



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY

BAKALŘSKÁ PRÁCE

NÁZEV:

MODÁLNÍ ANALÝZA KOMPOZITOVÉ DESKY

MODAL ANALYSIS OF COMPOSITE PANEL

Autor:

Jakub Eštok

Studijní program:

Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jakub Valenta

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Eštok** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **492644**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modální analýza kompozitové desky

Název bakalářské práce anglicky:

Modal analysis of composite panel

Pokyny pro vypracování:

Úkolem této práce je provést modální analýzu kompozitové desky.

Body zadání:

- Úvod do modálních zkoušek
- Příprava měřených vzorků
- Měření modálních parametrů
- Vyhodnocení měření

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Valenta ústav letadlové techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jakub Valenta
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma: „Modální analýza kompozitové desky“ vypracoval samostatně a jako podklady mi sloužila literatura uvedená v seznamu na konci bakalářské práce a moje vlastní měření.

V Praze dne

.....

Jakub Eštok

Poděkování

Tuto stránku bych rád využil jako poděkování panu Ing. Jakubovi Valentovi za jeho pomoc, čas a vedení či už při získávání informací, nebo při samotném měření. Můj vděk také patří Ústavu letadlové techniky za poskytnutí prostorů pro moje měření. V první řadě bych se chtěl poděkovat mé rodině za neustálou podporu ve všech směrech. Ještě jednou Vám všem děkuji, bez Vás by tato práce nemohla vzniknout.

Anotační list

Jméno autora:	Jakub EŠTOK
Název BP:	Modální analýza kompozitové desky
Rok:	2022
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí práce:	Ing. Jakub Valenta
Bibliografické údaje:	Počet stran: 57
	Počet obrázků: 40
	Počet grafů: 29
	Počet tabulek: 8
	Počet příloh: 2

Anotace

Cílem této bakalářské práce je získat hlubší pochopení a demonstrovat praktické využití modální analýzy jako nástroje pro měření leteckých konstrukcí. Dále také zjistit vliv vybraného upevnění budiče k měřenému vzorku. Po rešeršní části zabírající se teorií modální analýzy je samotné měření opsáno a vyhodnoceno. Měření bylo provedeno dle postupu, který se využívá i při měřeních pro komerční účely.

Klíčová slova: Modální analýza, kompozitový prvek, měření

Annotation list

Name of the author:	Jakub EŠTOK
Bachelor thesis:	Modal analysis of composite panel
Year:	2022
Study program:	Theoretical Fundamentals of Mechanical Engineering
Specialization:	2301R000 without specialization
Department:	Department of Aerospace Engineering
Thesis supervisor:	Ing. Jakub Valenta
Bibliographic data:	Number of pages: 57 Number of pictures: 40 Number of graphs: 29 Number of tables: 8 Number of attachments: 2

Annotation

The aim of this bachelor thesis is to gain a deeper understanding as well as to demonstrate the practical use of modal analysis as a tool of measurement for aircraft structures. The goal is also to determine the influence of the chosen attachment of the exciter on the measured part. After a research section dealing with the theory of modal analysis, the measurements are described and evaluated. The measurements were conducted according to a procedure that is also used for commercial measurements.

Keywords: Modal analysis, composite structure, measurement

Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Modální analýza.....	13
2.1.	Módy	14
2.2.	Vlastní frekvence.....	14
2.3.	Rezonance a rezonanční frekvence	14
3.	Měřicí přístroje a buzení.....	15
3.1.	Piezoelektrický akcelerometr	16
3.2.	Snímače síly	16
3.3.	Budiče	17
3.4.	Modální kladívko	17
3.4.1.	Špička kladívka.....	18
3.5.	Modální budič.....	19
3.5.1.	Permanentní magnetický budič.....	19
3.5.2.	Modální budič.....	19
3.5.3.	Inerciální budiče	20
4.	Měření	21
4.1.	Body buzení.....	21
4.2.	Měřicí síť.....	21
4.3.	Uložení budiče.....	23
4.4.	Typy budící frekvence	23
4.5.	Náhodný burst	24
4.6.	Sine Sweep	24
4.7.	Soustavy	24
4.8.	Fyzická příprava soustavy	25
4.9.	Výsledná data před zpracováním.....	25
5.	Zpracování dat	26
5.1.	Chyba měření- aliasing.....	26
5.2.	Chyba měření- únik (leakage)	26
5.2.1.	Okénkování	27
5.3.	Průměrování.....	27

5.4.	Rychlá Fourierova transf.– fast Fourier transform - FFT.....	27
5.5.	Frekvenční přenosová funkce- FRF- frequency response function	28
5.6.	Koherence	28
5.7.	MIF- mode indicator function- funkce na odhalení módů	29
5.8.	Další pomůcky	29
6.	Příprava měření	31
6.1.	Vybavení.....	31
6.2.	Cíl.....	31
6.3.	Postup přípravy	32
6.4.	Zapojení akcelerometru	33
6.5.	Software	33
7.	Měření	34
7.1.	Měřicí síť.....	34
7.2.	Postup měření.....	35
7.2.1.	Měření ohybu s jednou kleštinkou	35
7.2.2.	Měření ohybu se závažím	36
7.2.3.	Měření ohybu se změněným upnutím	36
7.2.4.	Měření ohybu se dvěma budiči	37
7.2.5.	Měření torze se dvěma kleštinami	37
7.3.	Výstup	37
8.	Vyhodnocení.....	38
8.1.	Měření ohybu s jednou kleštinkou	38
8.2.	Měření ohybu se závažím, změněným upnutím a dvěma budiči	41
8.3.	Měření torze se dvěma kleštinami.....	41
9.	Výsledky měření	42
10.	Závěr.....	44
	Bibliografie	45
	Příloha 1 – Měření:.....	46
	Příloha 2- Módy:.....	48

Seznam obrázků

Obrázek 1 Model systému s 1 stupněm volnosti	14
Obrázek 2 Módy	14
Obrázek 3 Piezoelektrický akcelerometr	16
Obrázek 4 Piezoelektrický snímač síly	16
Obrázek 5 Použití modálního kladívka	18
Obrázek 6 Součásti modálního kladívka	18
Obrázek 7 Struktura modálního budiče	19
Obrázek 8 Stavba modálního budiče	20
Obrázek 9 Detail ocasních ploch s akcelerometry	21
Obrázek 10 Detail upevnění akcelerometru	22
Obrázek 11 Ocasní plochy s akcelerometry	23
Obrázek 12 Detail upevnění budiče	23
Obrázek 13 Diskretizace spojitého signálu s nízkou vzorkovací frekvencí	26
Obrázek 14 Vliv zvoleného okna na signál	27
Obrázek 15 Deska V1 připravena na měření s upnutým budičem a akcelerometrem na bodě 101.....	32
Obrázek 16 Měřicí stanice.....	33
Obrázek 17 V1 ohyb	34
Obrázek 18 V2 torze.....	34
Obrázek 19 No.2 tvar FRF.....	40
Obrázek 20 Výchylky při kmitání, kmitání s volným koncem (nahore), kmitání s podpěrou (dole)	43
Obrázek 21 Měřicí soustava s konfigurací V1 při měření	46
Obrázek 22 Měřicí soustava s deskou v konfiguraci V2 před měřením torze	46
Obrázek 23 Detail uložení dvou budičů	46
Obrázek 24 Kalibrace snímače	46
Obrázek 25 Porovnání velikosti akcelerometru 4517 proti kávové lžičce	47
Obrázek 26 Detail měřicí konfigurace V1.....	47
Obrázek 27 Detail uložení snímače na bodě 104.....	47
Obrázek 28 Akcelerometr 4517	47
Obrázek 29 Přídavné závaží.....	47
Obrázek 30 Detail dvou kleštinek při měření konfiguraci V2	47
Obrázek 31 Tvar 1. ohybového módu při měření základního ohybu	48
Obrázek 32 Tvar 2. ohybového módu při měření základního ohybu	49
Obrázek 33 Tvar 3. ohybového módu při měření základního ohybu	50
Obrázek 34 Tvar 1. ohybového módu při měření ohybu se změněným upnutím.....	51
Obrázek 35 Tvar 1. ohybového módu při měření ohybu se závažím	52
Obrázek 36 Tvar 1. ohybového módu při měření ohybu se dvěma budiči.....	53
Obrázek 37 Tvar 1. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	54

Obrázek 38 Tvar 2. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	55
Obrázek 39 Tvar 3. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	56
Obrázek 40 Tvar 4. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	57

Seznam grafů:

Graf 1 Graf rezonance osa.....	15
Graf 2 FRF v závislosti na tvrdosti špičky kladívka	18
Graf 3 funkce náhodný burst	24
Graf 4 funkce Sine Sweep.....	24
Graf 5 Příklad FRF funkce	25
Graf 6 Koherence	29
Graf 7 Měření typu BURST	38
Graf 8 No.2 graf FRF	40
Graf 9 No.2 graf FRF	40
Graf 10 Graf 1. ohybového módu při měření základního ohybu	48
Graf 11 Graf 1. ohybového módu při měření základního ohybu	48
Graf 12 Graf 2. ohybového módu při měření základního ohybu	49
Graf 13 Graf 2. ohybového módu při měření základního ohybu	49
Graf 14 Graf 3. ohybového módu při měření základního ohybu	50
Graf 15 Graf 3. ohybového módu při měření základního ohybu	50
Graf 16 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se změněným upnutím	51
Graf 17 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se změněným upnutím	51
Graf 18 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se závažím	52
Graf 19 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se závažím	52
Graf 20 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se dvěma budiči	53
Graf 21 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se dvěma budiči	53
Graf 22 Graf 1. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	54
Graf 23 Graf 1. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	54
Graf 24 Graf 2. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	55
Graf 25 Graf 2. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	55
Graf 26 Graf 3. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	56
Graf 27 Graf 3. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	56
Graf 28 Graf 4. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	57
Graf 29 Graf 4. torzního módu při měření torze se dvěma budiči	57

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Typy modálních kladívek a jejich vyžití.....	17
Tabulka 2 Seznam použitého vybavení	31
Tabulka 3 Seznam měřených frekvencí pro ohyb s jednou kleštinkou.....	39
Tabulka 4 Naměřené módy při měření ohybu s jednou kleštinkou	39
Tabulka 5 Naměřené módy při měření ohybu se závažím, změněným upnutím a dvěma budiči	41
Tabulka 6 Naměřené módy při měření torze se dvěma kleštinkami	41
Tabulka 7 Seznam módů	42
Tabulka 8 Porovnání měření ohybu	43

Seznam příloh:

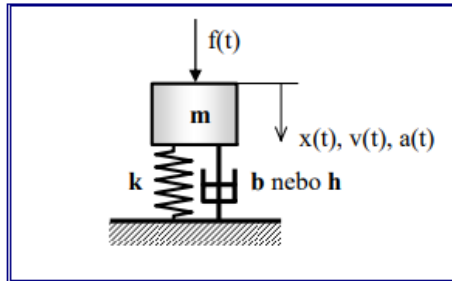
Příloha 1- Měření.....	46
Příloha 2- Módy.....	48

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je získat hlubší pochopení, demonstrovat praktické využití modální analýzy, jako nástroje pro měření leteckých konstrukcí. Dále také zjistit vliv vybraného upevnění budiče k měřenému vzorku. Modální analýzu provádíme za účelem získání potřebných dat popisujících parametry letounu tak, abychom zabránili vzniku jevu, který je zván flutter. Flutter je obzvlášť nebezpečný jev, při kterém se součásti svým kmitáním dostanou do rezonance, a pak už následuje samovolné, neplánované odpojení součásti od draku vedoucí k absolutní destrukci letounu. Jevu se snažíme zabránit posunutím rezonančních frekvencí draku na hodnoty mimo provozní intervaly. Z povahy flutteru je zřejmé, že nastává jenom v ojedinělých a speciálních případech, a proto je u některých malých stavitelů letounů trend „odbít“ zkoušku co nejlevněji, nejrychleji a v zámoří, s jinými regulacemi, jí možná neprovádět vůbec. Toto jednání je dle mého názoru nezodpovědné. Tyto zkoušky jsou však poměrně časově i cenově nákladné a proto je potřeba tuto sféru neustále zdokonalovat a zkoumat. Má práce se zaměřuje na demonstraci provedení modální analýzy na malé kompozitové destičce a následného vyhodnocení měření. Ačkoli je moje práce zaměřená na malou destičku, naskytla se mi příležitost, díky praktickému působení mé školy a mého vedoucího bakalářské práce, provést měření na reálném letounu. Měl jsem možnost si všechno vyzkoušet, tak jak se to dělá pro reálného klienta. Této zkušenosti si velmi vážím a tímto bych chtěl za ní poděkovat.

2. Modální analýza

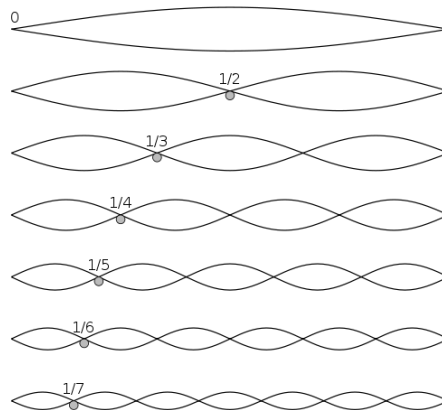
Modální analýza je nástroj na získávání matematického popisu dynamického chování testovaných struktur nebo součástí. Využíváme jí, na příklad jako v našem případě, na zjištění vlivu různých vibrací na měřenou součást. Znalost působení vibrací na vzorek je důležitá hlavně v letectví, kde vibrace způsobené aerodynamickými jevy značně ovlivňují konstrukci. Jejich zanedbání se může projevit v neoptimálních letových vlastnostech, nebo dokonce jako poruchy konstrukce s fatálními následky. Za pomoci modální analýzy zjišťujeme a snažíme se zamezit rezonanci struktury, které jsou zodpovědné za poškození konstrukce. Dnes se přistupuje k modální zkoušce dvěma hlavními způsoby experimentálně a za pomoci různých softwarů jako ANSYS Mechanical, CATIA, NX Siemens atd., které počítají daný problém metodou konečných prvků (MKP). Výhodou softwaru je relativní jednoduchost simulace pro koncového uživatele, simulace jsou rychlejší a mohou dopomoci k okamžité nápravě vad už v průběhu návrhu, také není za potřeby cenově nákladných měřících nástrojů a personálu. Takhle získané znalosti nám můžou dopomoci k lepšímu výběru materiálu, při kompozitech k zjištění optimálního tvaru struktury a k ušetření váhy. Hlavní nevýhoda je však, že software počítá s ideálními materiály, zastavením konstrukce a podmínkami. Skutečné vlastnosti konstrukce, materiálu se mohou lišit a také může dojít k opomenutí malých, neočekávaných, ale zato významných detailů konstrukce. Chyby tohoto typu se dají poměrně spolehlivě odstranit kombinací obou metod – využití softwaru k návrhu a počátečním výpočtům a pak použití experimentální měření na kontrolu a doladění konstrukce. Výsledkem našeho experimentálního měření je pak modální model měřeného systému. Tento model popisuje dynamické chování součásti na základě módů, které jsou definovány třemi modálními parametry: vlastní frekvencí, vlastním tvarem a tlumením. Vlastní frekvence nám opisují jak těleso volně a tlumeně kmitá v důsledku buzení. Tlumení je resistance vnitřního uspořádání struktury vůči vnějším vlivům. [1] [2]



Obrázek 1 Model systému s 1 stupněm volnosti [1]

2.1. Módy

Módy oscilujícího systému jsou periodicky se opakující struktury pohybu, kde má celý systém tvar sinusoidy, stejnou frekvenci a fázi [3]



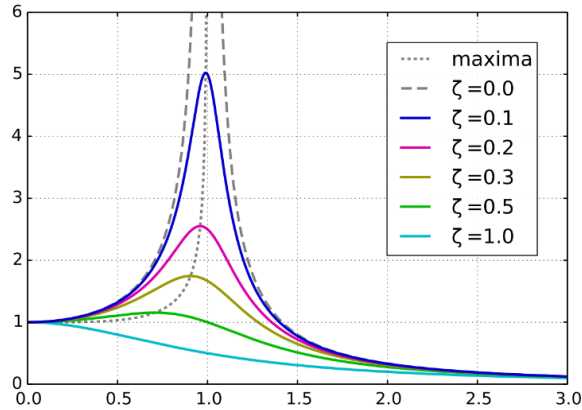
Obrázek 2 Módy [3]

2.2. Vlastní frekvence

Vlastní frekvence jsou frekvence, kterou osciluje systém bez přidání budící nebo tlumící síly. [1]

2.3. Rezonance a rezonanční frekvence

Rezonance je jev, při kterém má systém tendenci samovolně zvětšovat svoji amplitudu při aplikování stejné síly. Rezanční frekvence je pak frekvence, při které dochází k rezonanci, Tento jev je obzvláště nebezpečný v momentě, kdy se tahle frekvence nachází v intervalu provozních frekvencí. [1]



Graf 1 Graf rezonance osa X- frekvence buzení, osa Y- amplituda, ζ - relativní tlumení [6]

3. Měřicí přístroje a buzení

Abychom mohli pozorovat vliv kmitání na model, musíme nejprve kmity nějakým způsobem budít a měřit. V zásadě se budí, budičem a měří se akcelerometrem.

Co se akcelerometrů týče, používá se několik druhů:

- Snímání kapacity – Při zrychlení se mění vzdálenost mezi dvěma mikrostrukturami a tím pádem se mění i jejich kapacita.

Výhody:- levnější, dostupnější

- S využitím piezoelektrického jevu – Na měření používá změnu napětí piezoelektrického materiálu při deformaci. Používáme ho v našem měření.

Výhody: menší, přesnější [2]

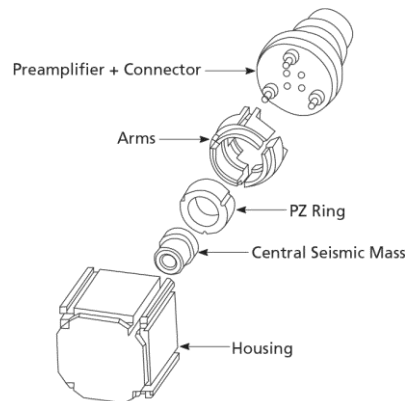
Měřit můžeme také polohoměrem:

- Laserová interference – poloha se měří laserem a následnými derivacemi získáme požadované hodnoty zrychlení.

Výhody: bezkontaktní, přesný [4]

3.1. Piezoelektrický akcelerometr

Piezoelektrický akcelerometr je měřič, který měří závislost změny napětí na deformaci piezoelektrického kroužku. Signál z něho je pak poslán do zesilovače a pak zpracovaný počítačem s vhodným softwarem. Náš konkrétní akcelerometr je vyrobený firmou Brüel & Kjær. Bližší popis akcelerometru se nachází na obrázku 3.



Obrázek 3 Piezoelektrický akcelerometr [3]

3.2. Snímače síly

Snímače síly mají vysokou rezonanční frekvenci, která jim umožňuje měřit vysoký nárůst síly za krátký čas. V praktických využitích bývá uložený mezi budičem síly a měřeným prvkem (např. na hrotě modálního kladívka).

Snímače síly mohou být např.:

- Tenzometrické- převádí mechanickou deformaci způsobenou zatížením na změnu elektrického odporu.
- Piezoelektrické- piezoelektrická hmotička generuje napětí v závislosti na střední deformaci [5]



Obrázek 4 Piezoelektrický snímač síly [3]

3.3. Budiče

Poznáme několik druhu budičů, které používáme dle potřeby na konkrétní případy.

Budit můžeme:

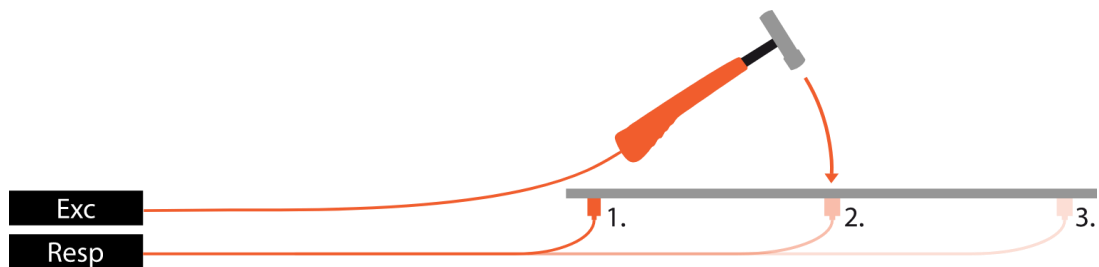
- Modálním kladívkem- Tato metoda je nejjednodušší, vyžaduje nejméně přípravy a je lehce přenosná. Používá se nejčastěji při testování malých homogenních konstrukcí
- Modálním budičem- Budiče mají schopnost budit různé vlnění, či už pravidelné, náhodný šum nebo jiné typy vlnění dle potřeby. Využívá se hlavně při aplikacích, kde je zapotřebí detailně zjistit chování buzené struktury. Používá se na buzení větších struktur, buzení je přesnější a máme možnost vyšší míry kontroly nad parametry buzení. Buzení je však náročnější na přípravu a je nákladnější jak cenově, tak časově.
- Kombinace více budičů- Využívá se na složité struktury, kde jeden budič nezvládá dostatečně vybudit všechny žádané módy, anebo na komplexní buzení, kupříkladu- buzení součástí na ohyb i krut. [2]

3.4. Modální kladívko

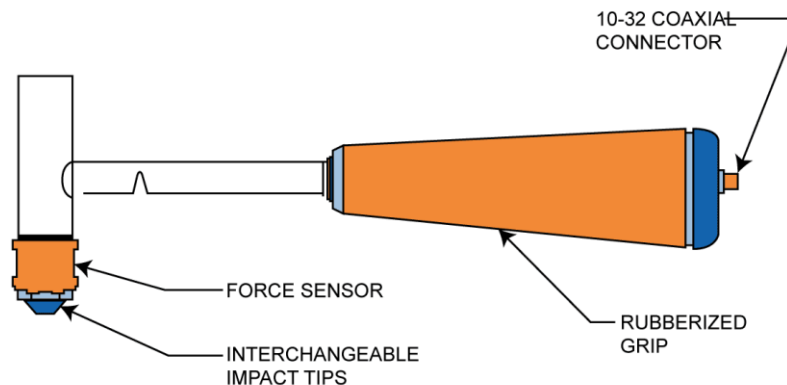
Modální kladívko se využívá na testy úderem. Jsou to rychlé testy prováděné před komplexnějším testem modálním budičem. Jak už bylo zmíněno v rychlém přehledu, testy jsou rychlejší, vyžadují si méně přípravy, vybavení, ale kvůli obyčejnému bouchání rukou jsou poměrně nepřesné a neumíme dostatečně ovlivňovat vybuzené kmity. [2] Poznáme 3 hlavní druhy kladívek:

Tabulka 1 Typy modálních kladívek a jejich využití [2]

Velikost	Využití	Rozsah [N]	Citlivost [mV/N]	Hmotnost [g]
Malé	Jemná elektronika, malé součásti...	<444	>11,2	<160
Střední	Části aut, blok motoru...	444-4,44k	11,2-1,1	160-450
Velké	Pumpy, velké kompresory, základy budov	>4,44	<1,1	>450



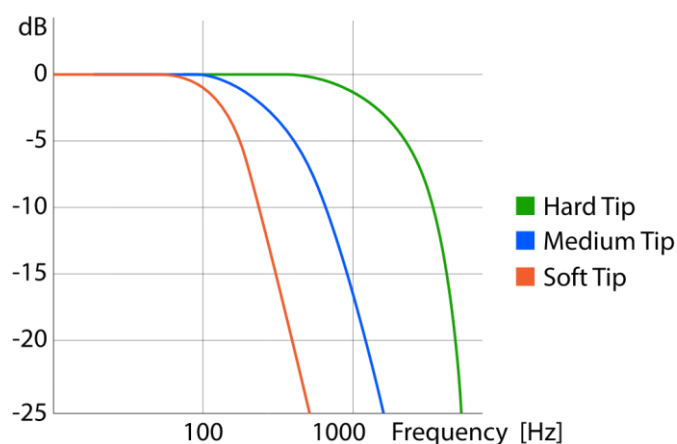
Obrázek 5 Použití modálního kladívka [2]



Obrázek 6 Součásti modálního kladívka [2]

3.4.1. Špička kladívka

Materiál špičky je důležitý parametr měření z důvodu jiných vlastností materiálů, tvrdší špičky zachytávají větší frekvenční rozsah, ale je náročnější se vyvarovat dvojitým úderům. Měkčí mají delší čas dopadávání a tím pádem lepší přenos energie na strukturu při nižších frekvencích a jejich frekvenční rozsah je menší. [2]



Graf 2 FRF v závislosti na tvrdosti špičky kladívka [1]

3.5. Modální budič

K mání je hned několik druhů budičů:

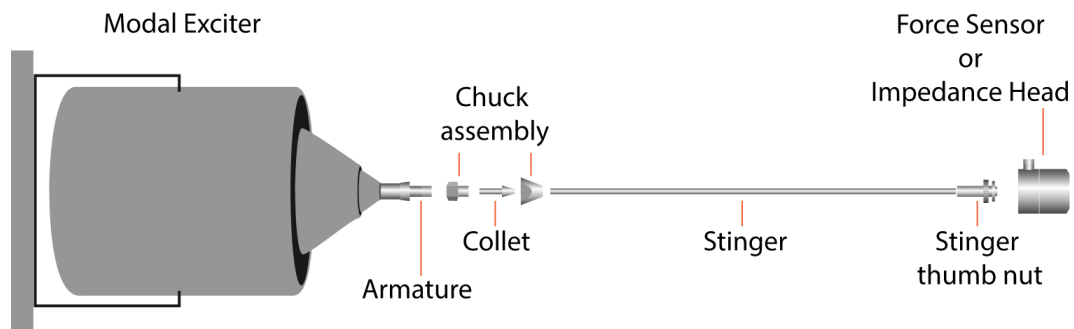
- Permanentní magnetický budič
- Modální budič
- Inerční budič

3.5.1. Permanentní magnetický budič

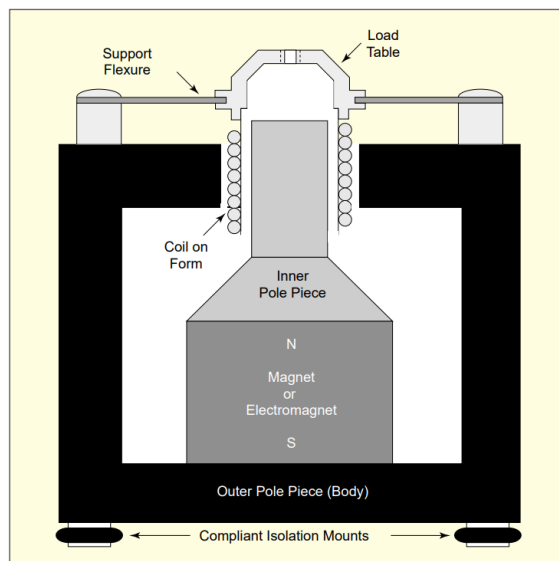
Zkoumaná struktura je připevněná přímo na budič, je v porovnání s ostatními budiči jednodušší a používá se např. na testy rázem, kalibrace senzorů, nebo na ukázky ve školách. [2] [6]

3.5.2. Modální budič

Jak už bylo zmíněno, modální budiče se používají na přesné vybuzení struktur. Jejich hlavní výhodou je, že máme velkou kontrolu nad typem buzení. Také upevnění měřené struktury může být provedeno pomocí spojovací tyčky (v grafice s názvem „stinger“). Význam téhle tyčky spočívá v lepším přenášení axiální síly a absorpci laterálních sil působících na senzor. Budič funguje na bázi cívky působící jako elektromagnet, která se přitahuje k dalšímu magnetu/elektromagnetu a tím přehýbá flexibilní membránu [2] [7] [6]



Obrázek 7 Struktura modálního budiče [2]



Obrázek 8 Stavba modálního budiče [6]

3.5.3. Inerciální budiče

Jsou používány na buzení nízkých frekvencí. Jsou přímo připojeny k měřenému tělesu a nucený pohyb závaží v budiči rozkmitává strukturu na požadovanou frekvenci. Použití tohoto budiče je stejné jako u modálního budiče, rozdíl je hlavně ve velikosti a požadované frekvenci měřených prvků [2]

4. Měření

4.1. Body buzení

Pro správné povedení modální analýzy je důležité vybrat také body buzení, které nejlépe rozvibrují celou strukturu a nebudou se nacházet v místě, kde buzené módy dosahují nulovou hodnotu deformace. [2]

4.2. Měřicí síť

Je to síť bodů, kde plánujeme umístit měřič nebo budič. Správné natavení polohy bodů má značný vliv na naše měření, je třeba volit nepříliš hustou síť tak aby naše měření trvalo co nejkratší dobu, avšak nepříliš řídkou abychom uměli zachytit všechny vybuzené módy. [1]

Při našich měřeních jsme neměli tolik měřičů (akcelerometrů), kolik jsme měli bodů, je to dané hlavně cenovou náročností měřicí aparatury. Proto musíme mezi jednotlivými měřeními přesouvat akcelerometry, nejlépe když jsou uloženy v sadách „ob jeden“, tak jak to je vidno na obrázku. [1]



Obrázek 9 Detail ocasních ploch s akcelerometry

Naše měření probíhá ve všech třech osách a akcelerometry, zase kvůli ceně, máme jenom jednoosé. Takže měření musíme 3x opakovat, pro každou osu raz. Výhodou jednoosého akcelerometru je také jeho váha, která je nižší jak váha trojosého akcelerometru.

Měření si také můžeme urychlit „metodou rozdílných řezů“. Ku příkladu na křídle letadla, uděláme 3 řezy. 1. řez budeme měřit ve směru X, druhý ve směru Z a třetí znovu ve směru X. Takto získáme potřebná data na následnou aproximaci zbylých chtěných dat.

Akcelerometr, jak je vidno na obrázku 10, měří ve směru šipky, takže se musíme důkladně ujistit správnou orientací všech měřičů při tom, jak je budeme 3x otáčet. V tomto případě je hezky vidno důvod optimální velikosti měřící sítě. S příliš hustou sítí se jednak prodlouží samotné měření, a když k tomu připočítáme dobu otáčení a přesouvání akcelerometrů, celková doba měření nám pak výrazně vzroste.



Obrázek 10 Detail upevnění akcelerometru

Samotná poloha a velikost akcelerometrů jsou také velmi důležité, musíme zvolit měřiče, které mají v porovnání s měřenou strukturou zanedbatelnou váhu, aby samotné akcelerometry neovlivňovali vlnění struktury. Jako dostačující považujeme, když váha akcelerometru nepřesáhne max. 10 %, ideálně 5 % váhy měřeného prvku. Také je chceme umístit na nosníky měřených ploch. Kdybychom tak neučinili (zvláště u letadel), prováděli bychom analýzu pláště letadla, který nemá na flutter téměř žádný účinek. [2]



Obrázek 11 Ocasní plochy s akcelerometry

4.3. Uložení budiče

Budič upevňujeme na strukturu podle toho, jaký typ měření chceme provádět. Od toho se bude odvíjet poloha budiče, velikost buzené síly a hlavně směr. Na obrázku 12 je zobrazeno buzení pro měření ocasních ploch ultralehkého letounu. Budič upevňujeme na nosníky nebo výztuž, nemá smysl budit plášť letounu a nástavec budiče je upevněný na strukturu za pomoci podtlaku, který je vytvořený vývěvou. [1] [5] [2]



Obrázek 12 Detail upevnění budiče

4.4. Typy budícího signálu

Teoreticky můžeme budit jakýmkoliv typem signálu, avšak při modální analýze jsou nejrelevantnější:

- Náhodný
- Náhodný burst
- Periodicky náhodný
- Sine Sweep

Při našem měření budeme používat hlavně náhodný burst a Swept Sine.

4.5. Náhodný burst

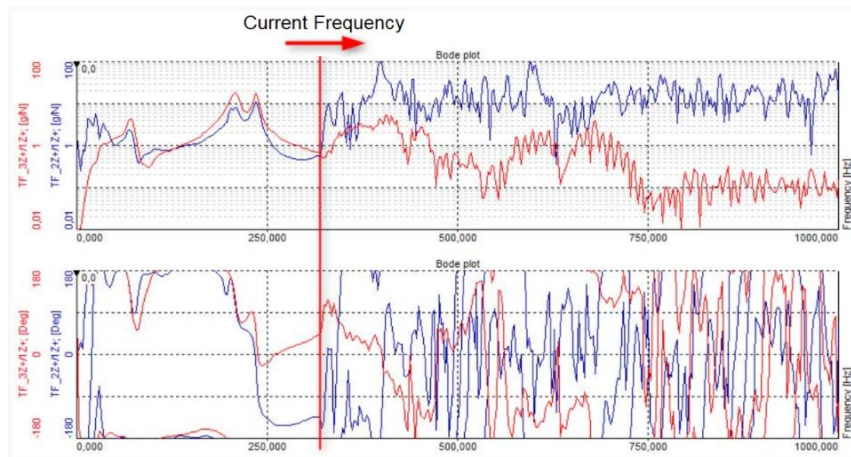
Náhodný burst – rychlá „dávka“ náhodného budícího signálu.



Graf 3 funkce náhodný burst [2]

4.6. Sine Sweep

Sine Sweep – je to sinová budící funkce, která je zaměřená na postupné přejetí celého měřeného úseku. Používáme jí na získání detailního popisu chování měřené struktury.



Graf 4 funkce Sine Sweep [2]

4.7. Soustavy

Měřicí soustava může mít několik typů dle počtu budičů a snímačů. Dělíme je na:

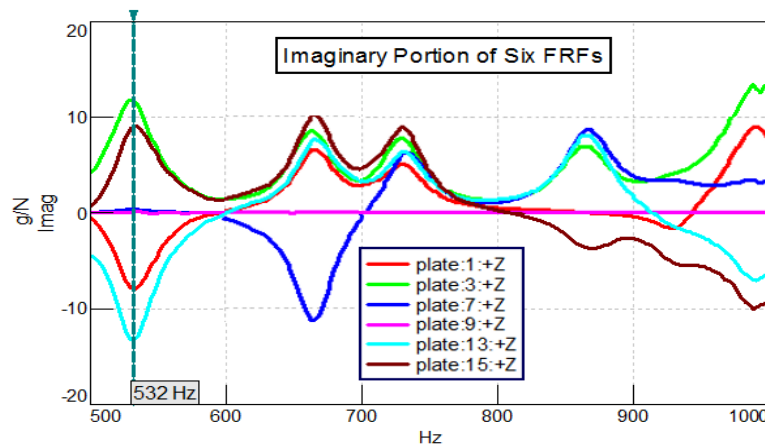
- SISO – single input, single output – jeden vstup, jeden výstup – toto měření se nepoužívá často
- SIMO – single input, multiple output – jeden vstup, víc výstupů – standardní měření
- MIMO – multiple input, multiple output – víc vstupů, víc výstupů – standardní měření ale se dvěma a více budiči [2]

4.8. Fyzická příprava soustavy

Upevnění budiče už bylo popsáno v předcházejícím odstavci, co se akcelerometrů týče, upevnit se můžou několika způsoby. Včelím voskem, který dobře přenáší vibrace a zároveň udržuje snímač upevněný. Nevýhodou je že se těžko stírá, lepí se, prostě řečeno, dělá nepořádek. Na permanentní upevnění používáme lepidlo. V praxi se však využívá obyčejná hrubá, oboustranná lepící páska. Snímače se mohou lepit přímo na soustavu, nebo se na konstrukci nalepí plastová destička s drážkami, do kterých se pak zasouvá snímač. Snímač má zvenku na konstrukci již předpřipravené drážky ve všech osách [2] [1]

4.9. Výsledná data před zpracováním

Výsledná neměřená data jsou zobrazena v grafu. Zde jsou zaznamenány údaje každého snímače, pro srozumitelnost jsou barevně rozlišeny. Naším cílem je pozorovat a analyzovat celek a data jednotlivých snímačů používat na odhalení anomálií v měření (např. snímač se odlepil), nebo se nám na tomto místě projevuje zvláštní chování a oblast musí být překontrolována. V zásadě měříme na frekvenčním intervalu 2x vyšším, než je analyzovaná frekvence. [1]

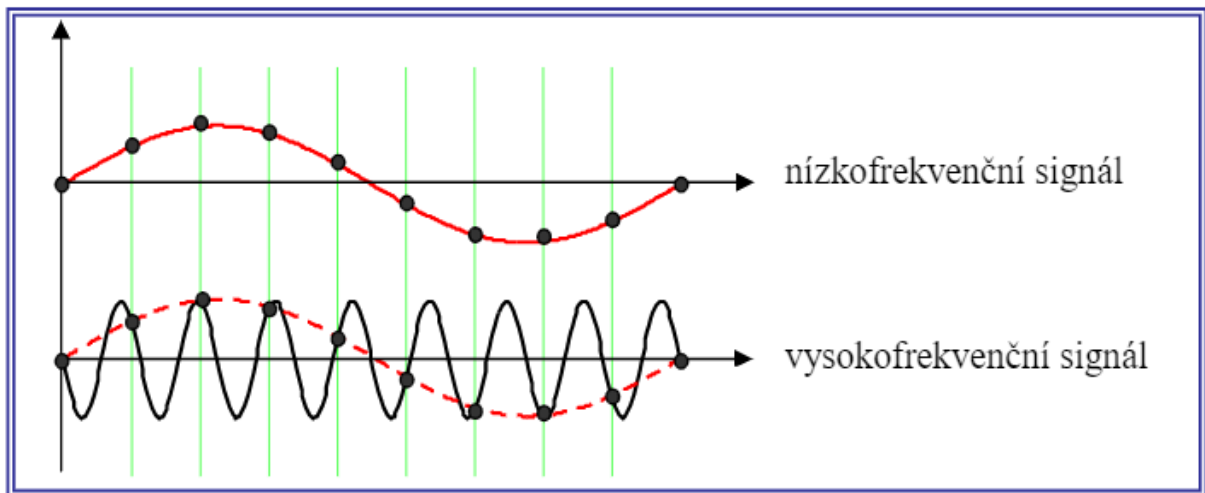


Graf 5 Příklad FRF funkce [7]

5. Zpracování dat

5.1. Chyba měření- aliasing

Aliasing je problém spojený s diskretizací spojitého signálu. V případě, že vzorkovací frekvence je ve vztahu k frekvenčnímu obsahu příliš nízká může dojít ke špatné interpretaci výsledků a vnesení nepřesností. Na obrázku 13 je tento problém znázorněn: nízkofrekvenční signál (nahore) je po diskretizaci nerozeznatelný od signálu s vyššími frekvencemi. [8]



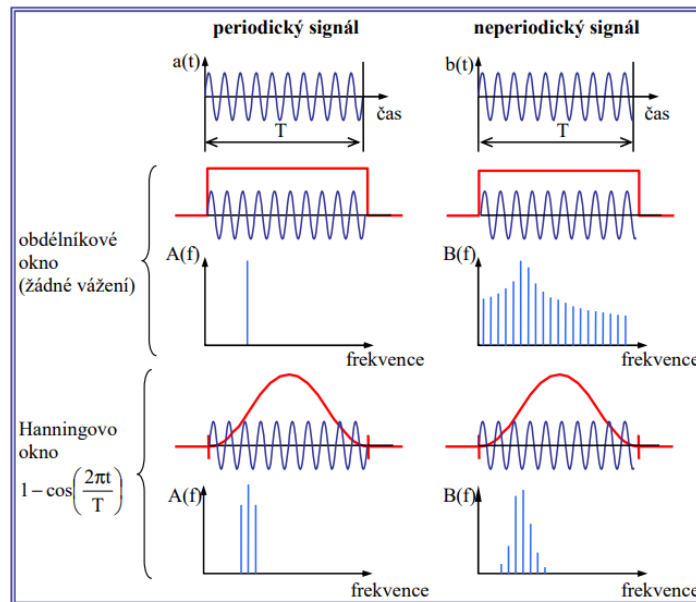
Obrázek 13 Diskretizace spojitého signálu s nízkou vzorkovací frekvencí [8]

5.2. Chyba měření- únik (leakage)

Chyba únikem vzniká při nespojitosti signálu na konci měřeného intervalu. Oproti analýze periodického signálu, kde je výsledné spektrum frekvence jenom jedna čára na frekvenci sinusoidy, je na Obrázku 14 na grafu neperiodického signálu nespojitost na konci vzorku. Tato nespojitost s intervalem doby měření T rozprostře spektrum frekvence po intervalu okolo vlastní frekvence. Takže výsledná energie „uniká“ do více spektrálních čar. Leakage můžeme zamezit buď prodloužením T , nebo níže zmíněným okénkováním. [8]

5.2.1. Okénkování

Okénkování sweepu- se provádí za cílem omezení chyby únikem, o které pojednává kapitola 5.2. Jde o součin původního signálu a profilu okna. Při modální zkoušce jsme použili dva typy okénkování. Pro funkci BURST bylo použito obdélníkové okno a pro SWEEP Hanningovo. Protože Hanningovo okno udává nejpřesnější výsledky na vrchole křivky (Obrázek 14) měřili jsme podezřelou oblast co nejbližší středu měřeného intervalu. [2] [8]



Obrázek 14 Vliv zvoleného okna na signál [8]

5.3. Průměrování

Při analýze náhodných vibračních signálů musíme zjistit několik parametrů pro správný odhad charakteristiky funkce signálu- odhad spektrálních hustot a korelačních funkcí. Proto provádíme průměrování několik časových záznamů. Počet požadovaných parametrů určují statistická spolehlivost a odstranění náhodného šumu. [8]

5.4. Rychlá Fourierova transf.– fast Fourier transform - FFT

Je to algoritmus, který podstatně zjednodušuje a urychluje diskrétní Fourierovu transformaci (DFT). DFT se využívá na převod signálu z funkce časové na funkci frekvence.

5.5. Frekvenční přenosová funkce- FRF- frequency response function

FRF je funkce, která opisuje, jak název naznačuje, odezvu systému na dané buzení. Využíváme ji na zjištění rezonančních frekvencí, tlumení a tvary módů měřených struktur. [9]

$$H(\omega) = \frac{výstup}{vstup}$$

Části FRF funkce, jako imaginární funkce, jsou amplituda a fáze, to znamená že obě můžeme přeměnit na reálné a imaginární části.

$$Amplituda = \sqrt{Imag^2 + Real^2}$$

$$Fáze = \tan^{-1}\left(\frac{Imag}{Real}\right)$$

Po transformaci se nám v grafu funkce ukáže několik zajímavých jevů:

- Reálný prvek FRF funkce se bude rovnat nule v místech vlastní, nebo rezonanční frekvence
- Imaginární část bude mít vrcholky grafu v kladném/záporném směru což indikuje rezonanční frekvence. Z jejich směrů můžeme zjistit tvar módu patřící rezonanční frekvenci [10]

5.6. Koherence

Koherence je míra lineární závislosti mezi FRF dvou měřených signálů. Pro lepší pochopení si můžeme koherenci představovat jako koeficient korelace vyjadřující stupeň lineární závislosti. Na grafu 5 pozorujeme, že hodnota grafu se blíží 1, což značí silnou korelaci mezi referenčním stupněm volnosti (DOF- Degree of Freedom) a vybraným DOF. [2]



Graf 6 Koherence [2]

5.7. MIF- mode indicator function- funkce na odhalení módů

Tyto funkce byly vytvořeny, jako pomůcka k zjištění kolik módů můžeme najít v našem setu naměřených dat. Hledání všech módů může být problematické, proto se módy můžou vyskytovat jenom v určitém směru.

- PMIF - power mode indicator function – sčítá všechny FRF funkce a ve výsledných datech jsou pak vidět všechny módy

$$\sum(|H|^2)$$

- NMIF – normal mode indicator function – využívá vlastnost FRF funkce, kdy její reálná část v bodě, kde se mód nachází, rychle přetíná 0 [11]

$$\frac{\sum(|\operatorname{Re}(H)| \cdot |H|)}{\sum(|H|^2)}$$

5.8. Další pomůcky

Při hledání módů můžeme použít několik indexů, které hlouběji popisují vlastnosti měřených funkcí.

MPD I MPC pomáhají určit, jestli je mód reálný (všechny jeho komponenty jsou ve fázi) nebo komplexní (komponenty mají rozdílnou fázi)

- MPD - Mean phase deviation – průměrná odchylka fáze jednotlivých FRF od střední fáze (střední fáze- průměrná fáze vektorů jistého modálního tvaru v komplexní rovině). Jednoduché módy mají hodnotu MPD 0, čím je hodnota vyšší tím je tvar módu komplexnější.

- MPC – Modal phase collinearity – index posuzující vztah mezi reálnou a imaginární částí funkce- nízká hodnota ukazuje vyšší komplexnost módů. Ideálně je MPC nad 80%.
- MOV – Mode overcomplexity value – dle teorie by se frekvence módu měla snížit po přidání závaží, díky tomu umíme zjistit, které módy jsou fyzické, a které jsou jen šum nebo vyplívají jen z výpočtů. Když je MOV blízko 100% módy jsou reálné, nižší hodnoty naznačuje šum nebo mód, který je ve výpočtech. [11] [12]

6. Příprava měření

6.1. Vybavení

Měření bylo provedeno na dílně Ústavu letadlové techniky na Karlově náměstí. K měření bylo použito toto vybavení:

Tabulka 2 Seznam použitého vybavení

Číslo	Název	Výrobce	Model ID/Typ
1	Metr	ECO	Komelon SM
2	Váha 6kg	Kern	PCB 6000
3	PC	Intel	3,7GHz/32GB RAM
4	UPS	MGE UPS Systém	Evolution 650
5	Zesilovač	Labworks Inc.	PA-141
6	Budič	Labworks Inc.	ET-126
7	Siloměr	Brüel & Kjær	8230-001
8	Akcelerometr	Brüel & Kjær	4517
9	DAQ rack	National Instrument	cDAQ-9188
10	Generátor signálu	National Instrument	NI9263
11	Měřicí karta	National Instrument	NI9234
12	SmartOffice Analyzer (software)	m+p international	v4.4
13	Microsoft Excel	Microsoft	2020

6.2. Cíl

Naším cílem bylo za první změřit modální parametry kompozitové destičky s předem vybranou strukturou a za druhé ověřit vliv způsobu upevnění mezi budičem a destičkou.

1. Kompozitová destička je složená z podélných vláken, které nejsou mezi sebou protkány Tento typ kompozitu byl vybrán z důvodu jeho jednoduchosti a faktu, že takto vybraná struktura nevnáší do měření nové aspekty, které by mohli ovlivnit měření, např. vliv protkaných vláken na ohýbání destičky.
2. Jako způsob upevnění bylo vybráno upevnění kleštinkou na konci destičky, jak je vidno na obrázku 15. Z podstaty této měřicí metody bylo pravděpodobné, že změni způsob, jakým se bude destička pod vlivem buzení chovat, avšak cílem bylo zjistit konkrétně, jak moc ovlivní toto upevnění měření. Hlavní motivací pro toto rozhodnutí byla jednak otázka, jestli se takto dají měřit trimy na konci ocasních ploch reálného letounu. Za druhé, k výuce nového konceptu. Protože

tato metoda svojí jednoduchostí napomáhá lepšímu představní a porozumění dané problematiky.



Obrázek 15 Deska V1 připravena na měření s upnutým budičem a akcelerometrem na bodě 101

6.3. Postup přípravy

Postup, jakým byla soustava sestavená, bude dále rozepsán v bodech.

- Nejprve jsme sestavili měřící stanici. Stanice je používána při měřeních, které provádí fakulta i pro komerční partnery, to umožňuje učit se na přístrojích používaných v praxi, co dává studentovi celkem dobrý obraz reálného měření. Ve zkratce je sestavená ze stolku, počítače a dvou zesilovačů.
- Pak bylo postaveno uložení destičky. Destička je upevněná v držáku a budič je postavený na stojanu. V případě dvou budičů je jeden zavěšený pružinou na rameni. Toto uložení bylo zvoleno kvůli velikosti budičů, které se vedle sebe pod měřenou geometrii nevešly. Příloha 1, Obrázek 22,23
- Když je měření prostorově rozloženo, začínáme zapojovat kabely, zapojovat měřící kartu, budiče a akcelerometr



Obrázek 16 Měřicí stanice

6.4. Zapojení akcelerometru

K měření byl použit jeden akcelerometr typu (Type 4517). Tento model byl vybrán zejména kvůli jeho fyzickým vlastnostem, je malý a jeho váha tvoří méně jako 5% váhy destičky. Větší akcelerometry, které jsme měli k dispozici, už dosahovali okolo 20% váhy destičky a svojí vahou by už nezanedbatelně ovlivňovali měření. Hmotnost destičky byla 23g a hmotnost akcelerometru 0,65g.

Pro upevnění akcelerometru na destičce byla zvolena prostá oboustranná lepenka. Toto řešení, byť neideální z důvodu vnášeného tlumení, bylo přeneseno z aplikace na reálném letounu. Metodu jsme použili z dvou důvodů. Lepenka přináší přijatelný kompromis čas měření/přesnost. Druhý důvod je už zmíněný čas měření. K dispozici nám byl jenom jeden snímač. To znamená, že na proměření jedné frekvence jsme museli měnit polohu akcelerometru 8-9krát a lepenka nám umožnila snadné přendávání akcelerometru z pozice na pozici. Také jsme nemohli využít malé přípravky z plastu nebo lehkých kovů, protože každé takové řešení přidávalo na destičku nezanedbatelnou zátěž, která by ovlivňoval měření mnohem víc než lepenka. Ideální řešení by bylo přilepení více akcelerometrů na destičku včelím voskem. Podstatnější je fakt, že každý přidaný snímač by násobně zmenšil dobu měření. Při použití 8 akcelerometru bychom pak dokázali zkrátit měření až osminásobně.

6.5. Software

Na zpracování dat byly použity programy Microsoft Excel a program M+P

M+P je program na zpracování dat z budičů, výpočet a vyhodnocení FRF funkcí.

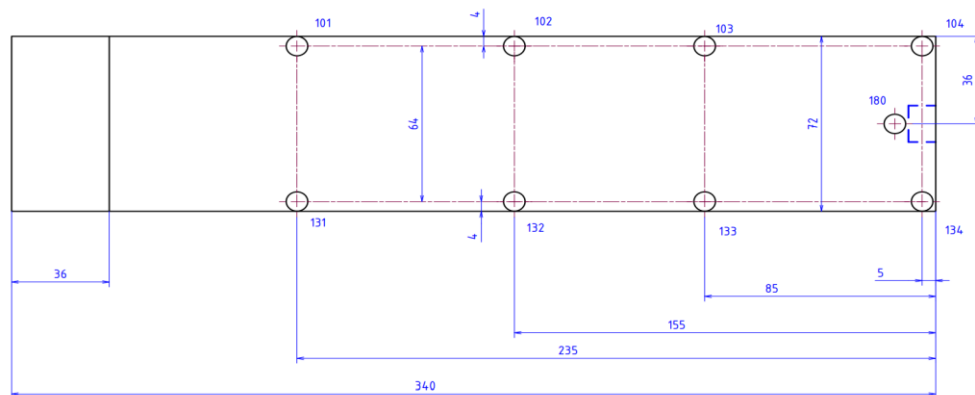
7. Měření

K získání potřebných dat bylo zvoleno několik způsobu měření:

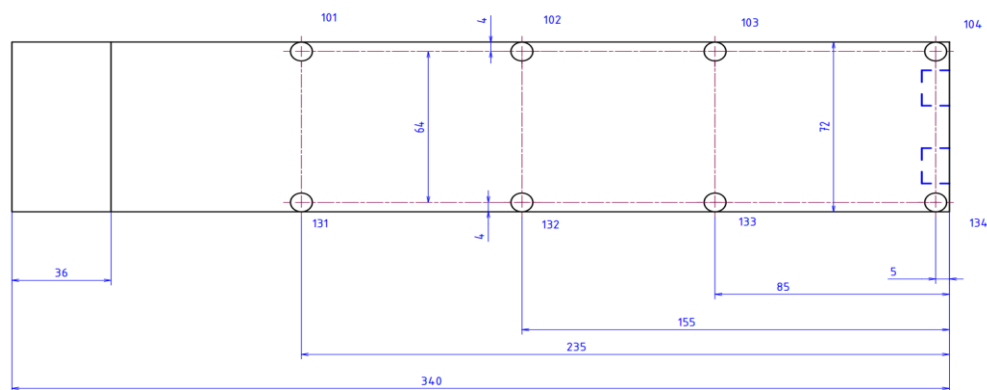
- Měření ohybu s jednou kleštinkou
- Měření ohybu se závažím
- Měření ohybu se změněným upnutím
- Měření ohybu se dvěma budiči
- Měření torze se dvěma kleštinami

7.1. Měřicí síť

Při měření byly použity dva druhy měřicí sítě, jedna pro všechna měření ohybu, druhá pro měření torze. 1. verze byla sestavena z 9 měřicích pozic. Bod 180 měří chování se destičky přímo při kleštině. 2. verze pro měření torze pak nemá bod 180. Měření bylo provedeno pouze v kolmém směru na plochu desky z důvodu nižší tuhosti desky ve směru tloušťky.



Obrázek 17 V1 ohyb



Obrázek 18 V2 torze

Hlavní rozdíl mezi verzí 1 a 2 je uložení budiče a přítomnost měřícího bodu 180. Ve verzi 2 jsou přítomny dva budiče kvůli lepšímu vybuzení torze a chybí bod 180, protože chování desky při budičích už měří body 104 a 134.

7.2. Postup měření

Každé provedené měření mělo v podstatě ten samý základ se speciálními deviacemi v každém měření. V této práci je nejprve popsán základní způsob měření na ohyb desky s jedním budičem a pak jsou v každé podkapitole popsány, jak se liší ostatní měření od základního postupu. Nejprve bylo provedeno měření metodou BURST na zjištění frekvencí podezřivých na rezonanci a pak byla všechna podezřelá místa překontrolována metodou SWEEP.

7.2.1. Měření ohybu s jednou kleštinkou

BURST:

- Po zapnutí měřící stanice je snímač zkalibrován. Příloha 1, obrázek 24
- Měření začíná přilepením nové vrstvy lepenky na každý měřený bod.
- Následně je nalepen akcelerometr na první měřený bod – 101.
- Je nastavena potřebná síla budiče.
- Jsou nastaveny všechny ostatní parametry, je vybrána správná geometrie.
- Kontrola, zda není snímač volný, jestli jsou nastaveny parametry správně.
- Spuštění měření.
- Konec měření bodu 101.
- Přelepení akcelerometru na bod 102.
- Opakování toho jistého postupu na bodech 102-4, 180, 131-4.
- Kontrola naměřených dat, vytipování si podezřelých míst a postup na metodu SWEEP.

SWEEP:

- Měření začíná přilepením nové vrstvy lepenky na každý měřený bod.
- Následně je nalepen akcelerometr na první měřený bod – 101.
- Je nastavena potřebná síla budiče.
- Jsou nastaveny všechny ostatní parametry, rozsah měření, je vybrána správná geometrie, délka akvizičního bloku.
- Kontrola, zda není snímač volný, jestli jsou nastaveny parametry správně.

- Spuštění měření.
- Konec měření bodu 101.
- Přelepení akcelerometru na bod 102.
- Opakování toho jistého postupu na bodech 102-4, 180, 131-4.
- Kontrola naměřených dat a následná změna rozsahu měření na prověření další podezřivé frekvence.

7.2.2. Měření ohybu se závažím

Měření probíhalo stejně jako u obyčejného ohybu s jedním rozdílem, na opačnou stranu desky pod snímač bylo nalepeno závaží s vahou snímače. Toto měření bylo provedeno na zjištění vlivu váhy akcelerometru. Byla použita geometrie V1.

7.2.3. Měření ohybu se změněným upnutím

Znovu, měření probíhalo stejně, avšak upnutí bylo jiné. Místo kleštinky byla použita impaktní vložka, která tlačila ze spodku do destičky. Upevněná k desce byla oboustrannou lepicí páskou, nejprve byl vyzkoušen včelí vosk, ale ten se při každém pokusu odlepil. Bylo vyzkoušeno různé množství tohoto vosku, ale ani jedno nefungovalo. Byla použita geometrie V1.



Obrázek 16 Detail upnutí budiče bez kleštinky



Obrázek 17 Detail upnutí budiče bez kleštinky

7.2.4. Měření ohybu se dvěma budiči

Podobně jako v bodě 7.2.3 je změněno uložení budiče. Tentokrát používáme dva budiče, které pracují ve fázi. Důvodem je prověření vlivu jednoho budiče. Byla použita měřící geometrie V2.

7.2.5. Měření torze se dvěma kleštinami

Při měření bylo naším cílem vybudit a změřit torzi. Princip měření byl stejný jako při měření ohybu se dvěma budiči s rozdílem, že budiče pracovali v protifázi. Byla použita geometrie V2.

7.3. Výstup

Výstupem z měření jsou FRF funkce, MPC, MPD parametry a graficky znázorněný průběh ohybu geometrie. Graf FRF funkcí je složený z dat naměřených pro každý snímač na daném frekvenčním rozmezí. Z této skupiny funkcí pak za pomoci programu aproximujeme všechny měřené funkce FRF a z těch pak rozhodujeme, zda se nachází v místě hledaný mód.

8. Vyhodnocení

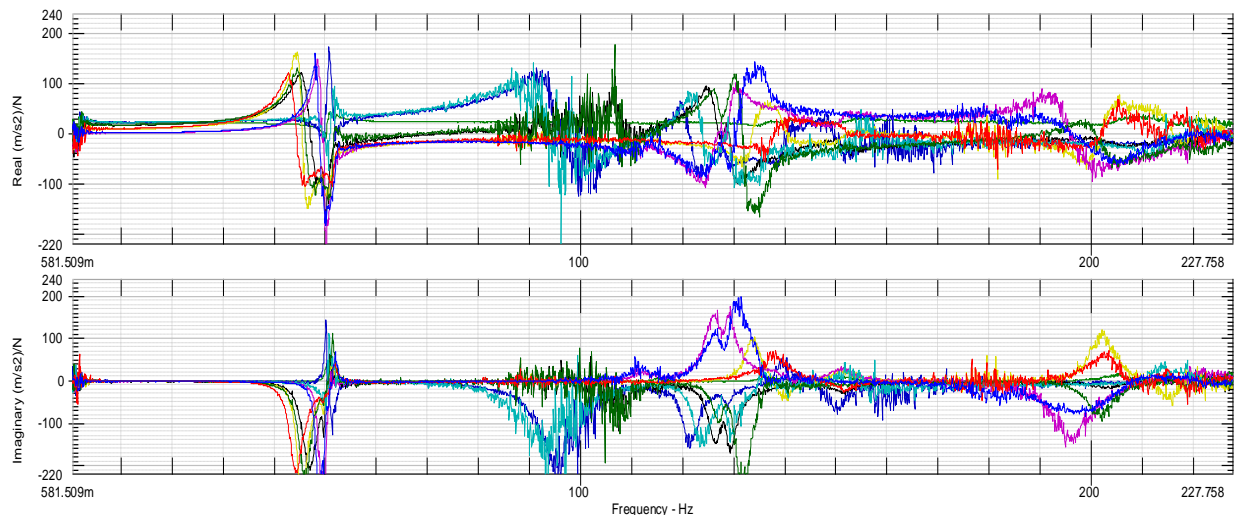
Naměřená data se nejdříve roztřídí a pak se vyhodnotí. Nejdříve se vyčlení frekvence, kde se ukázalo, že tam není žádný mód. Nejlepší ukazatele jsou přechody funkcí přes 0. Po prvotním vytřídění dat provádíme kontrolu, jestli se nenašli módy na té jisté frekvenci při ohybu a torzi. Důvodem je, že při buzení v ohybu se na některých frekvencích může vybudit torze a naopak. K správnému rozhodnutí, jestli je mód ohybový nebo torzní nám pomáhají tvary FRF, animace chování se destičky a modální parametry. Protože měřený prvek může mít jenom jeden první, druhý... mód v ohybu/torzi, provádíme finální výběr módu. Znovu použijeme tu jistou metodu rozhodování jako při určování, či jde o torzní nebo ohybový mód.

Proces pro vyhodnocení každého měření je téměř stejný, proto bude podrobně rozepsán v jedné kapitole a v dalších už budou uvedené jenom deviate.

Všechny grafy z měření, které se nenacházejí přímo v textu, je možno najít v Příloze 1.

8.1. Měření ohybu s jednou kleštinkou

Na začátku bylo provedeno měření typu BURST.



Graf 7 Měření typu BURST

Z tohoto měření bylo pak vytipováno pět hlavních frekvencí, kde by se potenciálně mohl nacházet mód, jejich okolí pak bylo proměřeno budícím signálem SWEEP. Abychom určitě našli všechny módy, zkontrolovali jsme při měření na prvním bodě i frekvence mimo vytipované intervaly. Jestli se ukázalo, že se na místě může nacházet mód, frekvenční rozsah byl změřen na všech bodech.

Rozsah měření byl nastavený podle měřené frekvence, cílem bylo, aby rozsah byl minimálně 2x měřená frekvence. Rozsah akvizičního bloku byl volen tak, aby se rezonance dostala na střed intervalu. Dalším důvodem je fakt, že při vyšších frekvencích je potřeba delší čas buzení pro správné vybudění rezonance.

Tabulka 3 Seznam měřených frekvencí pro ohyb s jednou kleštinkou, ACQ- acquisition time

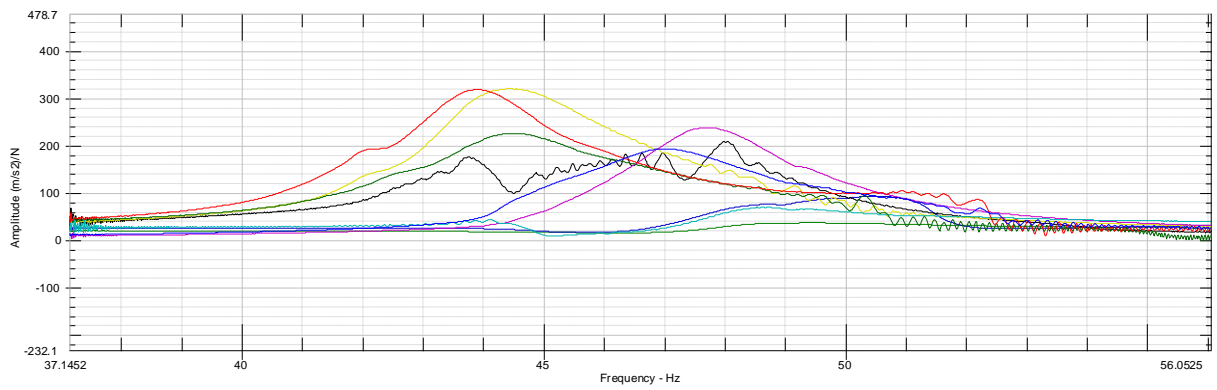
Ohyb s jednou kleštinkou				
Měření	Frekvence [Hz]	Rozsah [Hz]	ACQ [s]	Poznámka
No.1	1-20	100	64	nenachází se mód
No.1,5	18-37	100	64	nenachází se mód
No.2	37-57	200	128	podezřelé na mód
No.2,5	53-90	200	64	nenachází se mód
No.3	86-106	400	64	nenachází se mód
No.3,5	102-122	400	64	podezřelé na mód
No.4	118-138	400	64	podezřelé na mód
No.4,5a	135-165	400	64	nenachází se mód
No.4,5b	162-192	400	64	nenachází se mód
No.5	172-212	500	102,4	podezřelé na mód

V dalším kroku jsme vyfiltrovali měření 3,5 kvůli zlým modálním parametrům a faktu, že přes 0 procházeli FRF jenom při 2 bodech. Také za povšimnutí stojí měření No.5, které se podařilo naměřit i při torzi, avšak na základě parametrů a tvaru geometrie byl tento mód zařazen do ohybu.

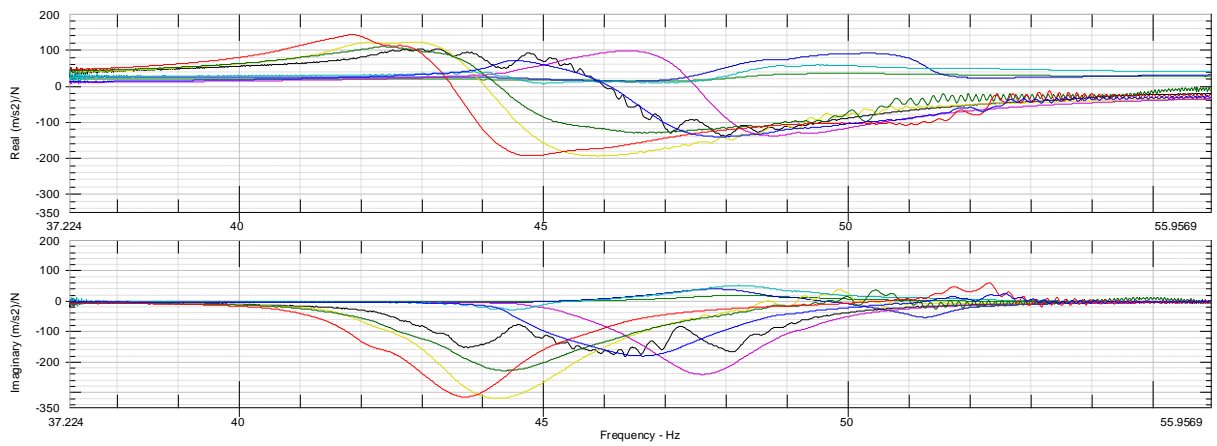
Na grafech je FRF měření No.2. Je hezky vidno přechod přes 0 a podobnost tvarů jednotlivých FRF pro dané body. Naneštěstí se přechody přes 0 nacházejí na celkem širokém intervalu. Díky tomu máme ve výsledku trochu horší aproximaci dat, se kterými počítá program a trochu horší modální parametry. Tento jev může být zapříčiněn větší budící silou. I s těmito nedostatky je ale kvalita měření dostačující. Grafy a ukázka buzené geometrie pro ostatní měření se nachází v Příloze 2. Módy se nám podařilo najít v měření No.2,4 a 5, více o výsledcích v kapitole 9.

Tabulka 4 Naměřené módy při měření ohybu s jednou kleštinkou

Ohyb s jednou kleštinkou								
	Frekvence [Hz]	Tlumeni [%]	Tvar kmitání	Workspace	MPD [deg]	MPC [%]	MOV [%]	MIF [%]
1	43,68	2,01	1.0	No.2	23,64	63,82	97,83	71,61
2	129,001	1,025	2.0	No.4	19,59	94,75	94,93	87,89
3	200,9	1,7	3.0	No.5	37,48	53,25	92,85	74,31

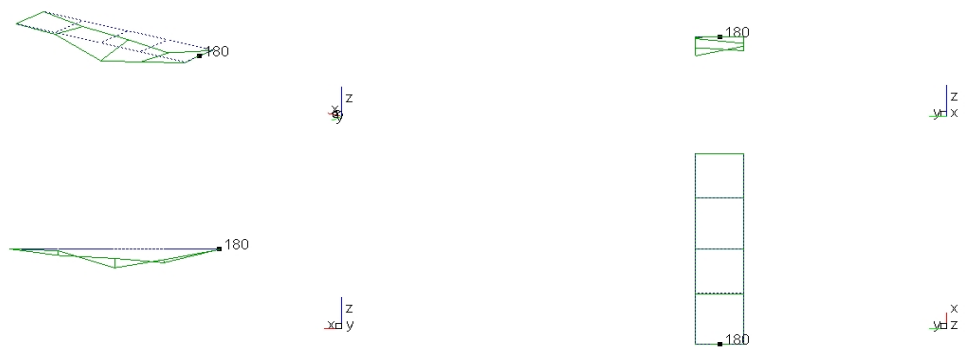


Graf 8 No.2 graf FRF



Graf 9 No.2 graf FRF

Deska
1.0



Obrázek 19 No.2 tvar FRF

8.2. Měření ohybu se závažím, změněným upnutím a dvěma budiči

Postup vyhodnocení byl identický jako v předcházejícím bodě. Módy byly nalezeny na frekvencích v tabulce. Tyto módy měli ve svých kategoriích nejlepší parametry).

Tabulka 5 Naměřené módy při měření ohybu se závažím, změněným upnutím a dvěma budiči

Měření ohybu se závažím, změněným upnutím a dvěma budiči									
Číslo	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Tvar kmitání	Poznámka	Workspace	MPD [deg]	MPC [%]	MOV [%]	MIF [%]
1	39,47	3,181	1.O	Měření ohybu se změněným upnutím	No.2	18,74	61,5	100	80,97
2	41,498	2,612	1.O	Měření ohybu se závažím	No.2	15,49	70,61	100	78,53
3	50,753	1,412	1.O	Měření ohybu se dvěma budiči	No.2	15,52	76,43	99,93	77,79

8.3. Měření torze se dvěma kleštinkami

Vyhodnocení torzního měření probíhalo stejně jako při měření ohybovém. Módy, které se nám podařilo vybudit, byly na frekvencích zobrazených v tabulce 5. Třetí torzní mód se nám podařilo vybudit na celkem vysokých frekvencích, které hraničili s horním okrajem intervalu našeho měření, proto je tento mód ne úplně ideálně vybuděn či už hlediska tvaru FRF nebo modálních parametrů. Grafy měření a módů jsou zobrazeny v Příloze

Tabulka 6 Naměřené módy při měření torze se dvěma kleštinkami

Měření torze se dvěma kleštinkami								
Číslo	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Tvar kmitání	Workspace	MPD [deg]	MPC [%]	MOV [%]	MIF [%]
1	36,365	4,843	1.T	No.2	4,43	98,78	100	94,28
2	59,203	1,698	2.T	No.3	11,86	94,21	100	87,3
3	215,99	0,353	3.T	No.7	13,53	83,39	100	81,88
4	233,032	1,278	4.T	No.8	22,65	90,59	1,82	85,82

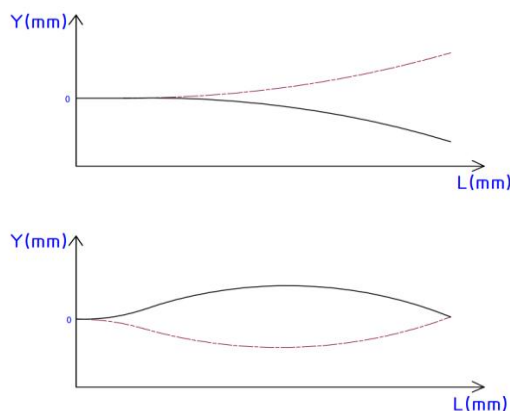
9. Výsledky měření

Tabulka 7 Seznam módů, kl.=kleštinka, hm. = hmotička

Vyhodnocení

	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Tvar kmitání	Poznámka	Exportovaná FRF	Workspace	MPD [deg]	MPC [%]	MOV [%]	MIF [%]
1	36,365	4,843	1.T	Torze-2 budiče+ 2 kl.	1.T	No.2	4,43	98,78	100	94,28
2	39,47	3,181	1.O	Ohyb- 1 budič- bez kl.	1.O_bez_klestinky	No.2	18,74	61,5	100	80,97
3	41,498	2,612	1.O	Ohyb- 1 budič+ kl.+ hm.	1.O_s_pridanou_hmotou	No.2	15,49	70,61	100	78,53
4	43,68	2,01	1.O	Ohyb- 1 budič+ kl.	1.O	No.2	23,64	63,82	97,83	71,61
5	50,753	1,412	1.O	Ohyb- 2 budiče+ 2 kl.	1.O_2budice	No.2	15,52	76,43	99,93	77,79
6	59,203	1,698	2.T	Torze-2 budiče+ 2 kl.	2.T	No.3	11,86	94,21	100	87,3
7	129,001	1,025	2.O	Ohyb- 1 budič+ kl.	2.O	No.4	19,59	94,75	94,93	87,89
8	200,9	1,7	3.O	Ohyb- 1 budič+ kl.	3.O	No.5	37,48	53,25	92,85	74,31
9	215,99	0,353	3.T	Torze-2 budiče+ 2 kl.	3.T	No.7	13,53	83,39	100	81,88
10	233,032	1,278	4.T	Torze-2 budiče+ 2 kl.	4.T	No.8	22,65	90,59	1,82	85,82

Při měření ohybu se nám podařilo vybudit 3 ohybové módy a 4 torzní módy. Při měření ohybu byly vrcholy FRF funkcí roztaženy na větším intervalu. Tento jev může být spojeny s příliš velkým budícím napětím a tím pádem i větší budící silou. Největší problém byl také ve volbě budiče a upevnění na měřenou geometrii. Kleštinka měla nezanedbatelnou váhu a samotný budič byl příliš robustní. Tyto fakty měly za následek příliš velkou tuhost budící soustavy vzhledem ke měřené struktuře a změnu celého uložení z uložení s volným koncem na uložení s podpěrou. To pak způsobilo, že budič budil v místě podpory, následkem byla nižší přesnost měření a horší kvalitativní parametry – vyhodnocení je tím pádem náročnější. Navzdory těmto faktům se však měření s touto variantou uložení podařilo úspěšně vyhodnotit s dostatečnou přesností. Na obrázku 20 můžeme vidět geometrii při obou uloženích v krajních polohách kmitání.



Obrázek 20 Výchylky při kmitání, kmitání s volným koncem (nahore), kmitání s podpěrou (dole)

Při měření torze byla na začátku pro zkoušku použita jedna kleštinka a jeden budič, ale jako lepší možnost se jevílo použití dvou budičů v protifázy. Tento odhad se ukázal pravdivý a podařilo se nám hezky naměřit všechny FRF funkce s dobrými parametry.

Měřen byl také vliv kleštinky při ohybu. Rozdíly mezi měřeními s kleštinkou, impaktní vložkou a dvěma kleštinkami se ukázali jako nezanedbatelné. Pro impaktní vložku byl první ohybový mód naměřen (oproti měření s kleštinkou) na frekvenci o cca 10% nižší a pro 2 kleštinky na frekvenci o cca 16% vyšší. Tyto výsledky nás přivádí k závěrům, že pro takto malou destičku vnáší použití kleštinky k propojení destičky s budičem příliš velké změny. Pro praktické měření na letounu je proto nutné zvolit jiné uložení. Můžeme tedy zhodnotit, že samotné upnutí budiče na geometrii svou robustností a tuhostí není vhodné pro vybranou měřenou strukturu. Zejména kvůli tuhosti měřeného prvku by bylo nejlepší při buzení použít modální kladívko.

Co se týče měření s přidanou hmotičkou, frekvence 1. módu je o 5% nižší oproti měření bez hmotičky. To znamená, že víc jak jeden akcelerometr by už vytvořili znatelný rozdíl ve výsledcích. Z tohoto důvodů by bylo lepší použít laserové polohoměry.

Tabulka 8 Porovnání měření ohybu

Rozdíl mezi speciálními měřeními ohybu a základním měřením ohybu					
	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Tvar kmitání	Poznámka	Δ [%]
-	43,68	2,01	1.0	Základní měření ohybu	0,00
1	39,47	3,181	1.0	Měření ohybu se změněným upnutím	9,64
2	41,498	2,612	1.0	Měření ohybu se závažím	5,00
3	50,753	1,412	1.0	Měření ohybu se dvěma budiči	16,19

10. Závěr

Závěrem můžeme konstatovat, že měření bylo zdařilé. Navzdory několika nedostatkům způsobeným nevhodně zvolenou měřicí soustavou a vybavením se nám podařilo získat potřebná data pro úspěšné vyhodnocení.

Pro zlepšení výsledků bych v mém měření změnil způsob buzení měřené geometrie. Měřením jsme zjistili, že budič není optimální nástroj na buzení, a proto se jeví použití modálního kladívka jako lepší možnost. Největší komplikací při měření tvořil počet akcelerometrů. Na geometrii můžeme umístit nejvíce jeden akcelerometr, abychom zachovali požadovanou přesnost. Vyšší počet akcelerometrů by zvýšil přidanou váhu na měřené těleso a tím by vnesl do měření nepřesnost, zároveň by však značně urychlil měření. Z toho důvodu by nejlepší volbou byly laserové polohoměry, které měří bezkontaktně, takže nejsme limitováni hmotností a teda i počtem polohoměrů. Tímto způsobem bychom s osmi polohoměry mohli zkrátit měření až osmkrát. Toto zrychlené měření by pak dovolovalo personálu věnovat se dalším kontrolám, jako různým kontrolním měřením, kontrolám opakovatelnosti – měření na dvou měřených prvcích vyrobených při stejných specifikacích atd.

Jako pokračování této práce se naskýtá jednak překontrolování vlivu lepicí pásky na měření, změřením kompozitových destiček s jinou vnitřní stavbou kompozitu, ale hlavně provedení měření s modálním kladívkem namísto budiče.

Bibliografie

- [1] A. Bilošová, TÝMOVÁ CVIČENÍ PŘEDMETU EXPERIMENTÁLNÍ MOPDÁLNÍ ANALÝZA, Ostrava, 2011.
- [2] S. L. Gjelstrup, „dewesoft.com,“ 24 7 2015. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/daq/what-is-modal-analysis>. [Cit. 7 12 2021].
- [3] C. K. N. N. K. N. Chooi Ling Si Toh, „<https://www.researchgate.net/>,“ 10 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/254052272_Melody_to_musical_notation_translating_system. [Cit. 10 2 2022].
- [4] M. Z. Marco Pisani, „An accelerometer for spaceborne application with interferometric readout,“ *ScienceDirect*, pp. 507-512, 2018.
- [5] Brüel & Kjær, „www.bksv.com,“ [Online]. Available: <https://www.bksv.com/en/transducers/vibration/accelerometers>. [Cit. 10 2 2022].
- [6] D. S. George Fox Lang, „Understanding the Physics of Electrodynamics Shaker Performance,“ *SOUND & VIBRATION*, 2001.
- [7] W. S. Y. L. Q. H. Hui Li, „The calibration of sinusoidal excitation force of piezoelectric ceramic exciter,“ *Journal of Vibroengineering*, 2014.
- [8] A. Bilošová, Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky, Ostrava, 2012.
- [9] E. O. Brigham, The Fast Fourier Transform, New York: Prentice-Hall, 2002.
- [10] P. S. Nicolas Divincenzo, „community.sw.siemens.com,“ 10 7 2020. [Online]. Available: <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-frequency-response-function-frf>. [Cit. 10 2 2022].
- [11] D. I. E. Mucchi, „Introduction to Modal Analysis,“ [Online]. Available: http://www.unife.it/ing/lm.meccanica/insegnamenti/simulazioni-e-test-vibrazionali-per-lo-sviluppo-prodotto/materiale-didattico/C_EMA_toale.pdf. [Cit. 20 2 2022].
- [12] m+p international Mess- und Rechnertechnik GmbH, m+p SO Analyzer User Manual revision 4.4, Hannover, 2015.
- [13] K. Ogata, System Dynamics (4th ed.), Harlow, Pearson, 2005.

Příloha 1 – Měření:



Obrázek 21 Měřicí soustava s konfigurací V1 při měření



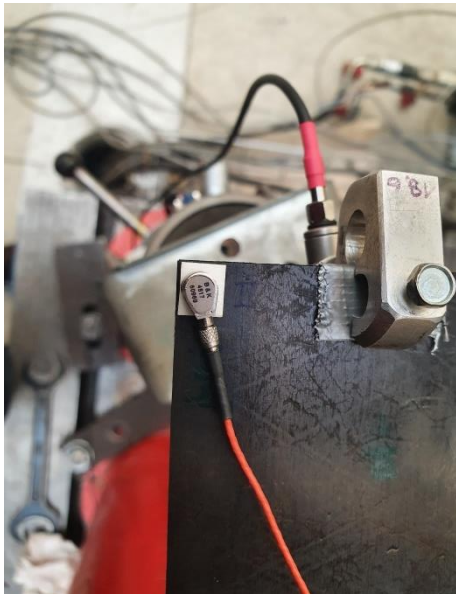
Obrázek 22 Měřicí soustava s deskou v konfiguraci V2 před měřením torze



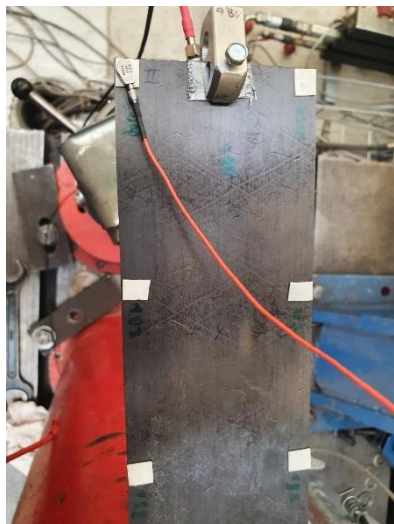
Obrázek 23 Detail uložení dvou budičů



Obrázek 24 Kalibrace snímače



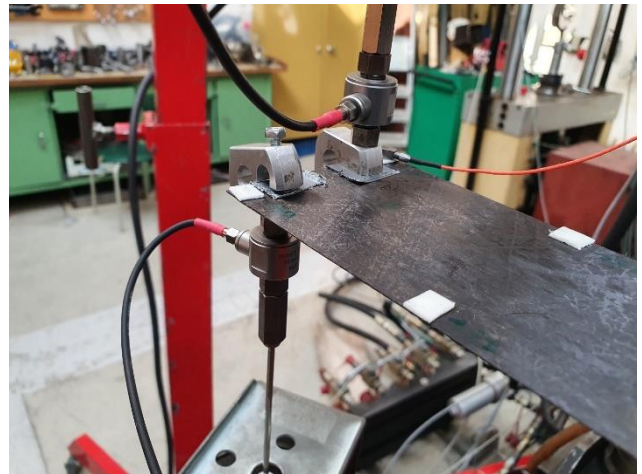
Obrázek 27 Detail uložení snímače na bodě 104



Obrázek 26 Detail měřicí konfigurace V1



Obrázek 25 Porovnání velikosti akcelerometru 4517 proti kávové lžičce



Obrázek 30 Detail dvou kleštin při měření konfiguraci V2



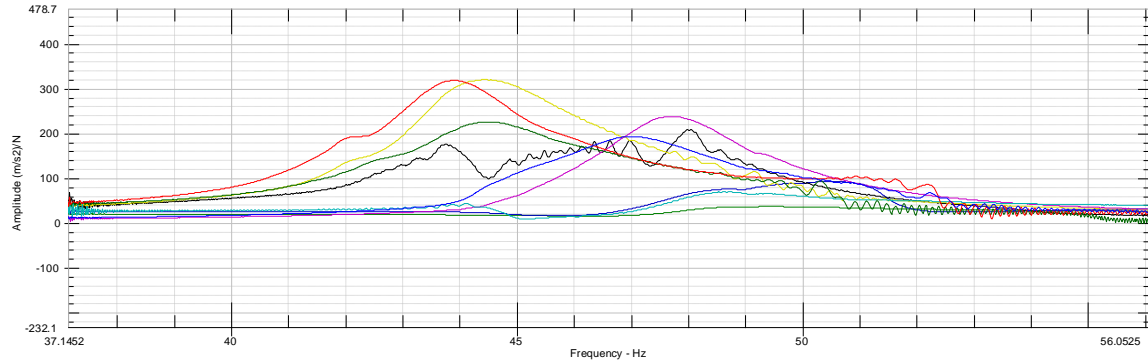
Obrázek 29 Přídavné závaží



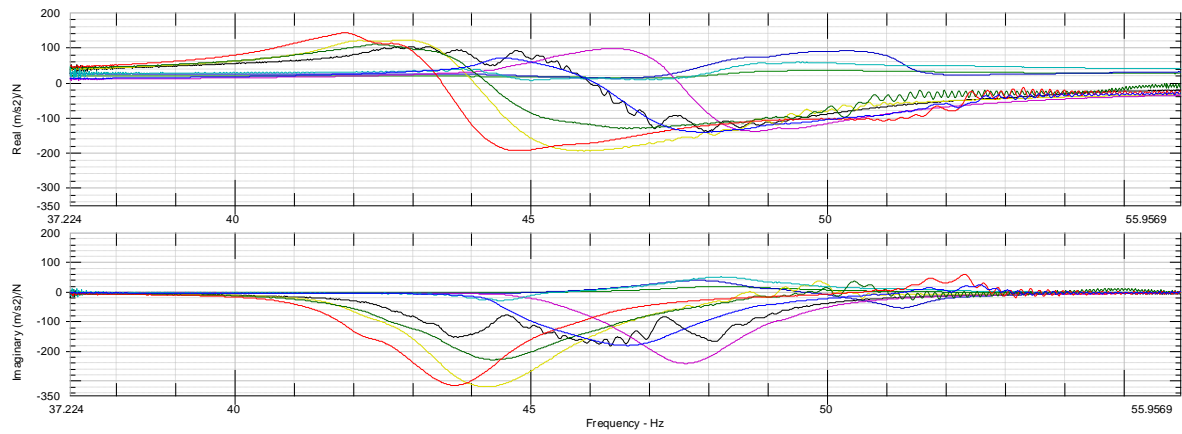
Obrázek 28 Akcelerometr 4517

Příloha 2- Módy:

1. Ohybový mód- základní upnutí:

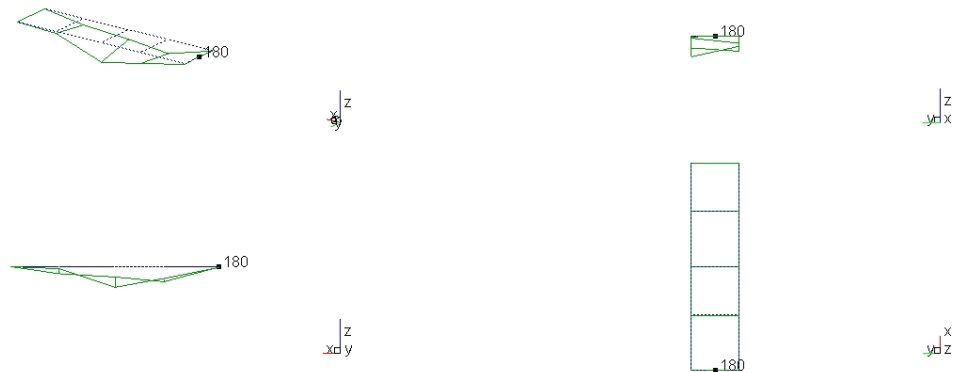


Graf 10 Graf 1. ohybového módu při měření základního ohybu



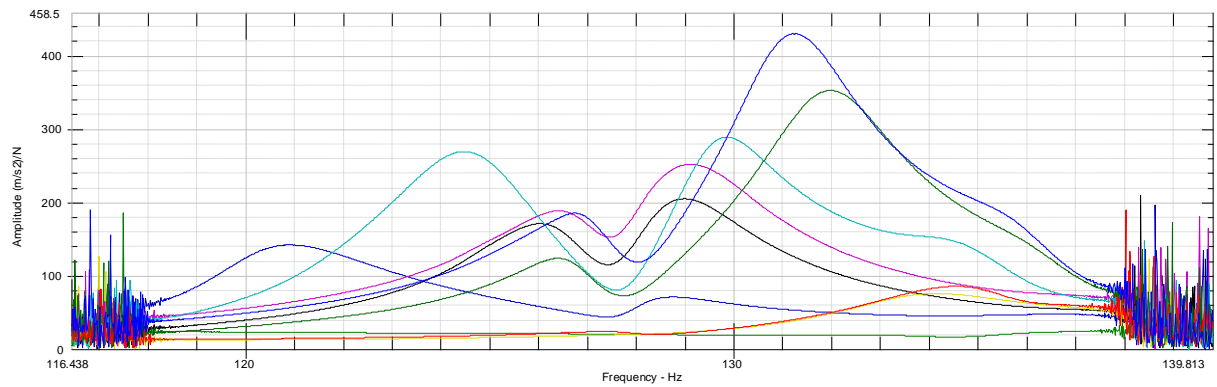
Graf 11 Graf 1. ohybového módu při měření základního ohybu

Deska
1.0

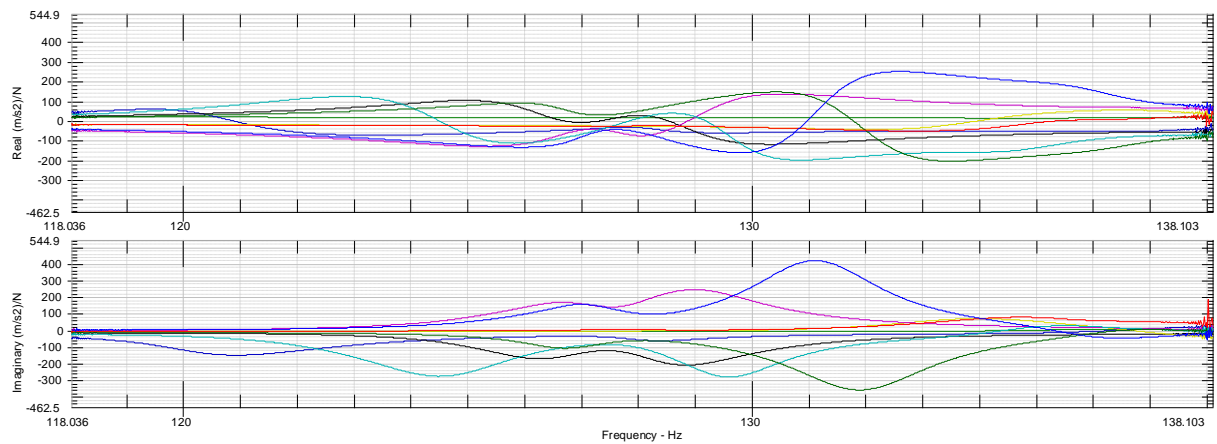


Obrázek 31 Tvar 1. ohybového módu při měření základního ohybu

2. Ohybový mód - základní upnutí:

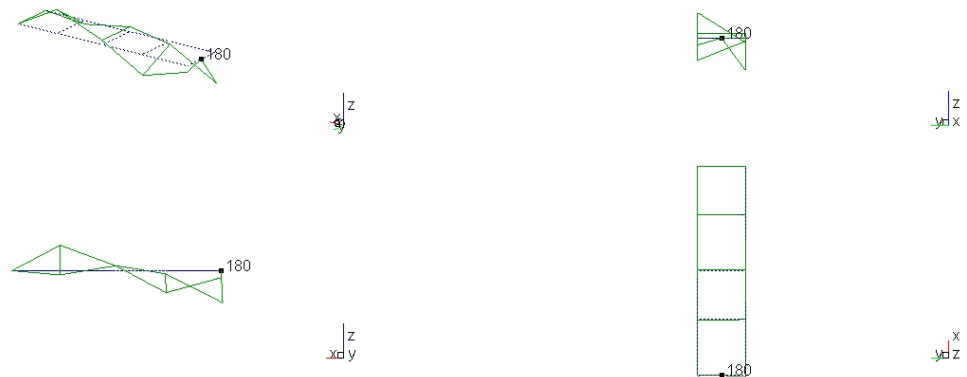


Graf 12 Graf 2. ohybového módu při měření základního ohybu



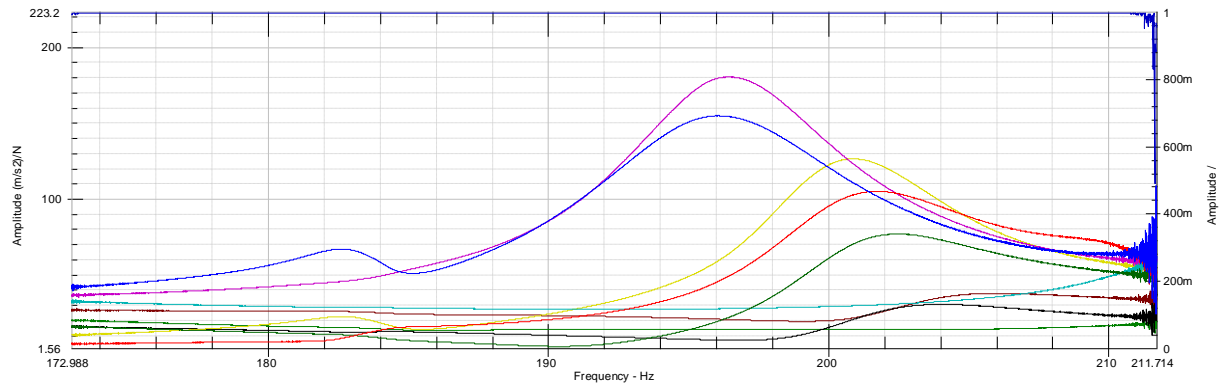
Graf 13 Graf 2. ohybového módu při měření základního ohybu

Deska
2.0

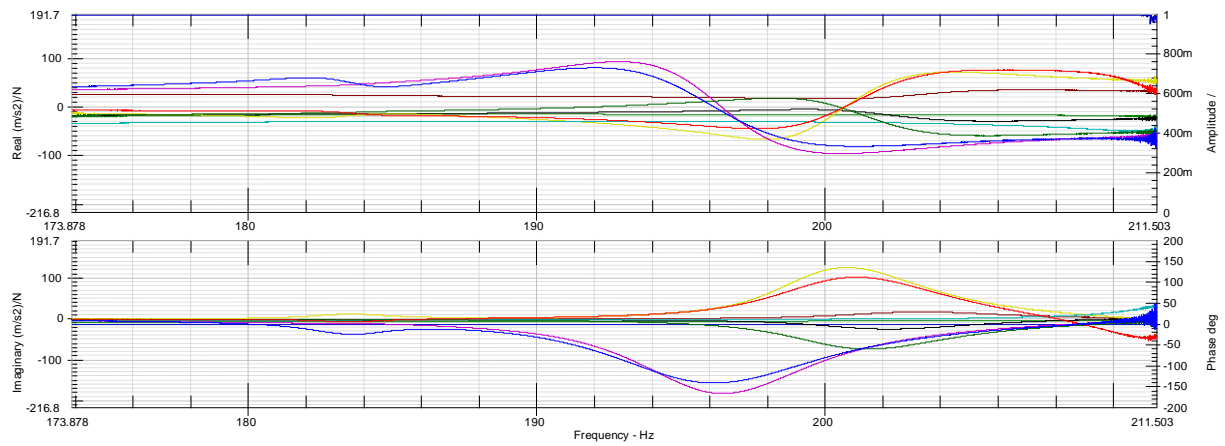


Obrázek 32 Tvar 2. ohybového módu při měření základního ohybu

3. Ohybový mód - základní upnutí:

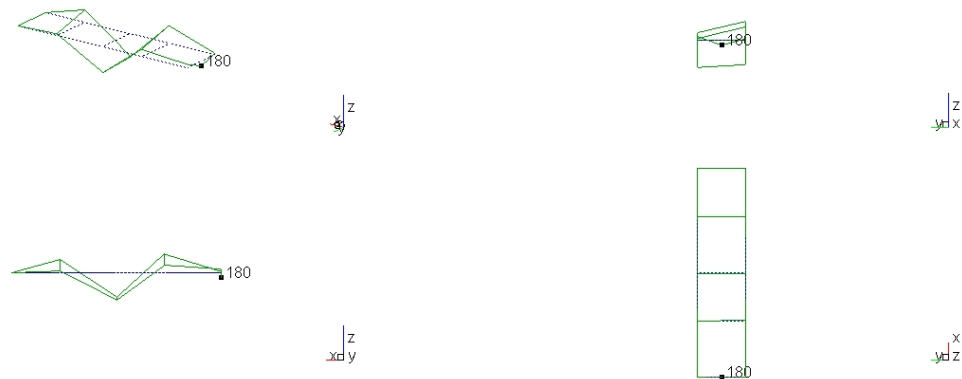


Graf 14 Graf 3. ohybového módu při měření základního ohybu



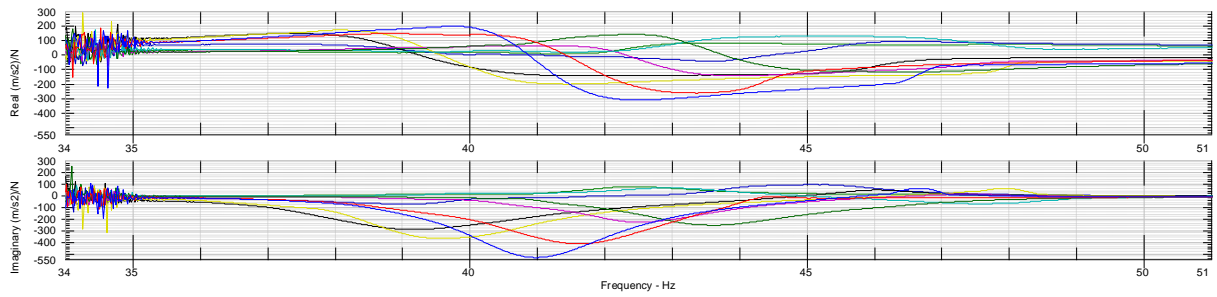
Graf 15 Graf 3. ohybového módu při měření základního ohybu

Deska
3,0

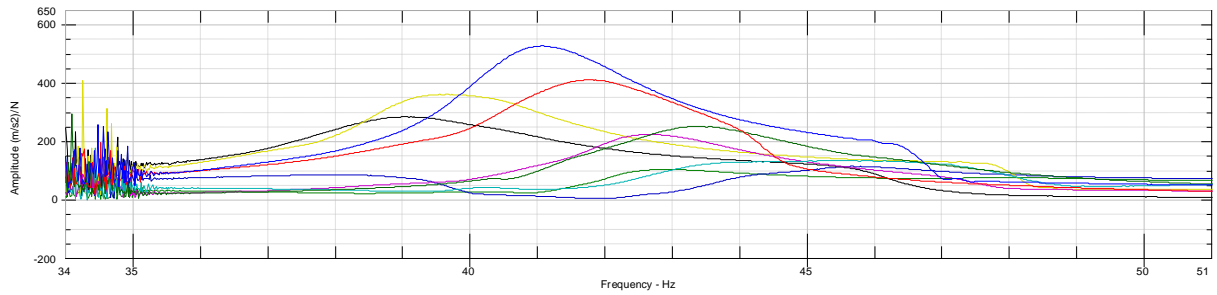


Obrázek 33 Tvar 3. ohybového módu při měření základního ohybu

1. Ohybový mód budič- bez kleštinky:

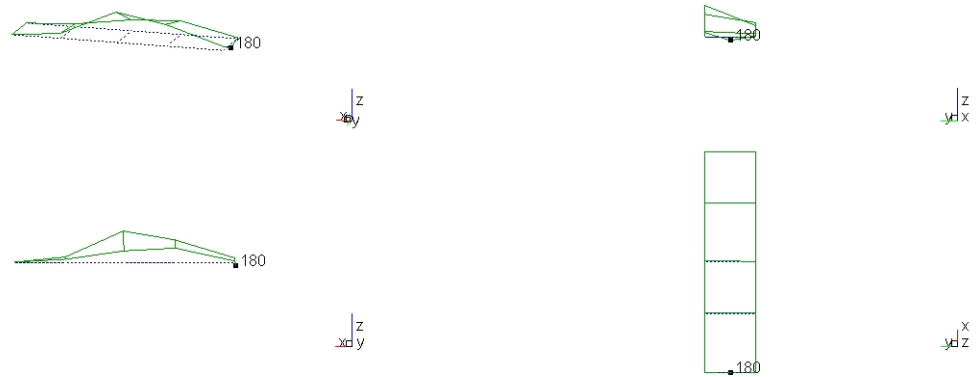


Graf 16 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se změněným upnutím



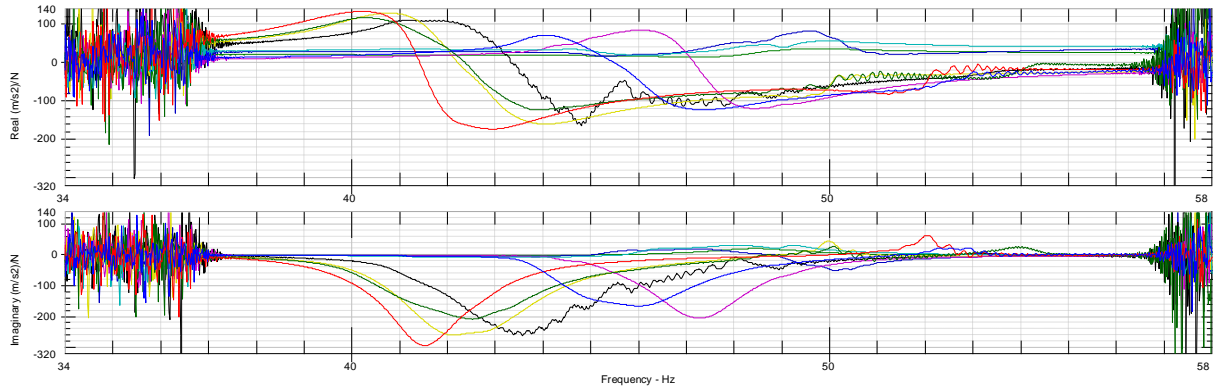
Graf 17 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se změněným upnutím

Deska
1.0_bez_kleštinky

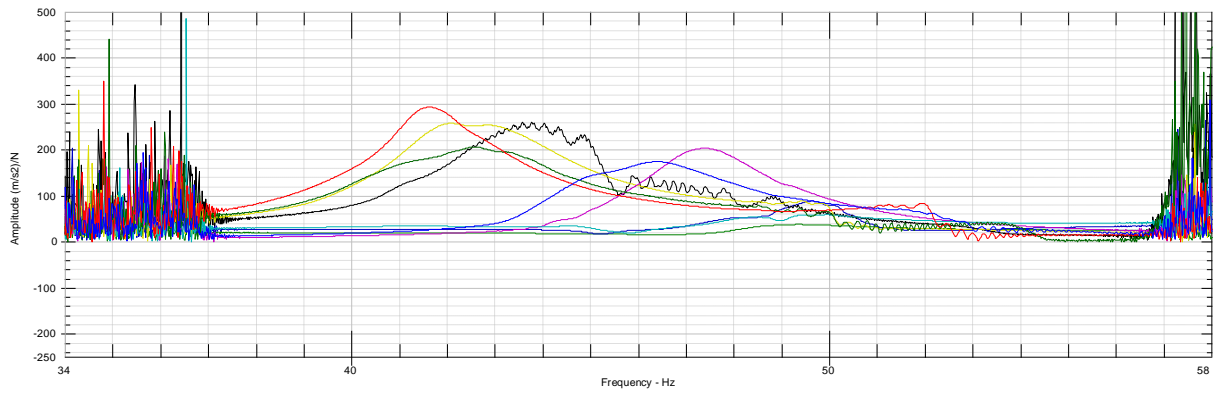


Obrázek 34 Tvar 1. ohybového módu při měření ohybu se změněným upnutím

1. Ohybový mód- s přidání závaží:

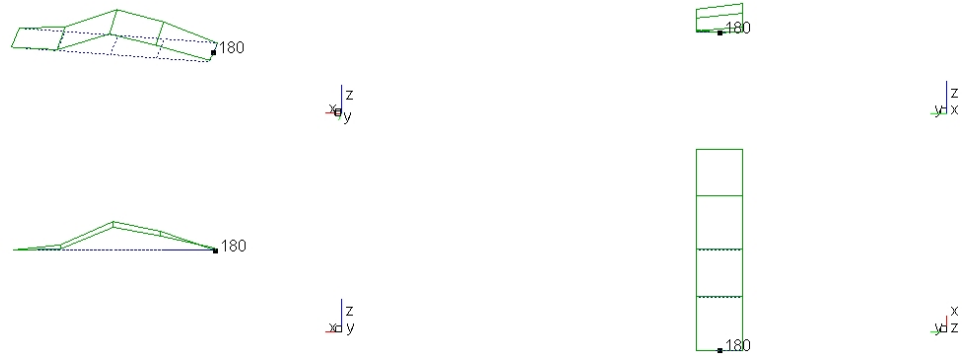


Graf 18 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se závaží



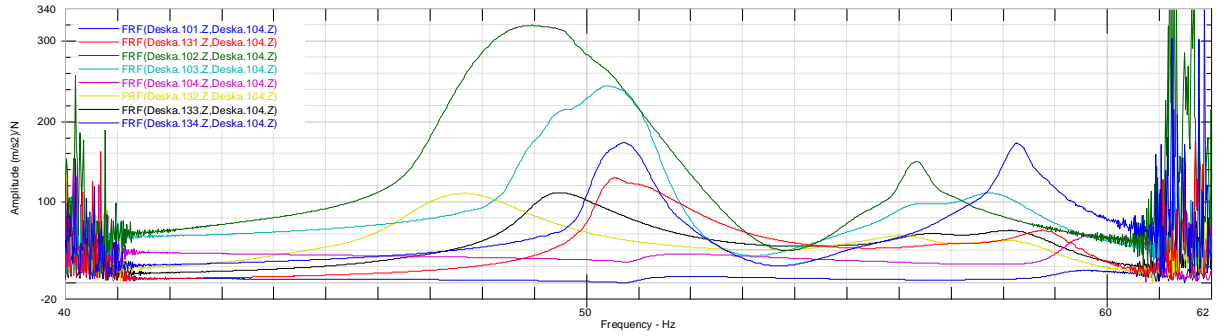
Graf 19 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se závaží

Deska
1.0 s přidanou hmotou

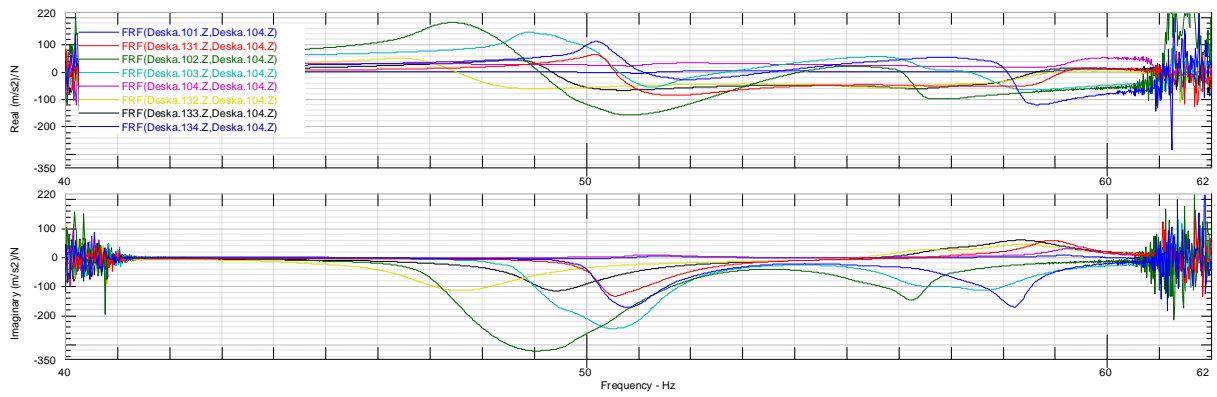


Obrázek 35 Tvar 1. ohybového módu při měření ohybu se závaží

1. Ohybový mód- se dvěma kleštinkami:

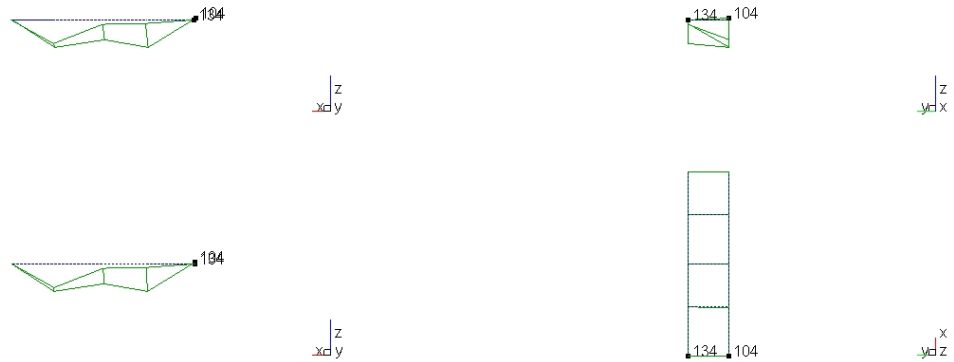


Graf 20 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se dvěma budiči



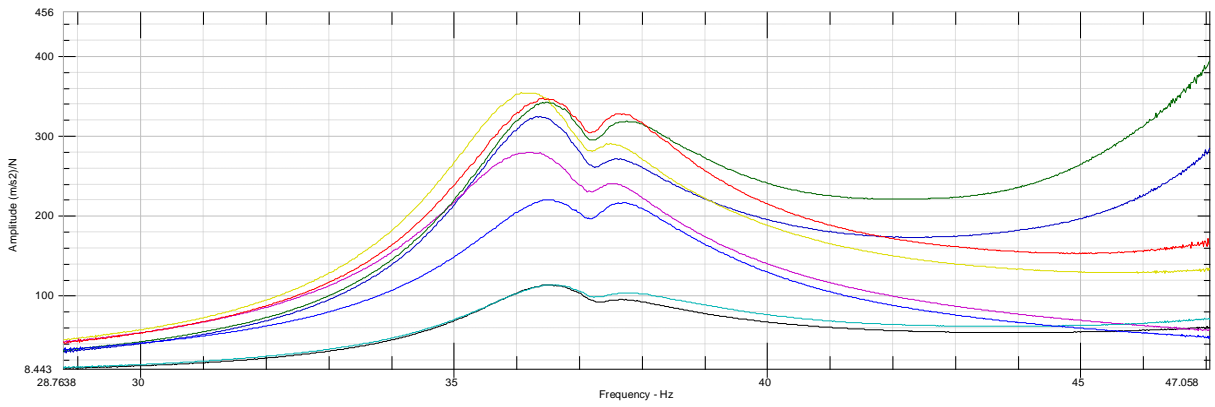
Graf 21 Graf 1. ohybového módu při měření ohybu se dvěma budiči

Deska
1.O_2budice

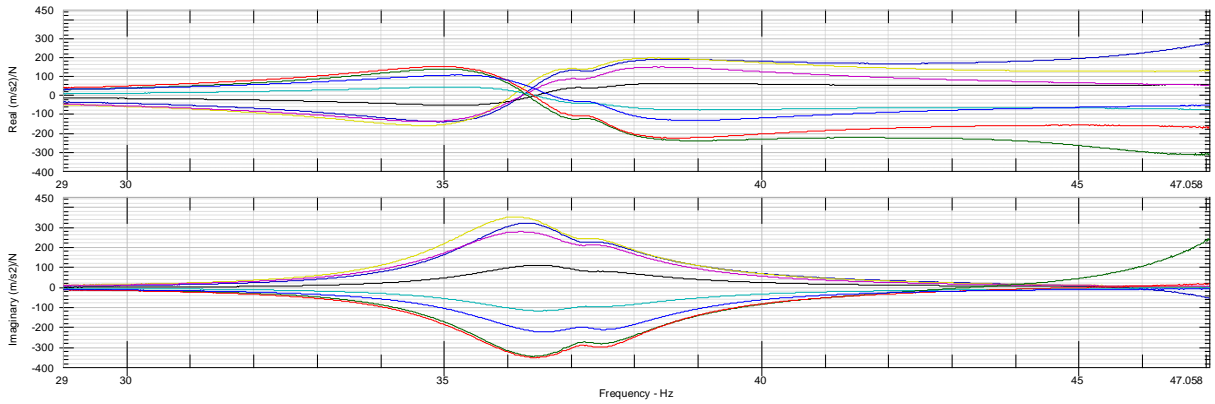


Obrázek 36 Tvar 1. ohybového módu při měření ohybu se dvěma budiči

1. Torzní mód:

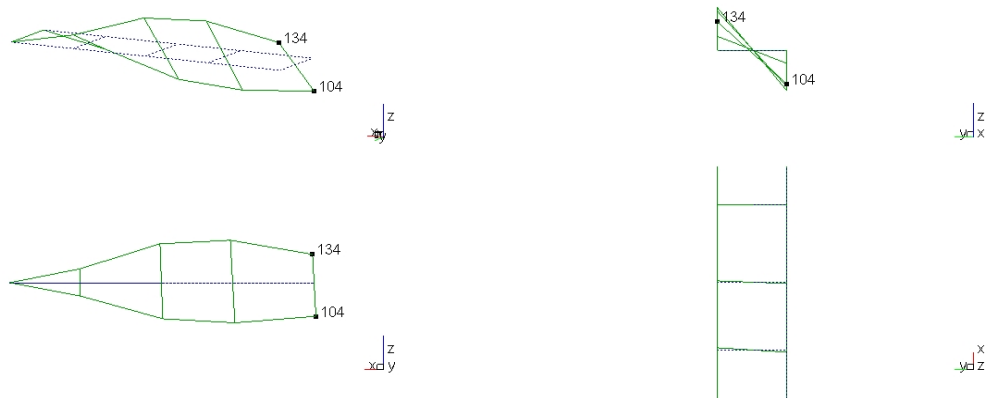


Graf 22 Graf 1. torzního módu při měření torze se dvěma budiči



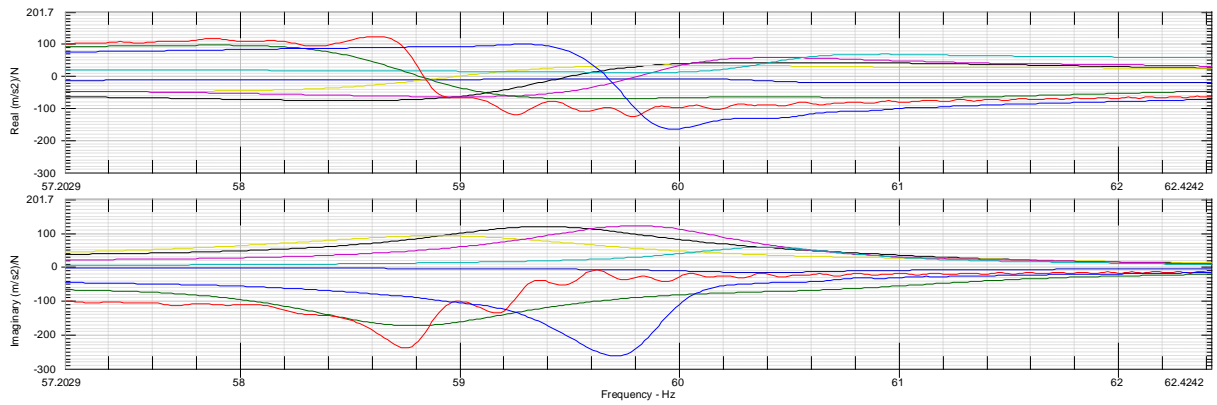
Graf 23 Graf 1. torzního módu při měření torze se dvěma budiči

Deska
1.T

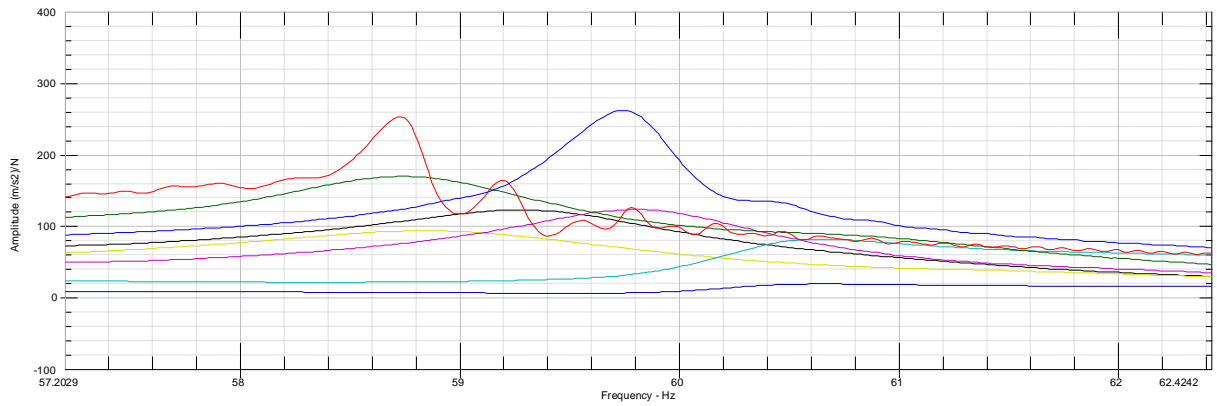


Obrázek 37 Tvar 1. torzního módu při měření torze se dvěma budiči

2. Torzní mód:



Graf 24 Graf 2. torzního módu při měření torze se dvěma budiči



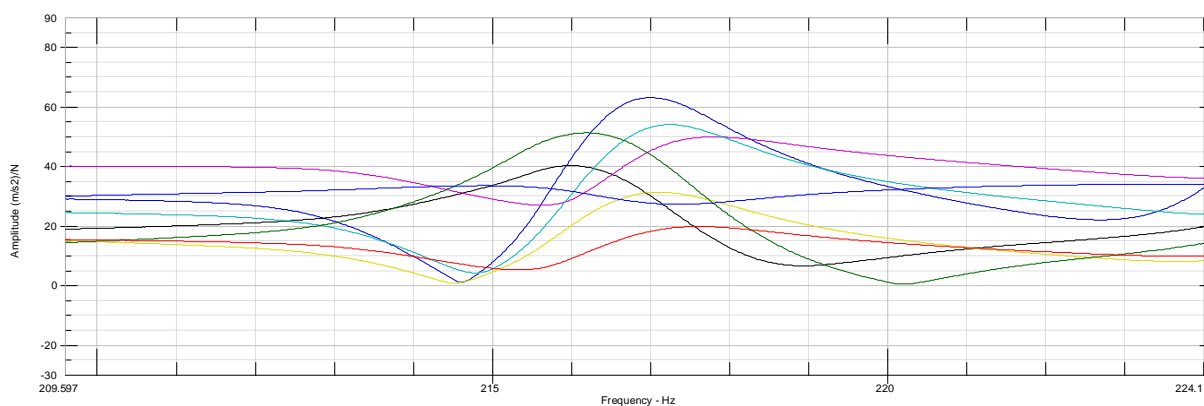
Graf 25 Graf 2. torzního módu při měření torze se dvěma budiči

Deska
2.T

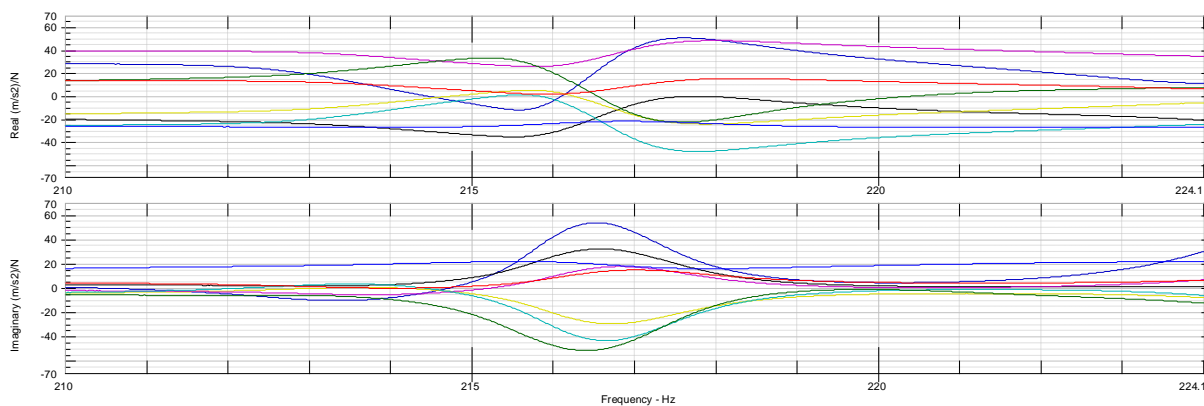


Obrázek 38 Tvar 2. torzního módu při měření torze se dvěma budiči

3. Torzní mód:

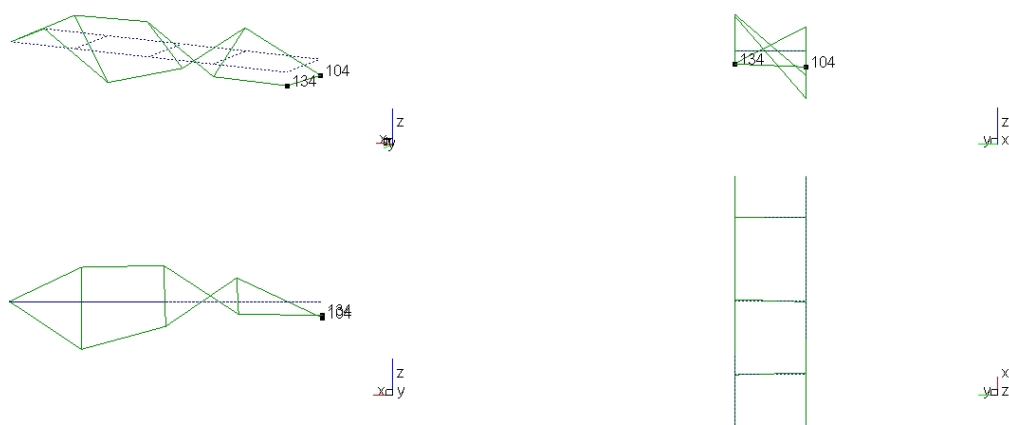


Graf 26 Graf 3. torzního módu při měření torze se dvěma budiči



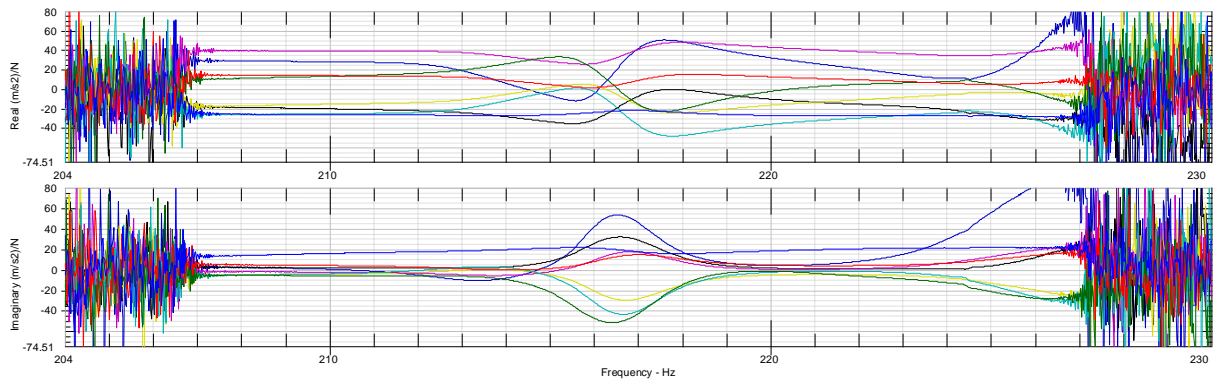
Graf 27 Graf 3. torzního módu při měření torze se dvěma budiči

Deska
3.T

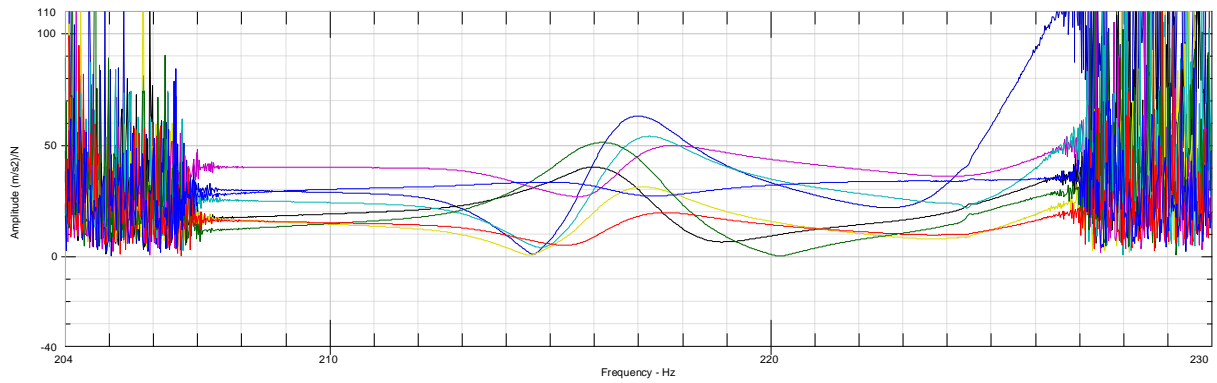


Obrázek 39 Tvar 3. torzního módu při měření torze se dvěma budiči

4. Torzní mód:

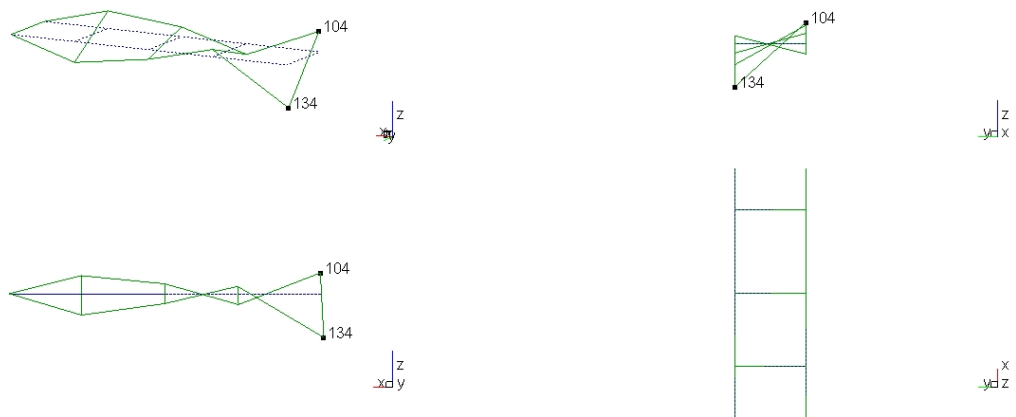


Graf 28 Graf 4. torzního módu při měření torze se dvěma budiči



Graf 29 Graf 4. torzního módu při měření torze se dvěma budiči

Deska
4.T



Obrázek 40 Tvar 4. torzního módu při měření torze se dvěma budiči