopher. HARNESSING NATURE'S TIMEKEEPER: A HISTORY OF THE PIEZOELECTRIC QUARTZ CRYSTAL TECHNOLOGICAL COMMUNITY (1880-1959). Atlanta, 2009. Disertační práce. Georgia Institute of Technology.
- [4] BATRA, A. a Almuatasim ALOMARI. Power harvesting via smart materials. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2017. ISBN 978-151-0608-504.
- [5] WILKIE, W. NASA MFC Piezocomposites: A Development History. In: Smart Material Corp [online]. 2005 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com/media/Presentations/K-Wilkie-ISMA-2005.pdf>
- [6] TICHÝ, Jan. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials. New York: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-43966-0.
- [7] RAMADAN, Khaled, D SAMEOTO a S EVOY. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. Smart Materials and Structures. IOP Publishing, 2014, 23(3), 033001. DOI: 10.1088/0964-1726/23/3/033001. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/23/3/033001>
- [8] ZHANG, Xiaoqing, Xinwu ZHANG, Qiong YOU a G.M. SESSLER. Low-Cost, Large-Area, Stretchable Piezoelectric Films Based on Irradiation-Crosslinked Poly(propylene). 2014, 299. DOI: 10.1002/mame.201300161.
- [9] KHAN, Asif, Zafar ABAS, Heung KIM a Il-Kwon OH. Piezoelectric thin films: An integrated review of transducers and energy harvesting: An integrated review of transducers and energy harvesting. 2016, 25, 053002 s. DOI: 10.1088/0964-1726/25/5/053002.
- [10] Ceramtec [online]. b.r. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics>
- [11] LIN, Xiu-juan, Ke-chao ZHOU, Xiao-yong ZHANG a Dou ZHANG. Development, modeling and application of piezoelectric fiber composites. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013, 23(1), 98-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/S1003->

6326(13)62435-8. ISSN 1003-6326. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632613624358>

- [12] DERAEMAERKER, Arnaud a Houssein NASSER. Numerical evaluation of the equivalent properties of Macro Fiber Composite (MFC) transducers using periodic homogenization. *International Journal of Solids and Structures*. 2010, 47(24), 3272-3285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.08.006>. ISSN 0020-7683. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768310002854>
- [13] SIROHI, Jayant a Inderjit CHOPRA. Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. SAGE Publications Ltd STM, 2000, 11(4), 246-257. DOI: 10.1106/8BFB-GC8P-XQ47-YCQ0. ISSN 1045-389X. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1106/8BFB-GC8P-XQ47-YCQ0>
- [14] N. SATHYANARAYANA, C, Samikkannu RAJA a H M. RAGAVENDRA. Procedure to Use PZT Sensors in Vibration and Load Measurements. 2013, 2013. DOI: 10.1155/2013/173605.
- [15] BRUNNER, A.J. a M. BARBEZAT. Acoustic Emission Leak Testing of Pipes for Pressurized Gas Using Active Fiber Composites. *Journal of Acoustic Emission*. 2007, (25), 42-50.
- [16] CUI, Lin, Yu LIU a Chee SOH. Health monitoring of cylindrical structures using torsional wave generated by piezoelectric macro-fiber composite. In: *Proc.SPIE*. 2011, 7984. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1117/12.880333>
- [17] PARK, Gyuhae, Kevin FARINHOLT, Stuart TAYLOR a Charles FARRAR. Piezoelectric active sensing techniques for damage detection on wind turbine blades. In: *Proc.SPIE*. 2011, 7979. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1117/12.882001>
- [18] SALAMONE, Salvatore, Ivan BARTOLI, Patrizia DI LEO, Francesco LANZA DI SCALA, Augusto AJOVALASIT, Leonardo D'ACQUISTO, Jennifer RHYMER a Hyonny KIM. High-velocity Impact Location on Aircraft Panels Using Macro-fiber Composite Piezoelectric Rosettes. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. SAGE Publications Ltd STM, 2010, 21(9), 887-896. DOI: 10.1177/1045389X10368450. ISSN 1045-389X. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1177/1045389X10368450>
- [19] MASMOUDI, Sahir, Abderrahim EL MAHI a Rachid EL GUERJOURA. Mechanical behaviour and health monitoring by acoustic emission of sandwich composite integrated by piezoelectric implant. *Composites Part B: Engineering*. 2014, 67, 76-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.05.032>. ISSN 1359-8368. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836814002704>
- [20] MASMOUDI, Sahir, Abderrahim MAHI, Saïd TURKI a Rachid GUERJOURA. Mechanical behavior and health monitoring by Acoustic Emission of unidirectional and cross-ply laminates integrated by piezoelectric implant. *Applied Acoustics*. 2014, 86, 118-125.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.04.011>. ISSN 0003-682X. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X1400108X>

- [21] KONKA, Hari, M. WAHAB a K. LIAN. The effects of embedded piezoelectric fiber composite sensors on the structural integrity of glass-fiber–epoxy composite laminate. *Smart Materials and Structures*. 2011, **21**(1).
- [22] KONKA, Hari, M.A. WAHAB a K. LIAN. Piezoelectric fiber composite transducers for health monitoring in composite structures. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013, 194, 84-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.12.039>. ISSN 0924-4247. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424712007856>
- [23] DERAEMAERKER, A., H. NASSER, A. BENJEDDOU a A. PREUMONT. Mixing Rules for the Piezoelectric Properties of Macro Fiber Composites. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. SAGE Publications Ltd STM, 2009, **20**(12), 1475-1482. DOI: 10.1177/1045389X09335615. ISSN 1045-389X. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1177/1045389X09335615>
- [24] RAMOS, Reinaldo, Jose HERNANDEZ, Julian CASTILLERO a Federico SABINA. Electromechanical properties of laminated piezoelectric composites. *Mechanics of Composite Materials*. 1996, 32(5), 286-291.
- [25] BISCANI, Fabio, Houssein NASSER, Salim BELOUETTAR a Erasmo CARRERA. Equivalent electro-elastic properties of Macro Fiber Composite (MFC) transducers using asymptotic expansion approach. *Composites Part B: Engineering*. 2011, 42(3), 444-455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.12.009>. ISSN 1359-8368. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836810002313>
- [26] SREENIVASA PRASATH, S. a A. AROCKIARAJAN. Analytical, numerical and experimental predictions of the effective electromechanical properties of macro-fiber composite (MFC). *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014, 214, 31-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.04.008>. ISSN 0924-4247. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424714001733>
- [27] VRBKA, Jan. *Mechanika Kompozitů*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008.
- [28] SREENIVASA PRASATH, S. a A. AROCKIARAJAN. Effective electromechanical response of macro-fiber composite (MFC): Analytical and numerical models: Analytical and numerical models. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, 77, 98-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.09.031>. ISSN 0020-7403. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740313002579>
- [29] BOWEN, Chris, Luke NELSON, R STEVENS, Markys CAIN a M STEWART. Optimisation of interdigitated electrodes for piezoelectric actuators and active fibre composites. 2006, 16, 263 s. DOI: 10.1007/s10832-006-9862-8.

- [30] KUANG, Yang a Meiling ZHU. Evaluation and validation of equivalent properties of macro fibre composites for piezoelectric transducer modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2019, 158, 189-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.068>. ISSN 1359-8368. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818301975>
- [31] TRINDADE, M a A BENJEDDOU. Finite element homogenization technique for the characterization of d15 shear piezoelectric macro-fibre composites. *Smart Materials and Structures*. IOP Publishing, 2011, 20(7), 075012. DOI: 10.1088/0964-1726/20/7/075012. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/20/7/075012>
- [32] TRINDADE, Marcelo a Ayech BENJEDDOU. Finite element characterisation of multilayer d31 piezoelectric macro-fibre composites. *Composite Structures*. 2016, 151, 47-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.011>. ISSN 0263-8223. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315009423>
- [33] ROTEX GS [online]. b.r. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.morskateaandrijvingen.nl/static/default/files/documents/pdf-products/KTR%20ROTEX%20GS%201.pdf>
- [34] LEE, Soobum a Byeng YOUN. A New Energy Harvesting Design Concept: Multimodal Energy Harvesting Skin: Multimodal Energy Harvesting Skin. 2011, 58, 629 s. DOI: 10.1109/TUFFC.2011.5733266.

11 Seznam obrázků

Obr. 1.1 MFC vrstva [1]	11
Obr. 4.1 Piezoelektrický jev v krystalu křemene	16
Obr. 4.2 Standardní označování směrů	17
Obr. 4.3 Princip polarizace. Zleva: nahodilá orientace domén, vystavení el. poli, stav po odstranění el. pole	19
Obr. 4.4 Polymery s orientovanou molekulární strukturou a polarizovanými dutinami	19
Obr. 4.5 Základní struktura piezokompozitu	21
Obr. 4.6 Vnitřní struktura AFC a MFC	21
Obr. 4.7 Způsob vyřezávání jednotlivých PZT vláken a výroba aktivní vrstvy MFC	22
Obr. 4.8 Zapojení elektrod: d_{33} (vlevo) a d_{31} (vpravo)	22
Obr. 5.1 Experimentální zařízení použité v [13].....	23
Obr. 5.2 Porovnání signálů mezi PZT a akcelerometrem.....	24
Obr. 5.3 Konfigurace experimentu pro průchodovou ultrazvukovou metodu.....	24
Obr. 5.4 Lopatka větrné turbíny osazená MFC snímači	25
Obr. 5.5 Plech osazený dvěma páry MFC růžic (vlevo) a náraz ledové koule do plechu (vpravo)	25
Obr. 5.6 Porušení laminátu s integrovaným snímačem.....	26
Obr. 5.7 Změna vlastní frekvence v závislosti na delaminaci	26
Obr. 6.1 Experimentální zařízení pro měření odezvy MFC	28
Obr. 6.2 Geometrické rozměry nosníku a pozice snímačů (uvedené rozměry jsou v mm).....	29
Obr. 6.3 Schematické zapojení.....	30
Obr. 6.4 Závislost napětí na odporu pro první sérii měření.....	30
Obr. 6.5 Závislost výkonu na odporu pro první sérii měření	30
Obr. 6.6 Závislost napětí na odporu pro druhou sérii měření	31
Obr. 6.7 Závislost výkonu na odporu pro druhou sérii měření.....	31
Obr. 6.8 Závislost napětí na odporu pro třetí sérii měření	31
Obr. 6.9 Závislost výkonu na odporu pro třetí sérii měření.....	32
Obr. 6.10 Záznam dokmitávání nosníku a určení poměrného útlumu.....	33
Obr. 7.1 Vnitřní struktura MFC	34
Obr. 7.2 Postup homogenizace.....	35
Obr. 7.3 Strukturní složení jednotlivých vrstev použité v článcích [28] (vlevo), [23] (střed) a [26] (vpravo).....	35
Obr. 7.4 Možné hranice řezu pro vytvoření elementární buňky	37
Obr. 7.5 Použitá elementární buňka	37
Obr. 7.6 Rozdíly ve formulaci matice tuhosti anizotropního materiálu	38
Obr. 7.7 Plochy pro předepsání okrajových podmínek	39
Obr. 7.8 Rozdíl ve vzdálenosti a ploše elektrod	42
Obr. 7.9 Schematický náčrt model geometrie nosníku (uvedené rozměry v mm)	43
Obr. 7.10 Síť a použité 3D prvky	44
Obr. 7.11 Plochy pro předepsání okrajových podmínek.....	45
Obr. 7.12 Porovnání závislosti napětí na odporu pro $f = 19,8$ Hz	46

Obr. 7.13 Porovnání závislosti výkonu na odporu pro $f = 19,8$ Hz	46
Obr. 7.14 Porovnání závislosti napětí na odporu pro $f = 165,4$ Hz	47
Obr. 7.15 Porovnání závislosti výkonu na odporu pro $f = 165,4$ Hz	47
Obr. 7.16 Porovnání závislosti napětí na odporu pro $f = 120,5$ Hz	47
Obr. 7.17 Porovnání závislosti výkonu na odporu pro $f = 120,5$ Hz	48
Obr. 8.1 Navržená konstrukce	49
Obr. 8.2 Model geometrie použitý pro modální analýzu	51
Obr. 8.3 Kontaktní plochy a použité typy kontaktů	52
Obr. 8.4 Nahrazení ložisek a pružné spojky	52
Obr. 8.5 Použité okrajové podmínky pro modální analýzu	54
Obr. 8.6 Campbellův diagram	54
Obr. 8.7 První tvar kmitání soustavy – $\Omega_1 = 102,3$ Hz	55
Obr. 8.8 Druhý tvar kmitání soustavy – $\Omega_2 = 105,8$ Hz	55
Obr. 8.9 Třetí tvar kmitání soustavy – $\Omega_3 = 412\text{--}318$ Hz	55
Obr. 8.10 Pátý tvar kmitání soustavy – $\Omega_5 = 475$ Hz	56
Obr. 8.11 Skládání vlastních tvarů – MSUP	57
Obr. 8.12 Okrajové podmínky pro harmonickou analýzu	57
Obr. 8.13 Závislost amplitudy posuvu středu hřídele na budicí frekvenci	58
Obr. 8.14 Závislost amplitudy posuvu středu hřídele na budicí frekvenci – detail	58
Obr. 8.15 Trajektorie středu hřídele	59
Obr. 8.16 Maximální hodnoty amplitudy redukované napětí HMH v provozním pásmu motoru – celá soustava	60
Obr. 8.17 Maximální hodnoty amplitudy redukovaného napětí HMH v provozním pásmu motoru – rotor	60
Obr. 8.18 Maximální hodnoty amplitudy redukovaného napětí HMH v provozním pásmu motoru – ložiskový domek č.1	61
Obr. 8.19 Maximální hodnoty amplitudy redukovaného napětí HMH v provozním pásmu motoru – ložiskový domek č.2	61
Obr. 8.20 Ukázka vyrušování náboje	61
Obr. 8.21 Oblasti kladných a záporných přetvoření na ložiskovém domku č.1 – pohled z boku	62
Obr. 8.22 Oblasti kladných a záporných přetvoření na ložiskovém domku č.1 – pohled zepředu	63
Obr. 8.23 Pozice MFC snímačů na ložiskovém domku č.1	63
Obr. 8.24 Odezva MFC na pozicích 1–4	64
Obr. 8.25 Odezva MFC na pozicích 5–8	64

12 Seznam tabulek

Tab. 7.1 Porovnání mechanických vlastností	36
Tab. 7.2 Porovnání piezoelektrických nábojových konstant a relativní permitivity	36
Tab. 7.3 Geometrické rozměry elementární buňky v μm	37
Tab. 7.4 Materiálové vlastnosti	38
Tab. 7.5 Okrajové podmínky pro jednotlivé zatěžující stavy	40
Tab. 7.6 Mechanické, piezoelektrické a elektrické konstanty homogenizovaného MFC	42
Tab. 7.7 Materiálové vlastnosti	44
Tab. 7.8 Souhrn okrajových podmínek	45
Tab. 8.1 Materiálové charakteristiky jednotlivých komponent	51
Tab. 8.2 Přehled použitých typů elementů	53
Tab. 8.3 Meze kluzu a dovolené hodnoty napětí jednotlivých materiálů	59

13 Seznam vybraných symbolů

Symbol	Rozměr	Veličina
a	$[\text{ms}^{-2}]$	zrychlení
a_{max}	$[\text{ms}^{-2}]$	maximální zrychlení
b_p	$[-]$	poměrný útlum
C_{STR}	$[\text{F}]$	el. kapacita strukturované buňky
D	$[\text{Cm}^{-2}]$	elektrická indukce
d_{ij}	$[\text{CN}^{-1}]$	piezoelektrický nábojový koeficient
E	$[\text{Vm}^{-1}]$	intenzita elektrického pole (str. 18, 41)
E	$[\text{GPa}]$	modul pružnosti v tahu
G	$[\text{GPa}]$	modul pružnosti ve smyku
g_{ij}	$[\text{VmN}^{-1}]$	piezoelektrický napěťový koeficient
C_H	$[\text{F}]$	el. kapacita homogenizované buňky
k_{ij}	$[-]$	elektromechanický coupling koeficient
S	$[-]$	přetvoření
s^E	$[\text{Pa}^{-1}]$	elastická poddajnost při konstantním elektrickém poli
S_H	$[\text{m}^2]$	plocha elektrod homogenizované buňky
S_{STR}	$[\text{m}^2]$	plocha elektrod strukturované buňky
T	$[\text{Pa}]$	mechanické napětí
T_c	$[\text{°C}]$	Cuireho teplota
t_H	$[\text{m}]$	vzdálenost elektrod homogenizované buňky
t_{STR}	$[\text{m}]$	vzdálenost elektrod strukturované buňky
V	$[\text{m}^3]$	objem
ϵ_0	$[\text{Fm}^{-1}]$	permitivita vakua
ϵ_{ij}	$[\text{Fm}^{-1}]$	absolutní permitivita
ϵ_r	$[-]$	relativní permitivita
ϵ_{rH}	$[-]$	relativní permitivita homogenizované buňky
$\epsilon_{r\text{STR}}$	$[-]$	relativní permitivita strukturované buňky
μ	$[-]$	poissonův poměr
Ω	$[\text{rad s}^{-1}]$	vlastní frekvence

14 Seznam zkratek

Zkratka	Význam
----------------	---------------

AE	akustická emise
AF	amplitudo-frekvenční charakteristika
AFC	active fibre composite
MEMS	mikro elektro mechanický systém
MFC	macro fibre composite
MKP	metoda konečných prvků
MS	mezní stav
NDT	nedestruktivní zkoušky
OP	okrajové podmínky
PVDF	polyvinylidenfluorid
PZT	olovo-zirkonát-titanát
SHM	monitorování stavu struktur
SNR	odstup signálu od šumu
ZS	zátěžný stav

15 Seznam příloh

Příloha 1

Výkresová dokumentace pro výrobu experimentálního zařízení (rotorstandu)