



ŽILinskÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2025

Ing. Barbora Drvárová

Ing. Barbora Drvárová

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Diagnostika a meranie dynamických parametrov so zameraním na prvky e-mobility

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov

Žilina 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre aplikovanej mechaniky.

Predkladateľ: Ing. Barbora Drvárová
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky

Školiteľ: doc. Ing. Vladimír Dekýš, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky

Oponenti:

1. prof. Ing. Robert Grega, PhD.
Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky
2. doc. Ing. Milan Naď, CSc.
Slovenská technická univerzita v Trnave
UIAM Materialovo technologická fakulta
3. prof. Ing. Alžbeta Sapietová, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra aplikovanej mechaniky

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 4. 7. 2025

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 21.8.2024 o 10:30 hod. v miestnosti BB011 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Dr. Ing. Milan Sága
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

ÚVOD

Rastúci záujem o udržateľnú mobilitu a potreba zvyšovania energetickej efektívnosti vedú k rozmachu elektromobility ako alternatívy ku spaľovacím technológiám. Elektromobily predstavujú komplexné mechatronické systémy s elektrickým pohonom, doplnené o konštrukčné, riadiace a chladiace podsystémy. Vzhľadom na vysoké nároky na spoľahlivosť a odolnosť voči dynamickému zaťaženiu bude nevyhnutné ich dôkladné testovanie pred nasadením do prevádzky.

Dizertačná práca sa bude zameriavať na diagnostiku a meranie dynamických parametrov komponentov elektromobility, najmä pri dynamickom budení pomocou elektrodynamického budiča. Ten bude slúžiť na simuláciu reálneho zaťaženia, pričom sa predpokladá výskyt porúch ovplyvňujúcich presnosť budenia – aj preto bude súčasťou práce aj jeho diagnostika.

Skúšané objekty budú k budiču pripevnené skrutkovými spojmi, ktoré zásadne ovplyvňujú dynamickú odozvu zostavy – najmä z hľadiska tuhosti, trenia a útlmu. Ich charakteristiky sa budú meniť v závislosti od predpätia, kontaktných plôch a použitých materiálov, a preto sa práca bude venovať aj ich analýze.

Na overenie dynamického správania sa plánujú aj numerické simulácie metódou konečných prvkov. Ich presnosť bude závisieť najmä od správne určených modálnych parametrov – vlastných frekvencií, tvarov a najmä tlmenia. Keďže simulační inžinieri často hodnoty tlmenia len odhadujú, práca bude klásť dôraz na experimentálnu identifikáciu a kvantifikáciu reálneho tlmenia rôznych materiálov (vrátane polymérov) a jeho využitie pri spresňovaní modelov.

Získané výsledky by mali prispieť k lepšiemu pochopeniu mechanizmov útlmu, zvýšiť presnosť výpočtov a podporiť návrh spoľahlivých komponentov elektromobility. Výskum bude prebiehať v konzultácii s firmou Schaeffler.

CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom práce je:

Experimentálna identifikácia a numerická verifikácia modálnych parametrov komponentov elektromobility, s dôrazom na určenie tlmiacich charakteristík a analýzu vplyvu skrutkových spojov pri dynamickom zaťažení.

Tento hlavný cieľ je rozpracovaný do nasledujúcich čiastkových cieľov, ktoré pokrývajú jednotlivé tematické a výskumné oblasti práce:

1. Diagnostika elektrodynamického budiča

Z dôvodu výskytu prevádzkových porúch budiča (opotrebovanie ložísk, trenie, degradácia kontaktov) bolo cieľom:

- identifikovať príčiny zlyhávania budiča pomocou vibračných a akustických diagnostických metód
- navrhnúť vhodné opatrenia na zvýšenie spoľahlivosti budenia počas experimentov.

2. Analýza skrutkových spojov ako súčasti konštrukčnej zostavy

Vzhľadom na to, že všetky testované vzorky boli priskrutkované k budiču pomocou skrutkových spojov, bolo potrebné:

- analyzovať vplyv ťahovacieho momentu na tlmenie spoja,
- experimentálne zmerať frekvenčnú odozvu zostavy v závislosti od typu spojov a ich konfigurácie,
- vytvoriť simulačný model spoja a porovnať ho s experimentálnymi dátami.

3. Meranie a spracovanie modálnych parametrov konštrukčných prvkov

Určenie modálnych parametrov je kľúčové pre popis dynamického správania. Ciele v tejto oblasti zahŕňali:

- aplikáciu experimentálnej modálnej analýzy (EMA) na rôzne vzorky,
- stanovenie vlastných frekvencií, vlastných tvarov a najmä pomerného útlmu,
- vývoj vhodného postupu na spracovanie a vyhodnotenie meraní.

4. Zisťovanie a modelovanie materiálového tlmenia

Vzhľadom na to, že numerické modely často nezohľadňujú reálne tlmenie, práca sa zamerala na:

- experimentálne určenie tlmenia pre rôzne materiály používané v e-mobilitě (polyméry, polyamidy, zliatiny, oceľ),
- hodnotenie vplyvu orientácie vlákien a starnutia na pomerný útlm.

1 TEORETICKÝ RÁMEC A VÝCHODISKÁ DIZERTAČNEJ PRÁCE

Teoretická časť dizertačnej práce poskytuje ucelený základ pre experimentálny výskum v oblasti diagnostiky a merania dynamických parametrov súčastí elektromobility. Zameriava sa predovšetkým na vibrodiagnostiku [7][9][10][10][11][13][19][20][21][22][23][24][32][33][34][38][39], modálnu analýzu [13][19][24][49] a problematiku tlmenia, ktoré sú kľúčové pre návrh a optimalizáciu technických systémov vystavených dynamickému zaťaženiu.

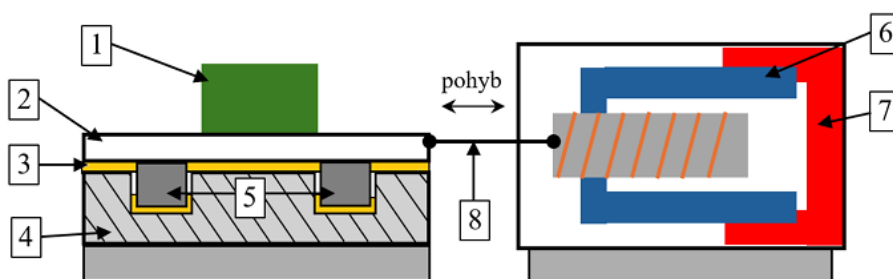
V oblasti vibrodiagnostiky sú spracované princípy detekcie porúch elektromotorov [1][2][3][4][5][6], vrátane sledovania charakteristických frekvencií spojených s defektmi statora, rotora či ložísk. [14] [15] [16][17][18][21][31][33][41][42][43][44][48][50][49][51][75] Teoretický základ modálnej analýzy je formulovaný prostredníctvom maticových pohybových rovníc, z ktorých sa odvodzujú modálne parametre: vlastné frekvencie, vlastné tvary a pomerný útlm. [8][11][12] [25][26][28][29][30][49] [53] [54][55] Uvedené sú tiež metódy ich určenia, ako je metóda logaritmického dekrementu, half-power bandwidth alebo RFP (Rational Fraction Polynomial) metóda, ktorá sa používa v experimentálnej časti práce.

Osobitná pozornosť je venovaná modelovaniu tlmenia, a to najmä materiálového (viskoelastického, hysterézneho) a štruktúrneho tlmenia, ktoré vzniká v skrutkových spojoch. [27][35][36][37] [45][46][47][69] Teória zahŕňa aj princípy tribológie – trenie, opotrebenie a mazanie – ktoré výrazne ovplyvňujú tlmiace vlastnosti spojov. [56][57][72] Tribologický kontext je dôležitý najmä pri analýze opotrebenia komponentov budiaceho systému a pri hodnotení vlastností mazív.

Uvedené teoretické východiská podporujú návrh experimentálnych metód a interpretáciu výsledkov. Zároveň tvoria základ pre pedagogické aplikácie v oblasti mechaniky, diagnostiky a dynamiky technických systémov.

2 ELEKTRODYNAMICKÝ BUDIČ A JEHO DIAGNOSTIKA

V rámci experimentálneho overovania dynamických parametrov komponentov elektromobility bol použitý elektrodynamický budič, ktorého schéma je znázornená na Obr. 1. Skúšaný objekt (1) bol pripevnený na klzný stôl (2), ktorý sa pohyboval vďaka kmitavému pohybu vodiacej súčasti (8). Tento pohyb bol zabezpečený pomocou cievky (6) umiestnenej v magnetickom poli permanentného magnetu (7), čím vznikala Lorentzova sila.



Obr. 1 Schéma elektrodynamického budiča

Klzný stôl bol umiestnený na žulovej platni (4) v tvare písmena H. Medzi klzným stolom a žulovou doskou bol je mazací film (3) z hydraulického oleja s kinematickou viskozitou $69,8 \text{ mm}^2/\text{s}$ pri 40°C a $8,7 \text{ mm}^2/\text{s}$ pri 100°C . Olej slúžil na zníženie trenia a ochranu styčných plôch.

Klzný stôl bol podopretý na žulovej platni (4) v tvare písmena H. Medzi klzným stolom a žulovou doskou bol vytváraný mazací film (3) z hydraulického oleja s kinematickou viskozitou $69,8 \text{ mm}^2/\text{s}$ pri 40°C a $8,7 \text{ mm}^2/\text{s}$ pri 100°C , hustotou $0,885 \text{ g/cm}^3$ a bodom tuhnutia -21°C . Olej slúžil na zníženie trenia a ochranu styčných plôch.

Počas prevádzky bolo zaznamenané opotrebenie v oblasti trecích miest, najmä v styku medzi klzným stolom a žulovou platňou. Na ich lokalizáciu bola použitá ručná akustická kamera Hikmicro AI56, vybavená 64 smerovými MEMS mikrofónmi s rozsahom 2 kHz až 96 kHz . Kamera umožnila vizualizovať akustické pole a identifikovať konkrétne miesta trenia. Tieto výsledky potvrdili, že zdrojom zvýšeného hluku a opotrebenia boli konkrétne oblasti styku, čím sa preukázala efektivita využitia akustickej kamery ako diagnostického nástroja pri hodnotení stavu trecích komponentov systému.

Počas meraní boli na styčných plochách zaznamenané známky poškodenia, čo môže znamenať nerovnomerné mazanie a nadmerné trenie. Tieto javy by mohli viesť k opotrebovaniu klzných ložísk a zníženiu reprodukovateľnosti výsledkov meraní. Diagnostika potvrdila dôležitosť správnej funkcie tribologického systému pre zabezpečenie presnosti a spoľahlivosti budiaceho zariadenia.

Na zistenie príčin opotrebenia trecích plôch bol analyzovaný hydraulický olej použitý ako mazací film. Výsledky ukázali zvýšený obsah nečistôt a oterových častíc (horčíka) po dlhšej prevádzke, čo môže naznačovať trenie medzi klzným stolom a podperou. Hoci olej nevykazoval degradáciu, odporúčaná bola filtrácia a zváženie výberu vhodnejšieho mazacieho média odolného voči extrémnym teplotám.

3 NÁVRH METÓDY HODNOTENIA KOMPONENTOV Z OBLASTI ELEKTROMOBILITY SKÚŠANÝCH DYNAMICKÝMI TESTAMI, S VYUŽITÍM DIAGNOSTIKY

V konštrukciách elektromobility zohrávajú skrutkové spoje kľúčovú úlohu nielen ako spojovací prvok, ale aj ako významný zdroj vnútorného tlmenia pri dynamickom zaťažení. Mikropohyby medzi spájanými časťami spôsobujú trenie, ktoré môže tvoriť podstatný podiel tlmenia zostavy – často aj dominantný v porovnaní s materiálovým tlmením. Takéto trenie je spravidla nelineárne a závislé od kontaktnej sily, predpätia, materiálov a miestneho sklzu. [61][62][63][64][65][67][68]

Správne predikovať dynamické správanie konštrukcií so skrutkovými spojmami si preto vyžaduje pokročilé modelovanie. Medzi využívané prístupy patria penalizačné metódy, Lagrangeove multiplikátory, augmented Lagrangian a modely Coulombovho trenia. V prípadoch s veľkým počtom kontaktov sa uplatňujú homogenizačné techniky, ktoré nahrádzajú detailné modely efektívnymi makroparametrami. Výber vhodnej metódy má zásadný vplyv na presnosť simulácie a porovnateľnosť s reálnym správaním zostáv. [13] [19][20]

3.1 Experimentálne meranie

Cieľom experimentu bolo overiť, ako skrutkový spoj ovplyvňuje dynamické správanie a pomerný útlm zostavy pri rôznych podmienkach predpätia skrutkového spoja. Skúšobné konfigurácie (Obr. 2) pozostávali z dvoch nosníkov rôznych materiálov – nerezovej ocele a hliníkovej zliatiny – spojených pomocou dvoch skrutiek. Na hodnotenie vplyvu trenia a kontaktu medzi spojovanými časťami bola dôležitá počiatočná analýza povrchovej drsnosti.



Obr. 2 Rozmery meraných vzoriek a konfigurácia pri experimente v milimetroch

Povrchová charakteristika bola meraná optickým profilometrom ešte pred experimentom, pričom boli získané 3D mapy povrchu oboch materiálov. Výsledky ukázali, že oceľ mala výrazne drsnejší a nerovnejší povrch, čo zvyšovalo potenciál na vznik kontaktne podmieneného tlmenia. Rozdielna textúra povrchu oboch materiálov ovplyvňuje kvalitu kontaktu a následne aj výsledné modálne parametre zostavy.

Na overenie vlastných tvarov kmitania bola zostava analyzovaná výpočtovo aj experimentálne, pričom sa zameriavalo najmä na identifikáciu ohybových a torzných módov. Získané výsledky poskytujú podklad pre lepšie pochopenie vplyvu skrutkových spojov na tlmenie v konštrukciách elektromobility.

3.1.1 Spracovanie a vyhodnotenie experimentálnych meraní

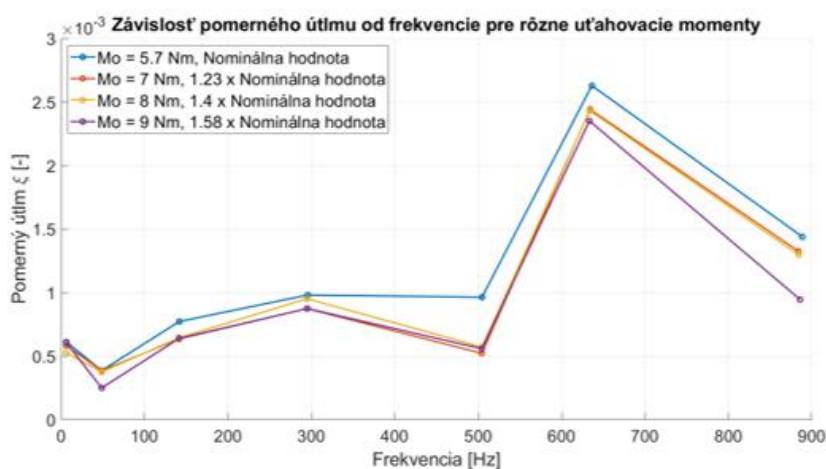
Na spracovanie experimentálnych dát bola použitá metóda racionálneho zlomkového polynómu (RFP) (1), ktorá slúži na odhad vlastných frekvencií a útlmu v dynamických systémoch. Ide o robustnú analytickú metódu využívanú v modálnej analýze. Výsledkom bolo určenie závislosti pomerného útlmu od frekvencie pre rôzne konfigurácie skrutkového spoja. [70][71]

$$H(\omega) = \frac{N(\omega)}{D(\omega)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{j\omega - s_i} \quad (1)$$

kde s_i sú komplexné póly systému.

Experiment preukázal, že pomerný útlm systému je ovplyvnený silou skrutkového spojenia – vyšší ťahovací moment viedol k nižšiemu útlmu, čo môže súvisieť so stabilizáciou trenia v spoji. Výsledky boli spracované pre rôzne kombinácie materiálov (oceľ a hliník), pričom vplyv zaťaženia sa prejavil aj na zmene povrchovej drsnosti spájaných materiálov.

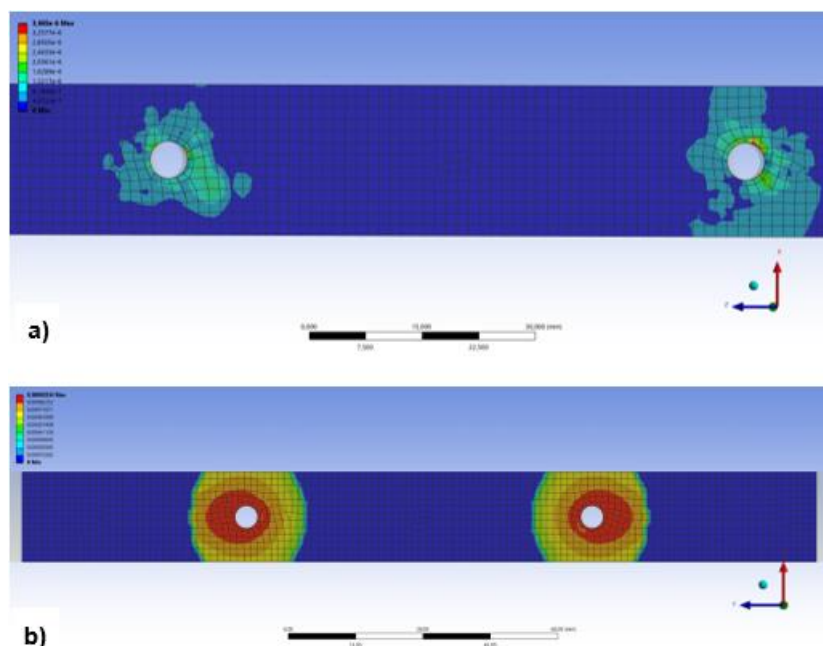
Profilová drsnosť bola meraná pred aj po experimente, čo umožnilo zhodnotiť opotrebenie spojovaných plôch. Pri oceli bola po experimente zaznamenaná redukcia výstupkov (zníženie drsnosti), čo naznačuje abrazívne opotrebenie. Naopak, hliníková zliatina vykazovala nárast výstupkov a deformáciu povrchu, čo poukazuje na zhoršenú odolnosť voči vyšším kontaktným tlakom a možný vznik adhézneho opotrebenia.



Obr. 3 Závislosť pomerného útlmu od frekvencie pre rôzne ťahovacie momenty

3.2 Numerická simulácia

Numerická simulácia bola vykonaná v prostredí Ansys a slúžila na hodnotenie kontaktnej interakcie v skrutkovom spoji. Model zahŕňal trenie, prítlačnú silu a reálne okrajové podmienky podľa experimentu. Hodnotené boli veličiny ako kontakt-ný tlak, trecie napätie a dráha sklzu. Tieto výstupy umožnili identifikovať oblasti rizikového kontaktu, opotrebenia a potenciálneho lokálneho prekročenia medze pevnosti materiálu. Využitá bola metóda Augmented Lagrange, ktorá poskytla stabilnú konvergenciu aj pri zložitých kontaktných väzbách.



Obr. 4 Rozloženie **dráhy sklzu** (*sliding distance*) v oblasti kontaktu skrutkového spoja, a) spojenie oceľ-oceľ, b) spojenie oceľ – hliníková zliatina

3.3 Výsledky

Z meraní aj numerických simulácií vyplynulo, že veľkosť útlmu skrutkového spoja závisí od veľkosti predpätia – vyšší ťahovací moment viedol k nižšiemu útlmu v dôsledku stabilizácie kontaktu. Povrchové analýzy preukázali, že kombinácia rôznych materiálov (napr. oceľ-hliník) vedie k vyššiemu opotrebeniu a väčšiemu sklzu než spojenie rovnakých materiálov. Simulácie potvrdili, že kritické kontaktné oblasti sa vyznačujú vysokým kontaktným tlakom a trecím napätím, čo môže viesť k plastickým deformáciám. Tieto poznatky môžu byť dôležité pre návrh spoľahlivých spojov v dynamicky namáhaných aplikáciách.

4 NÁVRH POSTUPU URČENIA PARAMETROV TLMENIA PRE POTREBY SPRESNENIA NUMERICKÝCH MODELOV

Presné zavedenie parametrov tlmenia do numerických modelov je kľúčové pre zhodu simulácií s reálnym správaním dynamicky namáhaných konštrukcií. V praxi však býva tlmenie často zanedbané alebo zjednodušene definované, čo vedie k nepresnostiam v predikcii vlastností systémov. Táto časť sa preto zameriava na návrh postupu pre identifikáciu reálnych parametrov tlmenia s cieľom zlepšiť presnosť výpočtových modelov.

4.1 Vplyv meracieho systému na výsledky experimentov

V kapitole bola analyzovaná citlivosť výsledkov vlastných frekvencií na dodanú hmotnosť meracieho systému. Experimenty aj numerické simulácie ukázali, že dodaná hmotnosť (napr. akcelerometra) má významný vplyv najmä na nízke vlastné frekvencie. Pri prekročení určitého hmotnostného pomeru môže dôjsť k skresleniu nameraných frekvencií až o desiatky percent. Výsledky ukázali, že ak má byť zachovaná presnosť merania, hmotnosť snímača by nemala presiahnuť 3–6 % z hmotnosti meranej štruktúry v závislosti od jej tuhosti a frekvenčného rozsahu. [52]

4.2 Tlmenie polymérov

Tlmenie polymérov predstavuje intenzívne skúmanú oblasť, najmä z pohľadu ich využitia v konštrukciách meracích prístrojov či tlmenia vibrácií. Z rešeršných štúdií vyplýva, že tlmiace vlastnosti polymérov sú ovplyvnené predovšetkým vnútorným trením a viskózo-elastickým správaním materiálov. Ukázalo sa, že orientácia vrstiev môže výrazne ovplyvniť mechanické aj modálne vlastnosti výtlačkov. [58][59][60][66]

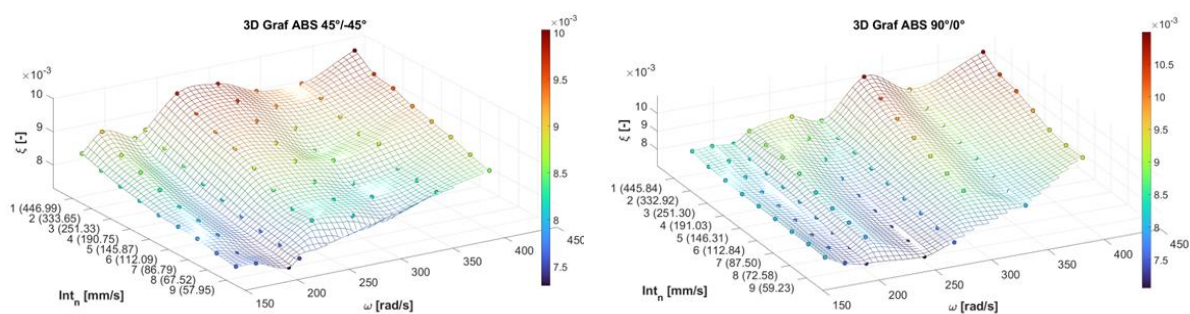
4.2.1 Experimentálne meranie a spracovanie

V rámci experimentálneho merania boli vytvorené polymérové vzorky s rozdielnou orientáciou vlákien a z rôznych materiálov, pričom sa skúmali ich tlmiace vlastnosti pri rôznych frekvenciách. Kmitanie bolo zaznamenávané bezkontaktne pomocou laserového vibrometra.

Na spracovanie experimentálnych meraní bol použitý softvér MATLAB. Surové dáta predstavovali časové priebehy okamžitej výchylky a pred samotnou analýzou museli byť upravené. Na výpočet pomerného útlmu boli aplikované dve metódy: obalová krivka a logaritmický dekrement. Výpočty prebiehali na celom signáli aj na rozdelených intervaloch. Porovnaním výsledkov sa zistilo, že útlm nie je konštantný – mení sa v čase aj podľa amplitúdy. Z hľadiska spoľahlivosti poskytla obalová krivka menšiu smerodajnú odchýlku a teda stabilnejšie výsledky, čo je výhodné najmä pri nelineárnom tlmení. Pri čisto lineárnom správaní sa však javí ako vhodnejší logaritmický dekrement. [68][73]

4.2.2 Vyhodnotenie a čiastkový záver

Z vyhodnotenia experimentálnych meraní vyplynulo, že pomerný útlm testovaných polymérových vzoriek závisí nielen od frekvencie, ale aj od amplitúdy kmitania. Pre každý materiál bolo pozorované rozdielne správanie v závislosti od dynamického zaťaženia – čím bola amplitúda vyššia, tým bol útlm výraznejší. Tento trend sa však nemenil lineárne, čo potvrdzuje aj 3D grafické zobrazenie. Navyše, ukázalo sa, že významný vplyv má aj orientácia vlákien vo vrstvách – rozdiely medzi $0^\circ/90^\circ$ a $45^\circ/-45^\circ$ boli zreteľné pri všetkých materiáloch.



Obr. 5 Závislosť pomerného útlmu od frekvencie a amplitúdy kmitania pre materiál ABS s orientáciou vlákna

a) $45^\circ/-45^\circ$ a b) $90^\circ/0^\circ$

Na overenie trendov v závislosti pomerného útlmu od frekvencie a amplitúdy kmitania bola vykonaná aj lineárna regresná analýza. Cieľom bolo určiť typ trendu správania sa útlmu vzhľadom na frekvenčné zaťaženie a kvantifikovať ho pomocou smernice regresnej priamky. Výsledky ukázali, že väčšina materiálov vykazuje mierny nárast útlmu so zvyšujúcou sa frekvenciou, čo potvrdzuje frekvenčnú závislosť útlmu. Regresná analýza tak potvrdila, že materiálové tlmenie nie je konštantné a mení sa v závislosti od dynamického namáhania, čo je dôležité z hľadiska návrhu a optimalizácie konštrukcií. [76]

4.3 Starnutie polymérov

V kapitole 7 je analyzovaný vplyv prirodzeného aj umelého starnutia na dynamické vlastnosti polyméru PETG. Pomocou umelého starnutia v klimacomore (60 °C, 60 % relatívnej vlhkosti) bolo preukázané, že dlhodobé pôsobenie teploty a vlhkosti vedie k výrazným zmenám pomerného útlmu a vlastných frekvencií. Výsledky poukazujú na komplexnú závislosť medzi starnutím, frekvenciou a amplitúdou, a majú priamy dosah na spoľahlivosť komponentov z polymérov počas ich životnosti.

4.4 Tlmenie polyamidov

V tejto kapitole sú analyzované vzorky polyamidu PA 2200 vyrobené technológiou SLS, s cieľom určiť vplyv orientácie pri tlači na tlmiace vlastnosti. Pomocou bezkontaktnnej metódy s laserovým vibrometrom sa merala okamžitá rýchlosť vzorky. Časový priebeh signálu sa spracoval metódou obalovej krivky a logaritmického dekrementu, za účelom zistenia pomerného útlmu vzoriek. Výsledky ukázali, že pomerný útlm závisí od kombinácie frekvencie a amplitúdy kmitania a nie je určený iba jedným parametrom.

Rozdiely medzi vzorkami č. 1 a č. 2 poukazujú na vplyv orientácie pri aditívnej výrobe a možné mikroštruktúrne odlišnosti. Lineárna regresia potvrdila štatisticky významný vzťah medzi frekvenciou a útlmom. Táto analýza môže byť dôležitá pre návrh komponentov vystavených dynamickému zaťaženiu.

4.5 Tlmenie kovových materiálov

V tejto kapitole sú prezentované experimenty zamerané na zisťovanie pomerného tlmenia kovových materiálov, konkrétne oceľovej tyče z materiálu SJ354. Merania ukázali, že tlmenie ocele nie je amplitúdovo závislé, ale je citlivé na zmeny frekvencie. Údaje boli spracované pomocou obalovej krivky a lineárnej regresie, pričom sa potvrdila frekvenčná závislosť útlmu.

4.5.1 Experimentálne meranie pre zistenie pomerného útlmu prípravku z hliníkovej zliatiny

Na hliníkovom prípravku bolo vykonané experimentálne meranie. Boli použité akcelerometre a modálne kladivko. Zaznamenávala sa funkcia frekvenčnej odozvy (FRF) a na spracovanie sa použila jej reálna a imaginárna časť. Postup spracovania, vzťahy na výpočet a vyhodnotenie sú v [19].

Tab. 1 Zhrnutie výsledkov experimentálneho merania a porovnanie nameraných vlastných frekvencií so simuláciou

Mód	f [Hz] Simulácia	f [Hz] Meranie	Δ [%]	ξ [-]
7	2151	2114	0,017	$6,265 \times 10^{-4}$
8	2429	2376	0,022	$9,362 \times 10^{-4}$
9	2577	2532	0,017	$6,175 \times 10^{-4}$
10	4340	4262	0,018	$4,582 \times 10^{-4}$
11	4658,8	4562	0,021	$5,356 \times 10^{-4}$
12	4952	4860	0,018	$5,486 \times 10^{-4}$

Získané výsledky boli porovnané s numerickou modálnou analýzou (Tab. 1), čím sa overila ich korektnosť. Významom merania bolo určenie reálnych tlmiacich parametrov konkrétneho prípravku, čo má prínos pre ďalšie experimenty alebo návrh mechanických štruktúr.

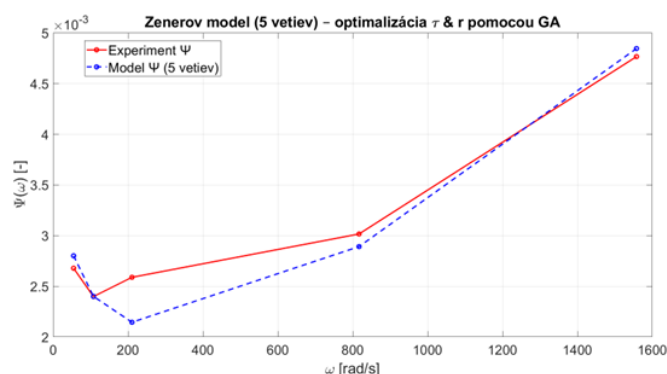
4.6 Experimentálne merania viskoelastického materiálu

V tejto časti bola experimentálne overená možnosť identifikácie frekvenčne závislých tlmiacich vlastností kovových materiálov pomocou rozšíreného Zenerovho modelu (Maxwell-Wiechertov model). Cieľom bolo na základe meraných dát popísať viskoelastické správanie vybraných materiálov a optimalizovať parametre modelu tak, aby čo najpresnejšie vystihovali priebeh tlmiacej funkcie Ψ v celom rozsahu meraných frekvencií. Výsledky boli získané aplikáciou genetického algoritmu, ktorý umožnil efektívne hľadať optimálne nastavenie modelových parametrov.

$$\Psi = 2\pi\omega\tau \frac{\frac{E_S}{E_T} - 1}{1 + \tau^2\omega^2 \frac{E_S}{E_T}} \quad (2)$$

Genetický algoritmus hľadal optimálne hodnoty parametrov modelu – časové konštanty τ_i a pomery modulov E_S/E_T , aby čo najpresnejšie vystihol priebeh tlmiacej funkcie $\Psi(\omega)$. Optimalizácia prebiehala porovnávaním modelových a experimentálnych hodnôt v jednotlivých frekvenčných bodoch.

Počas výpočtu sa vyhodnocovala aktivita jednotlivých vetiev modelu. Neaktívne vetvy boli identifikované a v ďalších krokoch vylúčené. Pre každý materiál bol určený najvhodnejší počet vetiev, pričom výsledné modely vykazovali veľmi dobrú zhodu s experimentálnymi dátami. Parametre boli zaznamenané v tabuľkách a výsledky vizualizované vo forme grafov pre jednoduché porovnanie.



Obr. 6 Porovnanie experimentálnej a modelovej tlmiacej funkcie $\Psi(\omega)$ pre generalizovaný Maxwellov model s piatimi vetvami po optimalizácii pre nerezovú oceľ Böhler M390

Výsledky optimalizácie sú vizuálne potvrdené dobrým súladom medzi experimentálnymi a modelovými hodnotami tlmiacej funkcie $\Psi(\omega)$, ako je zrejmé na Obr. 6. To potvrdzuje správnosť zvoleného postupu a vhodnosť použitého modelu. [74]

4.7 Možnosti ďalšieho výskumu

Ďalší výskum by sa mohol zamerať na detailné skúmanie kontaktných podmienok skrutkových spojov a ich vplyvu na tlmiace vlastnosti, ako aj na pokračovanie analýzy starnutia polymérov, kde sa predpokladá výrazná zmena disipačných vlastností vplyvom degradácie. Perspektívne je aj sledovanie únavového správania skrutkových spojov pri rôznych prevádzkových podmienkach a zavedenie multifyzikálnych prístupov do modelovania, ktoré by integrovali aj elektromagnetické a tepelné vplyvy. Tieto smery prispievajú k presnejšej predikcii dynamickej odozvy a životnosti konštrukčných celkov.

PRÍNOS PRE TECHNICKÚ PRAX

Dizertačná práca analyzuje dynamické správanie prvkov v elektromobilite so zameraním na modálne parametre a vplyv skrutkových spojov, kontaktov a starnutia materiálov. Výsledky kombinujú experiment a numerické modelovanie a sú využiteľné pri optimalizácii technických systémov.

Zvýšenie spoľahlivosti skúšobných zariadení a priebežné sledovanie stavu skúšaných objektov pomocou diagnostických a testovacích metód: V práci bola riešená diagnostika elektrodynamického budiča, ktorý je základným nástrojom pre vibračné budenie testovaných vzoriek. Poruchy, ktoré sa počas experimentov vyskytli, boli analyzované pomocou viacerých metód vrátane akustickej kamery a analýzy hydraulického oleja. Identifikácia technického stavu zariadenia a návrh vhodných opatrení zvyšujú spoľahlivosť a stabilitu meracích systémov, čo je priamo prenositeľné do testovacích laboratórií a priemyselných skúšobní.

Praktická realizácia navrhnutých postupov identifikácie modálnych parametrov pre návrh konštrukcií: Experimentálna modálna analýza realizovaná na rôznych vzorkách umožnila presné určenie vlastných frekvencií, tvarov a predovšetkým pomerného útlmu.

Zohľadnenie skrutkových spojov ako zdroja tlmenia: Skrutkové spoje významne ovplyvňujú dynamické vlastnosti zostáv, najmä tlmenie a tuhosť. Boli preukázané rozdiely v modálnych parametroch pri rôznych ťahovacích momentoch, čo má praktický význam pri montáži a nastavovaní prevádzkových podmienok.

Využitie výsledkov pri návrhu prototypov a numerických modelov: Experimentálne získané dáta môžu byť použité na overenie a korekciu numerických modelov v softvéri ANSYS. Tento prístup umožňuje vytvoriť modely, ktoré realisticky odrážajú správanie testovaných komponentov vrátane skutočných hodnôt tlmenia.

Analýza vplyvu starnutia materiálov na ich vibračné správanie: V práci bol analyzovaný vplyv starnutia polymérov, ktoré po expozícii prostredia vykazovali zmenu pomerného útlmu. To má veľký význam pri dimenzovaní komponentov s dlhodobou životnosťou.

Základ pre vývoj databáz pre technickú prax: Získané experimentálne údaje o materiálovom tlmení, vplyve spojov a prevádzkových stavoch predstavujú cenný podklad pre tvorbu technických databáz. Tieto môžu slúžiť ako referenčné hodnoty pri návrhu alebo verifikácii konštrukčných riešení v oblastiach ako automobilový, elektrotechnický a letecký priemysel.

Zoznam použitej literatúry

- [1] **Doppelbauer, M.** 2018. *History – The invention of electric motor 1800 – 1854.* Elektrotechnisches Institut. [online] [cit. 02-08-2023] Dostupné na internete: <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>
- [2] **Doppelbauer, M.** 2018. *History – The invention of electric motor 1856 – 1893.* Elektrotechnisches Institut. [online] [cit. 02-08-2023] Dostupné na internete: <https://www.eti.kit.edu/english/1390.php>
- [3] **Rohal', V., Spišák, E. a Mulidrán, P.** 2021. *Klasifikácia a výroba elektrotechnickej ocele.* In: Transfer inovácií 44/2021, str. 78 – 81. Dostupné na internete: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/44-2021/pdf/078-081.pdf>
- [4] **Barth, M., Schoppa, A. a Majcherek, S.** 2022. *Rotor and stator in electric motor.* [online] [cit. 20-7-2023] Dostupné na internete: <https://www.teprosa.de/rotor-und-stator/>
- [5] **Osmanbasic, E.** 2020. *The Many Types of EV Motors: The most important considerations of EV motor design.* [online] [cit. 15-6-2023] Dostupné na internete: <https://www.engineering.com/story/the-many-types-of-ev-motors>
- [6] **Mounir, Z., El Hachemi Benbouzid, M. a Diallo, D.** 2006. *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion System: A Comparative Study.* In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, roč. 55, vyd. 6, str. 1756 – 1764. DOI: 10.1109/TVT.2006.878719.
- [7] **Kreidl, M., Šmíd, R.** 2006. *Technická diagnostika.* 1. vyd. Praha: BEN – technická literatúra. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [8] **Tůma, J.**, 1997. *Zpracování signálů z mechanických systémů užitím FFT.* Štramberk, 174 str. ISBN 80-901936-1-7.
- [9] **Bocko, J., Segľa, Š., Huňady, R.** 2017. *Kmitanie mechanických sústav.* Košice: Technická univerzita v Košiciach. 226 str. ISBN 978-80-553-2629-0.
- [10] **Yang, B.** 2001. *Encyclopedia of Vibration: Theory of vibration, fundamentals,* str. 1290 – 1299. DOI: 10.1006/rwvb.2001.0112.
- [11] **Trebuňa, F., Šimčák F. a Huňady, R.** 2012. *Kmitanie a modálna analýza mechanických sústav.* Košice: Technická univerzita v Košiciach. 236 str. ISBN 978-80-553-1206-4.
- [12] **Zbiciak, A. a Kozyra, Z.** 2015. *Dynamic analysis of a soft-contact problem using viskoelastic and fractional – elastic rheological models.* V: Archives of Civil and Mechanical Engineering, volume 15(1), str. 286 - 291.
- [13] **Zuth, D. Vdoleček, F.** 2010. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice.* V: AUTOMA, roč. 2010, vyd. 01, str. 32 – 36.

- [14] **Lecinski, P.** 2021. *Electrical Frequencies Calculation and AC Motor Faults Patterns. Part 1.* [online] [cit. 30-7-2023] Dostupné na internete: <https://www.cbmconnect.com/electrical-frequencies-calculation-and-ac-motor-faults-patterns-part-1/>
- [15] **Fernandez, A.** 2023. *Troubleshooting.* [online] [cit. 3-8-2023] Dostupné na internete: <https://power-mi.com/content/troubleshooting>
- [16] **Berry, J. E.** 1995. *Intensive vibration diagnostics.* SKF Condition Monitoring, Zaltbommel, Charlotte, 1995.
- [17] **Miljković, D.** 2015. *Brief review of motor current signature analysis.* [online] [cit. 3-8-2023] Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/304094187_Brief_Review_of_Motor_Current_Signature_Analysis
- [18] **Verucchi, C. J., Acosta, G. G. a Bengier, F. A.** 2008. *A review on fault diagnosis of induction machines.* V: Latin American applied research, vyd. 38, č. 2, str.
- [19] **Bilošová, A.** 2012. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část modální zkoušky.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. 129 str. ISBN 978-80-248-2758-2.
- [20] **Tirinda, P.** 2011. *Základní principy vibrodiagnostiky a jej prínos pre prax.* V: ATP journal, roč. 2011, vyd. 5, str. 18 - 19. ISSN 1335-2237.
- [21] **Hagara, M., Kalina, M., Schrötter,** 2012. *Vyšetrenie kmitania dverí automobilu využitím metódy digitálnej obrazovej korelácie.* V: ATP journal PLUS, roč. 2012, vyd. 1, str. 66 – 70.
- [22] **Siebert, T. a Splitthof, K.** 2010. *Vibration Analysis using 3D Image Correlation Technique.* V: EDP Sciences, EPJ Web of Conferences, roč. 2010, vyd. 6. DOI: 10.1051/epjconf/20100611004.
- [23] **Frankovský, P., Delyová, I., Sivák, P. a kol.** 2022. *Modal Analysis using Digital Image Correlation Technique.* V: Materials, roč. 15, vyd. 16. DOI: 10.3390/ma15165658.
- [24] **Janiček, P.** 2004. *Technický experiment, vybrané kapitoly.* [online] [cit. 6-8-2023] Dostupné na internete: <http://www.umat.fme.vutbr.cz/images/opory/Technicky%20experiment%20vybrane%20kapitoly/TE.pdf>
- [25] **Zbiciak, A. and Kozyra, Z.** 2015. *Dynamic analysis of a soft-contact problem using viskoelastic and fractional-elastic rheological models.* V: Archives of Civil and Mechanical Engineering, roč. 15(1), str. 286-291.
- [26] **Woodhouse, J.** 1998. *Linear damping models for structural vibration.* V: Journal of Sound and Vibration, roč. 215(3), str. 547-569.
- [27] **Mathis, T. A., Balaji, N. N., Kuether, J. R., Brink R. A., Brake R. W. M., Quinn D.** 2020. *A Review of Damping Models for Structures with Mechanical Joints.*

- [28] **Liu Q., Wand Y., Sun, P., Wang, D.** 2022. *Comparative Analysis of Viscous Damping Model and Hysteretic Damping Model*. V: Applied Sciences, roč. 12 (23), vyd. 13. DOI: 10.3390/app122312107.
- [29] **Khamas I. J. and Lafta H. D.** 2023. *Effect of Heat Treatment and Carbod Content on the Damping Properties of Structural Steel*. V: Journal of Engineering, roč. 29, vyd. 7, str. 106 – 119. DOI: 10.31023/j.eng.2023.07.07.
- [30] **Hu S., Xin L., Menggang Y., Na Z.** 2023. *Research on the coordinated damping performance of the combined viscous-steel damping system*. V: China Civil Engineering Journal. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21121256.
- [31] **Acosta, G. G., Verucchi, C. J., Gelso, E. R.** 2006. *A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors*. V: Mechanical System and Signal Processing, roč. 20, vyd. 4, str. 953 – 965. DOI: 10.1016/j.mssp.2004.10.001
- [32] **Castellini, P., Martarelli, M. a Tomasini, E. P.** 2006. *Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs*. V: Mechanical System and Signal Processing, roč. 20, vyd. 6, str. 1265 – 1285. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.11.015.
- [33] **Cristalli, C., Paone, N. a Rodríguez, R. M.** 2006. *Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements*. V: Mechanical Systems and Signal Processing, roč. 20, vyd. 6, str. 1350 – 1361. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.11.013.
- [34] **De Sousa, K.C. a kol.** 2016. *Modal parameter determination of lightweight aerospace panel using laser Doppler vibrometer measurements*. V: AIP Conference Proceedings, roč. 1740, vyd. 1. DOI: 10.1063/1.4952683.
- [35] **Wang, J. T., Jin, F. a Zhang, Ch. H.** 2012. *Estimation error of the half-power bandwidth method in identifying damping for multi-DOF systems*. V: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, roč. 39, str. 138-142. DOI: 10.1016/j.soildym.2012.02.008.
- [36] **Liao, Y. a Wells, V.** 2011. *Modal parameter identification using the log decrement method and band-pass filters*. V: Journal of Sound and Vibration, roč. 330, vyd. 21, str. 5014-5023. DOI: 10.1016/j.jsv.2011.05.017.
- [37] **Hrebennikov, M. M., Dibir, O. H., Kyrpikin, A. O., Pekelnyi, M. I.** 2023. *Use of Logarithmic Decrement of Oscillation Damping for Prediction of the Aviation Structures Service Life*. V: Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia, roč. 26, č. 1, str. 23-28. DOI: 10.31023/j.eng.2023.07.07.
- [38] **Hudák, R. a Hořvová, P.** 2013. *Možnosti využitia viacparametrickej diagnostiky v technickej praxi*. V: Transfer inovácií, roč. 25/2013, str. 81-84. [online] [cit. 25-9-2023] Dostupné na internete: https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/25-2013/25_2013.htm

- [39] **Bložor, B.** 2009. *Stúpajúca vážnosť technickej diagnostiky*. V: Atp journal, roč. 5/2009. ISSN 1335-2237.
- [40] **Sun, Q., Chen, P., Zhang, D., Xi, F.** 2014. *Pattern Recognition for Automatic Machinery Fault Diagnosis*. V: Journal of Vibration and Acoustics, roč. 126, str. 307-316. DOI: 10.1115/1.1687391.
- [41] **Turk, N.** 2016. *Fault Diagnosis Using Park's Vector Approach*. V: International Journal of Electrical and Computer Engineering, roč 8, č.1, str. 7-11. ISSN 0974-2190.
- [42] **Vilhekar, T., Ballal, M. a Suryawanshi, H. M.** 2017. *Application of Multiple Parks Vector Approach for Detection of Multiple Faults in Induction Motors*. V: Journal of Power Electronics, roč. 17, č. 17, str. 972-982. DOI: 10.6113/JPE.2017.17.4.972.
- [43] **Parra, A. P., Gutierrez, J. L. O. a Ochoa, J. O.** 2016. *Online Electric Current Based Diagnosis of Stator Faults on Squirrel Cage Induction Motors*. V: International Journal of Energy and Power Engineering, roč. 10, č. 12, str. 1475-1483. DOI: 10.5281/zenodo.1127916.
- [44] **Thorsen, O. V. a Dalva, M.** 1998. *Methods of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors*. V: European Transactions on Electrical Power, roč. 8, č. 5, str. 383-395.
- [45] **De Silva, C. W. a kol.** 2007. *Vibration Damping, Control and Design*. Veľká Británia: Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4200-5321-0.
- [46] **Rivin, E., I.** 1999. *Stiffness and Damping in Mechanical Design*. 1. vyd. New York: Marcel Dekker, Inc. ISBN: 0-8247-1722-8.
- [47] **Pereira, R., Arenas, J.P. a Zumelzu, E.** 2011. *Comparison of four test methods to measure damping properties of materials by using piezoelectric transducers*. V: Materials and Design, vyd. 32.
- [48] **Ahmed, I., Ahmed, M., Imran, K., Khan, M. S., Akhtar, J.** 2011. *Detection of Eccentricity Faults in Machine Using Frequency Spectrum Technique*. V: International Journal of Computer and Electrical Engineering, roč. 3, č. 1, str. 111-119. DOI: 10.7763/IJCEE.2011.V3.300.
- [49] **Trebuňa, F. a Šimčák, F.** 2007. *Príručka experimentálnej mechaniky*. 1. vyd. Košice: TypoPress. ISBN 970-80-8073-816-7.
- [50] **Illéš, M.** 2022. *Volkswagen a Mahindra podpísali dohodu o spolupráci*. [online] [cit. 10.5.2023] Dostupné na internete: <https://automoto.touchit.sk/volkswagen-a-mahindra-podpisali-dohodu-o-spolupraci/4675/>
- [51] **Nijhawan, A.** 2023. *From Gate Drivers to E-fuse Demonstrators, SiC Devices Target EV Tech*. [online] [cit. 5.5.2023] Dostupné na internete: <https://www.allaboutcircuits.com/news/from-gate-drivers-to-e-fuse-demonstrators-sic-devices-target-ev-tec/>

- [52] **Drvářová, B., Dekýš, V. a Pijáková, K.** 2023. *Effect of accelerometer mass on the natural frequencies of the measured structure*. V: 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern, and Safe Transport. (V procese spracovania)
- [53] https://ufmi.ft.utb.cz/texty/mech_term/F2_02.pdf
- [54] **Dekýš, V., Stankovičová, Z., Novák, P., Štalmach, O.** 2018. *The contribution to the modal analysis using an infrared camera*. In: MATEC Web of Conferences, roč. 157.
- [55] **Zapomněl, J., Dekýš, V., Ferfecki, P., Sapietová, A., Sága, M. a Žmindák, M.** 2015. *Identification of material damping of a carbon composite bar and study of its effect on attenuation of its transient lateral vibrations*. V: International journal of applied mechanics, roč. 7, č.6. DOI: 10.1142/S1758825115500817.
- [56] **Helebrant, F., Ziegler, J. a Marasová, D.** 2000. *Technická diagnostika a spolehlivost I. Tribodiagnostika*. VŠB – technická univerzita Ostrava.
- [57] **Stachowiak, G. a Batchelor, A.** 2014. *Engineering Tribology*. ISBN: 978-0-12-397047-3.
- [58] **Treviso, A., Van Genechten, B., Mundo, D., & Tournour, M.** 2015. *Damping in composite materials: Properties and models*. *Composites Part B: Engineering*, 78, str. 144–152.
- [59] **Kim, J., Lee, S., Bae, G. Y., Moon, W.** 2022. *Evolution of polymer materials for MEMS microphones*. V: Journal of Microelectromechanical Systems, č. 31, vyd. 4, str. 673-682.
- [60] **Wu, J., Mizuno, Y., Tabaru, M., Nakamura, K.** 2015. *Ultrasonic motors with polymer-based vibrators*. V: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, č. 62, vyd. 14, str. 2169-2178.
- [61] **Gaul, L. a Nitsche, R.** 2001. *The Role of Friction in Mechanical Joints*. V: Applied Mechanics Reviews. DOI: 10.1115/1.3097294.
- [62] **Goyder, H., Lancereau, D., Ind, P., Brown, D.** 2016. *Friction and damping associated with bolted joints: results and signal processing*. V: Proceedings of ISMA2016Including USD2016.
- [63] **Gaul, L. a Becker, J.** 2010. *Damping prediction of structures with bolted joints*.
- [64] **Folkman, S., Bingham, J. G., Crookston, J. R., Dutson, J. D., Ferney, B. D., Ferney, G. D. a Rowsell, A. E.** 1997. *The Joint Damping Experiment (JDX)*. V: NASA Center for Aerospace Information. Dostupné na internete: <http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs/ltrs.html>
- [65] **Richardson, M. H.** 1986. *Global frequency & damping estimates from frequency response measurements*. V: 4th IMAC Conference.
- [66] **Subbarao, Ch. V., Reddy, Y. S., Inturi, V. a Reddy, M. I.** 2021. *Dynamic Mechanical Analysis of 3D Printed PETG Material*. V: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, roč. 1057 (1): 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1057/1/012031.
- [67] **Taylor, J. R.** 1997. *An introduction to Error Analysis: The study of uncertainties in physical measurements*. 2. vyd., California: University Science Books.

ISBN 0-935702-42-3.

- [68] **Inman, J. D.** 2014. *Engineering Vibration*. 4. vyd., Pearson Education. ISBN 978-0-13-287169-3.
- [69] **Al-hababi, T., Cao, M., Saleh, B., Alkayem, N. F. a Xu, H.** 2020. *A Critical Review of Nonlinear Damping Identification in Structural Dynamics: Methods, Applications, and Challenges*. V: Sensors, vyd. 20, č. 24. DOI: 10.3390/s20247303.
- [70] **Omar, O., Tounsi, N., Ng, E. a Elbestawi, M. A.** 2010. An optimized rational fraction polynomial approach for modal parameters estimation from FRF measurements. V: Journal of Mechanical Science and Technology 24 (3). DOI: 10.1007/s12206-010-0123-z.
- [71] **Pandiya, N. a Desmet, W.** 2021. *Direct Estimation of Residues from Rational-fraction Polynomials as single-step modal identification approach*. V: Journal of Sound and Vibration, č. 517. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116530.
- [72] **Blaškoviš, P., Balla, J. a Dzimko, M.** 1990. *Tribológia*. Bratislava: Alfa, 360 s. ISBN 80-05-00633-0.
- [73] **Drvárová, B., Deganová, L., Novák, P., Zapomňel, J. a Dekýš, V.** 2024. *Comparison of Dissipation Energy in PLA, ABS and PETG Materials Used in 3D Printing*. V: Acta Physica Polonica A, č. 6, vyd. 145. DOI: 10.12693/APhysPolA.145.810.
- [74] **Chehouri, A., Younes, R., Perron, J. a Ilinca, A.** 2016. A Constraint-Handling Technique for Genetic Algorithms using a Violation Factor. V: Journal of Computer Sciences, č. 12, vyd. 7. DOI: 10.3844/jcssp.2016.350.362.
- [75] **Cardoso, A. J. M., Cruz, S., a Fonseca, D. S. B.** 1999. *Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach*. V: IEEE Transactions on Energy Conversion, č.14, vyd. 3. DOI: 10.1109/60.790920.
- [76] **Anděl, J.** 1978. *Matematická statistika*. Alfa: vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava, 346 str.

PUBLIKOVANÁ LITERATÚRA AUTORA

- [1] Šavrnich, Z., Sapieta, M., Dekýš, V., Drvárová, B., Pijáková, K., Sapietová, A. a Sága, M. 2024. *Probabilistic Analysis of Orbital Characteristics of Rotary Systems with Centrally and Off-Center Mounted Unbalanced Disks*. V: Applied Sciences, roč. 14, č. 19. DOI: 10.3390/app14198810.
- [2] Drvárová, B., Deganová, L., Novák, P., Zapomněl, J. a Dekýš, V. 2024. *Comparison of Dissipation Energy in PLA, ABS and PETG Materials Used in 3D Printing*. V: Acta Physica Polonica Series A, roč. 146, č. 6. DOI: 10.12693/APhyPolA.146.810.
- [3] Šavrnich, Z., Sapietová, A. a Drvárová, B. 2024. *Solver Analysis For a Rotary Machine Model In Msc.Adams*. Conference Paper. Applied Mechanics.
- [4] Sapieta, M., Dekýš, V., Kaco, M., pástor, M., Sapietová, A. a Drvárová, B. 2023. *Investigation of the Mechanical Properties of Spur Involute Gearing by Infrared Thermography*. V: Applied Sciences, roč. 13, č. 10. DOI: 10.3390/app13105988.
- [5] Drvárová, B., Dekýš, V. a Pijáková, K. 2023. *Effect of accelerometer mass on the natural frequencies of the measured structure*. V: Transportation Research Precedia. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.205.
- [6] Pijáková, K., Sága, M., Štalmach, O., Vaško, M. a Drvárová, B. 2023. *Software Support for Evaluating the Hardness Tests of Construction Materials Used in Vehicles*. V: Transportation Research Precedia. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.189.
- [7] Deganová, L., Dekýš, V., Sapieta, M. a Drvárová, B. 2024. *Creation of Algorithms in MATLAB Environment for Non-Destructive Testing*. Conference Paper. Applied Mechanics (2024)
- [8] Deganová, L., Dekýš, V., Drvárová, B., Švantner, M. a Sapietová, A. 2025. *Defect Analysis in 3D-Printed PLA Materials Using Pulsed Thermography and Advanced Post-Processing Techniques*. Conference Paper. Transcom (2025)
- [9] Deganová, L., Dekýš, V., Drvárová, B., a Vereš, M. 2025. *Non-Destructive Evaluation of Moisture in Honeycomb Structures Using Pulsed Thermography and Post-Processing Methods*. Conference Paper. Applied Mechanics (2025)
- [10] Drvárová, B., Sága, M., Pijáková, K. a Dekýš, V. 2023. *Software Implementation of the FEM Velocity Formulation Into Prandtl-Reuss Relations for Solving Elastoplastic Continuum Mechanics Problems*. Conference Paper. Applied Mechanics (2023)
- [11] Drvárová, B., Deganová, L., Dekýš, V. a Sapieta, M. 2024. *Effect of PETG Composite Fibre Orientation on Damping*. Conference Paper. Applied Mechanics (2024)
- [12] Drvárová, B., Deganová, L. a Dekýš, V. 2025. *Experimental Investigation of the Impact of Print Orientation on the Damping Ratio of SLS – Manufactured PA 2200 Material*. Conference Paper. Applied Mechanics (2025)

RESUMÉ

V dizertačnej práci bol realizovaný experimentálny výskum dynamických vlastností vybraných kovových a polymérnych komponentov, ktoré sa uplatňujú v elektromobilite. Pozornosť bola zameraná na stanovenie modálnych parametrov – vlastných frekvencií, vlastných tvarov a pomerného útlmu – ktoré sú rozhodujúce pri hodnotení vibračného správania technických sústav. Výskum zahŕňal diagnostiku budiaceho zariadenia, charakteristiku materiálov s rôznym tlmením, vplyv konštrukčných spojov a degradáciu polymérov vplyvom starnutia. Výsledky môžu byť využité na posúdenie vplyvu prevádzkových a montážnych podmienok na útlmové správanie jednotlivých komponentov.

V rámci úvodnej časti bola analyzovaná problematika kmitania elektrodynamického budiča, ktorý slúži ako zdroj dynamického budenia. Z dôvodu jeho opotrebenia sa odporúča priebežné sledovanie jeho technického stavu. Následne bola pozornosť zameraná na tlmiace vlastnosti hliníkových a oceľových materiálov, kde sa zistili rozdiely v hodnotách pomerného útlmu a vlastných uhlových frekvencií. Hodnoty namerané v tejto časti môžu tvoriť vstup pre tvorbu realistických modálnych modelov v ďalšom vývoji.

V ďalšej časti boli analyzované skrutkové spoje s rôznym ťahovacím momentom a materiálovou konfiguráciou. Experimentálne sa potvrdilo, že vyššie predpätie znižuje pomerný útlm. Meraním profilovej drsnosti pred a po zaťažení boli identifikované rozdielne mechanizmy opotrebenia – abrazívne pri oceli a plastické deformácie pri hliníku. Vytvorený model kontaktu umožnil lokalizáciu kritických oblastí v spoji.

Špecifická časť bola venovaná polymérnym materiálom vyrábaným 3D tlačou, kde sa skúmal vplyv orientácie filamentu, amplitúdy a frekvencie kmitania na pomerný útlm. Preukázaná bola závislosť útlmu od všetkých spomenutých parametrov. Bola vykonaná lineárna regresia medzi frekvenciou a mierou tlmenia. Experimentálnym spracovaním bolo overené, že orientácia tlače výrazne ovplyvňuje disipačné vlastnosti materiálu. Tieto závery môžu mať priamy význam pri návrhu plastových komponentov elektromobilov.

Ďalšia časť výskumu sa zamerala na vplyv umelého starnutia polymérov v klimateckej komore. Výsledky ukázali nelineárne zmeny pomerného útlmu v závislosti od času vystavenia zvýšenej teplote a vlhkosti. Pri krátkodobom starnutí došlo k poklesu útlmu, zatiaľ čo strednodobý čas viedol k jeho miernemu zvýšeniu. Po prekročení 1000 hodín sa pozoroval pokles útlmu a zároveň nárast vlastných frekvencií, čo naznačuje zvýšenie tuhosti a pokles pružnosti materiálu.

Súčasťou práce bola tiež optimalizácia parametrov rozšíreného Zenerovho modelu pomocou genetického algoritmu. Výsledky ukázali, že model s piatimi vetvami postačuje na spoľahlivú aproximáciu tlmiacej funkcie, pričom jednotlivé vetvy bolo možné vizualizovať a kvantifikovať ich príspevok k celkovému správaniu systému.

Výstupy dizertačnej práce môžu mať uplatnenie pri hodnotení dynamického správania technických komponentov, návrhu mechanických zostáv a posudzovaní spoľahlivosti súčiastok pracujúcich v reálnych podmienkach elektromobility.

SUMMARY

This dissertation presents an experimental investigation of the dynamic properties of selected metallic and polymer components used in electromobility. The focus was placed on determining modal parameters—natural frequencies, mode shapes, and damping ratios—which are essential for evaluating the vibrational behavior of technical systems. The research included diagnostics of the excitation system, characterization of materials with varying damping behavior, the influence of mechanical joints, and the degradation of polymers due to aging. The results can be used to assess the impact of operational and assembly conditions on the damping behavior of individual components.

In the initial phase, the vibration behavior of the electrodynamic shaker used as the excitation source was analyzed. Due to its wear during testing, continuous monitoring of its technical condition is recommended. The study then focused on the damping characteristics of aluminum and steel materials, revealing differences in damping ratios and natural angular frequencies. The measured values may serve as input for the development of realistic modal models in further applications.

The next part of the work analyzed bolted joints with different tightening torques and material combinations. The experiments confirmed that higher preload reduces the damping ratio. Surface roughness measurements before and after loading identified different wear mechanisms—abrasive wear in steel and plastic deformation in aluminum. The developed contact model allowed the localization of critical areas in the joint.

A dedicated section focused on polymer materials produced by 3D printing, analyzing the influence of filament orientation, vibration amplitude, and frequency on the damping ratio. A dependency of damping on all these parameters was confirmed. Linear regression was performed between frequency and damping. The experimental evaluation demonstrated that print orientation significantly affects the dissipation properties of the material. These findings may be directly applicable to the design of plastic components in electromobility.

Another part of the research addressed the influence of artificial aging of polymers in a climatic chamber. The results showed non-linear changes in the damping ratio depending on exposure time to elevated temperature and humidity. Short-term aging resulted in decreased damping, mid-term exposure caused a slight increase, and after 1000 hours the damping decreased again while natural frequencies increased—indicating increased stiffness and reduced elasticity of the material.

The study also included the optimization of parameters in an extended Zener model using a genetic algorithm. The results showed that a model with five branches is sufficient for reliable approximation of the damping function, with each branch visualized and its contribution to overall system behavior quantified.

The outcomes of this dissertation may be applied to the assessment of dynamic behavior of technical components, the design of mechanical assemblies, and the evaluation of the reliability of parts operating under real electromobility conditions.