

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

LABORATORNÍ DEMONSTRÁTOR PRO VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKU

LABORATORY DEMONSTRATOR FOR VIBRODIAGNOSTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Blecha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Martin Blecha

ID: 164899

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní demonstrátor pro vibrační diagnostiku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude navrhnout, realizovat a ověřit výukový model pro modální analýzu, provozní tvary kmitů a řádovou analýzu. Funkční laboratorní demonstrátor by měl využít výukový kit firmy SVMTech s.r.o., měřicí kartu firmy National Instruments (NI), softwarová část pak naprogramována ve vývojovém prostředí LabVIEW. Teoretická část práce by se měla zabývat popisem dané problematiky. Výstupem pak měla být laboratorní úloha demonstrující tato měření v praxi.

1. Zpracujte rešerši týkající se modální analýzy, provozních tvarů kmitů a řádové analýzy.
2. S využitím dostupného profesionálního analyzátoru PULSE se experimentálně seznámte s výukovým kitem firmy SVMTech s.r.o.
3. Na základě bodu č. 2, navrhnete vlastní řešení laboratorního demonstrátoru s využitím měřicí karty NI a vývojového prostředí LabVIEW.
4. Realizujte vlastní řešení z bodu č. 3 a vhodně popište realizované úlohy včetně vytvořeného softwaru.
5. Ověřte, otestujte, a vyhodnoťte realizovaný laboratorní demonstrátor.

Jednotlivé postupy konzultujte s vedoucím práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BILOŠOVÁ, Alena. Týmová cvičení předmětu Experimentální modální analýza: návody do cvičení předmětu "Experimentální modální analýza". Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011. ISBN 978-80-248-2756-8.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 13.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se v teoretické části zabývá vibrační diagnostikou objektů, konstrukcí, strojů a soustrojí. Podle podstaty měření respektive zkoumání závad je teoretická část rozdělena do tří částí. V první části nazvané Modální analýza je rozebrána podstata kmitání, způsoby měření, příslušné technické prostředky a v neposlední řadě experimentální modální analýza. Druhá a třetí část práce jsou již zaměřeny na diagnostiku závad. V každé kapitole jsou popsány diagnostikovatelné závady, užívané metody a postup diagnózy. Další část práce již shrnuje výsledky a poznatky získané při experimentech v laboratoři. Z počátku jde o zjišťování parametrů měřeného objektu za pomoci prostředků pro prvotní diagnostiku. Na to navazuje rozšíření vybavení včetně započetí na vývoji vlastní měřicí aplikace v LabVIEW. Součástí rozšíření je výroba konstrukce pro volné uložení s možností buzení elektrodynamickým budičem. V souvislosti s tím je i aplikace rozšířena o možnost měření s budičem. Pro zvýšení komfortu při zpracování dat byly také vyvinuty aplikace doplňující programy ModalVIEW a BK Connect.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vibrační diagnostika, modální analýza, experimentální modální analýza, modální klavírko, provozní tvary kmitů, rádová analýza

ABSTRACT

This thesis deals with a vibration diagnostics of objects, structures and machines. The theoretical part is divided into three chapters according to type of the measurement. The first part called Modal Analysis discusses the basis of vibration, methods of measurement, relevant technical equipment and principle of experimental modal analysis. The second and third chapters of the thesis are focused on the diagnosis of defects. Each chapter mentioned above describes diagnosed defects, used methods and procedure for the diagnosis. Another part of the thesis summarizes practical issues and results gained in the laboratory experiments. It begins with discovering parameters of the measured object using technical diagnostics – experimental modal analysis. In the next step the hardware concept design was created, including custom measuring application programmed in LabVIEW. One part of the design is the laboratory model which includes a structure for free mounting and a possibility of excitation by an electrodynamic exciter. The application is also modified to enable measurements with shaker excitation. Finally, applications cooperating with professional software ModalVIEW and BK Connect were developed in order to simplify the operation and increase the comfort.

KEYWORDS

Vibration diagnostic, modal analysis, experimental modal analysis, modal hammer, operational deflection shapes, order analysis

BLECHA, Martin. *Laboratorní demonstrátor pro vibrační diagnostiku*. Brno, 2019, 62 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Klusáček Stanislav, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Laboratorní demonstrátor pro vibrační diagnostiku“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Stanislavu Klusáčkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	10
1 Modální analýza	11
1.1 Módy kmitání	11
1.2 Rezonance	13
1.3 Buzení soustav	13
1.4 Uložení	14
1.5 Snímače a měřicí technika	15
1.5.1 Snímače výchylky	16
1.5.2 Absolutní snímače rychlosti	16
1.5.3 Absolutní snímače zrychlení	16
1.5.4 Snímače síly	17
1.5.5 Upevnění snímačů	17
1.5.6 Laserové interferometické vibrometry	18
1.5.7 Měřicí technika	20
1.6 Experimentální modální analýza	20
1.7 Vyhodnocení dat	23
1.7.1 FFT analyzátor	23
2 Provozní tvary kmitů	25
2.1 Projevy závad [1]	26
2.1.1 Nevyváženost	26
2.1.2 Nesouosost	27
2.1.3 Ukotvení	27
3 Řádová analýza	28
3.1 Řádová spektra	28
3.2 Rychlostní profil	28
3.3 Převzorkování signálu	29
3.4 Synchronní filtrace	30
3.5 Krátkodobá Fourierova transformace STFT	30
3.6 Cepstrální analýza	30
3.7 Projevy závad	32
3.7.1 Rezonance rotoru	33
3.7.2 Kluzná ložiska	33
3.7.3 Valivá ložiska	33

4 Praktická část diplomové práce	34
4.1 Brüel & Kjaer demo kit	34
4.1.1 Hliníkové pláty	34
4.2 EMA rázové buzení	34
4.3 Konstrukce pro volné uložení	36
4.3.1 Konstrukce	36
4.3.2 Zavěšení	37
4.4 Vlastní řešení	40
4.4.1 Program pro kreslení struktury GraphEdit	41
4.4.2 Měřicí program MeasApp	43
4.4.3 Program pro zobrazení a vyhodnocení spekter DataView	49
4.5 Porovnání výsledků - rázové buzení	50
4.5.1 Měření s pomocí budiče	51
5 Závěr	54
Literatura	55
Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
Seznam příloh	58
A Fotografie	59
B Obsah přiloženého CD	61
C Výkres - Sestava pro měření dynamických vlastností	62

Seznam obrázků

1.1	Fyzikální model s jedním stupněm volnosti [4]	12
1.2	Pracovní rozsahy snímačů vibrací [16]	17
1.3	Užitečný frekvenční rozsah upevnění [8]	19
1.4	Porovnání druhů upevnění [6]	19
1.5	ModalVIEW - přínos složek ve frekvenčním spektru	22
1.6	Blokový diagram dvoukanálového FFT analyzátoru [10]	24
3.1	Převzorkování signálu [11]	29
3.2	Spektrum signálu ložiska [13]	31
3.3	Cepstrum signálu ložiska [13]	32
4.1	Zobrazení okótovaného plátu	35
4.2	Vizualizace konstrukce	38
4.3	Molitanová podložka	40
4.4	Gumové lano 8 mm	40
4.5	Pružný provázek	40
4.6	Tuhé lanko	40
4.7	Diagram měřicího řetězce	41
4.8	Program GraphEdit	42
4.9	Program MeasApp - konfigurace analogových vstupů	44
4.10	Program MeasApp - konfigurace analogového výstupu	44
4.11	Program MeasApp - konfigurace limitních hodnot vstupních signálů	45
4.12	Program MeasApp - zobrazení spekter zaznamenaných měření	46
4.13	Program MeasApp - sekvence současného spuštění analogových vstupů a výstupů	47
4.14	Program MeasApp - blokový diagram	48
4.15	Program DataView	49
4.16	Chyba měření - porovnání s referenčním měřením - rázové buzení	51
4.17	Chyba měření - porovnání s referenčním měřením - buzení elektrodynamickým budičem	53
A.1	Fotografie pracoviště	59
A.2	Fotografie konstrukce	60

Seznam tabulek

3.1	Přehledová tabulka názvů [13]	31
4.1	Vybavení pro referenční EMA plátů	36
4.2	Rezonanční frekvence plátů (f_a -tenčí, f_b -tlustší)	36
4.3	Soupiska materiálu pro konstrukci	37
4.4	Porovnání nalezených módů při různých závěsech	39
4.5	Vybavení pro EMA plátu upevněného na závěsech	39
4.6	Srovnání výsledků měřicích aplikací - rázové buzení	50
4.7	Vybavení pro modální analýzu tenkého plátu - rázové buzení	51
4.8	Srovnání výsledků měřicích aplikací - buzení elektrodynamickým bu- dičem	52
4.9	Vybavení pro modální analýzu tlustého plátu - buzení elektrodyna- mickým budičem	53

Úvod

Měření vibrací a zkoumání dynamických vlastností je nedílnou součástí vývoje důležitých komponent strojů, soustrojí jako celků, ale i stavebních konstrukcí. Cílem je zamezení kmitání na vlastních rezonancích, které způsobují nadměrné namáhání, postupnou degradaci či totální zhroucení objektu. Diagnostiku lze provádět jednorázově ke zjištění parametrů, opakovaně pro porovnání změn, nebo jako dlouhodobé monitorování.

Tato diplomová práce má za cíl navrhnout a realizovat výukový model umožňující demonstrovat možnosti vibrační diagnostiky, zejména pak experimentální modální analýzy. Laboratorní přípravek umožní provést experimentální měření s podporou více softwarových a hardwarových nástrojů. Hlavním úkolem je pak pro tento navrhovaný model vytvořit vlastní měřicí aplikaci, která zjednoduší technicky náročná měření a umožní tak zrychlit studentům měření a export dat pro následnou analýzu v komerčních diagnostických programech ModalVIEW nebo BK Connect.

V teoretické části se čtenář dozví základy o typech analýz používaných ve vibrační diagnostice, jejich uplatnění v praxi, postupech provádění a prostředcích k nim potřebných. Nejprve bude popsána modální analýza, fyzikální děje spojené s vibrační diagnostikou, nezbytné vybavení a experimentální modální analýza završující první kapitulu. Následují kapitoly o provozních tvarech kmitů a řádové analýze, které se používají u rotačně a cyklicky pracujících strojů.

V praktické části dojde nejprve k seznámení s měřenými objekty, na což naváže první experimentální měření a zjišťování dynamických vlastností. Následně je uveden popis vytvořené konstrukce pro volné uložení, umožňující buzení rázovým kladívkem i elektrodynamickým budičem. Součástí návrhu a realizace konstrukce je i ověření několika druhů závěsů. Po provedení měření komerčními programy dojde k vytvoření vlastní aplikace, včetně jejího testování a vyhodnocení správnosti dosažených výsledků.

1 Modální analýza

Modální analýza je jednou z metod technické diagnostiky používaných pro posouzení dynamického chování konstrukce. Cílem modální analýzy je určení vlastních frekvencí, poměrných tlumení, popřípadě určení vlastních tvarů vyšetřované soustavy. Vlastní frekvence jsou frekvence, kterými těleso volně a tlumeně kmitá jako důsledek vybuzení. Dokmitání tělesa probíhá současně na všech vlastních frekvencích, kde každá vyvolá charakteristickou deformaci tělesa, tzv. vlastní tvar kmitání.

Dnešní inženýři již pracují s metodami konečných prvků v programech, jako jsou ANSYS, Autodesk Inventor, SolidWorks a jiné... Předností systémů je jednoduché a rychlé zjištění dynamických vlastností daného tělesa. Výstupem je síťový plášť s možností animace, seznam vlastních frekvencí, módů, grafů atd. Slouží především k prvotnímu zjištění parametrů před výrobou prototypu/konstrukce a nápovědu pro následné nalezení vhodných měřicích bodů za účelem verifikace výsledků. Především ve vývoji u prototypů dochází k následnému upravování vstupních dat simulace, aby se dosáhlo shodného nebo alespoň podobného výsledku, jako u experimentální modální analýzy. Modální analýza a experimentální modální analýza jsou dvě metody přistupující k problematice každá z jiného konce.

Při **teoretické** modální analýze systému se postupuje od fyzikálního modelu k odezovému tímto způsobem:

1. sestavení pohybových rovnic - fyzikální model
2. analýza volného kmitání - modální model
3. analýza vynuceného kmitání při harmonickém buzení - odezový model

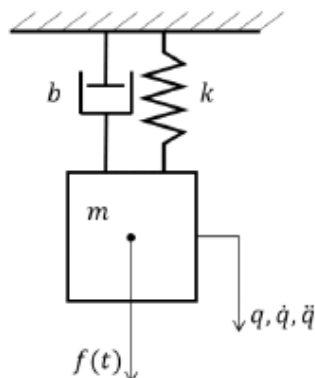
Při **experimentální** modální analýze systému se postupuje naopak v následujících krocích:

1. změření vhodné množiny frekvenčních odezvových funkcí - odezový model
2. analýza naměřených dat - modální model
3. další výpočty - fyzikální model (tento krok se obvykle již neprovádí) [2]

1.1 Módy kmitání

Na začátku je potřeba se seznámit s fyzikálními vlastnostmi soustav, kmity a vlněním. Fyzikální model soustavy využívá k popisu chování zavedených fyzikálních zákonů. Je určen vlastnostmi materiálů, okrajovými a počátečními podmínkami. Pro zjednodušení a snížení počtu rovnic se omezuje na jeden hmotný bod, nejvýše tři směry pohybu a tři osy rotace. Jeden hmotný bod z důvodu, že jakákoli struktura obsahuje nekonečné množství hmotných bodů, pro které by bylo nezbytné vytvořit pohybové rovnice. Za hmotný bod tělesa se určuje těžiště. Osy pohybu jsou na sebe navzájem kolmé a je tak možné vyjádřit pohyb v jakémkoli směru (dle počtu stupňů

volnosti). Osy rotace jsou shodné s osami pohybu a i zde je důležité hlídat stupně volnosti. Nejjednodušším modelem je model s jedním stupněm volnosti v ose q , který je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 1.1: Fyzikální model s jedním stupněm volnosti [4]

Chování fyzikálního modelu popisuje pohybová rovnice:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + kq = f(t) \quad (1.1)$$

kde m je hmotnost tělesa, b tlumení, k tuhost pružiny, \ddot{q} zrychlení, \dot{q} rychlost, q výchylka. V případě modelů s N stupni volnosti se užije maticového počtu s maticemi M , K , B rozměrů $N \times N$.

Kmitání je periodicky se opakující pohyb. Hmotný bod se pohybuje od jednoho krajního bodu k druhému a přitom pokaždé prochází nulovou (klidovou) polohou. Neustále tak dochází k přeměně energie. Ve zidealizovaném případě, kde na hmotný bod (těleso) nepůsobí žádné tlumení ($b = 0$) se jedná o nekonečný děj. Reálně toho však nelze dosáhnout, na hmotný bod působí tlumení ($0 < b \leq 1$) a jedná se tedy o děj konečný.

Vlnění se vyznačuje šířením rozruchů, zpravidla kmitů prostorem, nebo tělesy. Mezi sousedními hmotnými body jsou vazby, které umožňují šíření kmitání a tedy vznik vlny. Jedná-li se o mechanické vlnění, šířící se hmotou, lze jej detekovat snímači výchylky, rychlosti, nebo zrychlení. Dojde-li k přechodu do plynného prostředí, lze využít techniky pro akustická měření.

Pro definování módů kmitání je následně nezbytné znát pojmy uzel a kmitna. Uzel je bod tělesa, který po vybuzení na vlastní frekvenci nekoná pohyb. Kmitna je naopak bod, který po vybuzení na vlastní frekvenci kmitá. Řád módu kmitání závisí na vybuzené vlastní frekvenci f . Vzorec pro výpočet vlastních frekvencí struny je následující:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L} \quad (1.2)$$

n - počet stojatých vln

Vzorec pro výpočet vlastních frekvencí nosníku [17] je již poněkud složitější:

$$f_1 \approx 1,028 \cdot \frac{a}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (1.3)$$

$$f_n \approx 0,441 \cdot \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \cdot f_1 \quad (1.4)$$

a - tloušťka nosníku, L - délka nosníku, Y - Yongův modul pružnosti v tahu, ρ - hustota materiálu a n - mód kmitání. Výpočet však funguje pouze pro podélné módy kmitání. Diagonální módy jsou výpočtově náročnější.

1.2 Rezonance

V podstatě se jedná o nucené kmitání, které může zapříčinit i malá budící síla a následně způsobit velké změny v kmitajícím systému. Nastává v případě, když frekvence budící síly odpovídá vlastní frekvenci konstrukce nebo části stroje. Rezonance sama o sobě není příčinou vibrací, ale výrazně je zesiluje a způsobuje značnou citlivost konstrukce (či stroje) na silové působení na rezonanční frekvenci.

Rezonance je nejčastější příčinou problémů spojených s hlukem a vibracemi. Každá část strojního zařízení má určitou tuhost a hmotnost, na nichž především závisí vlastní frekvence a vibrační chování. Nezanedbatelným faktorem je také tření, které snižuje vibrace při rezonanci – třením můžeme zajistit formu tlumení. [3]

1.3 Buzení soustav

Při buzení soustav se využívá několika typů signálů. Pro prvotní zjištění vlastních frekvencí je žádoucí použít signál s širším spektrem. K ověření rezonanční frekvence již bývá využíváno užšího spektra. Zde jsou nejčastěji užívané typy signálů:

- **Jednotkový impuls** - K jeho vybudění se užívá modálního kladívka (nejběžnější způsob), uvolněním z deformované pozice, úderem padající hmoty, nebo kyvadlovým nárazem. Nárazem dojde k předání velkého množství energie ve velmi krátkém čase. Spektrum tohoto signálu je dost široké. V ideálním případě by se jednalo o Diracův impuls obsahující všechny frekvence. Intenzita rázu se mění vahou kladívka a rychlostí nárazu. Aby nedocházelo k dvojdotekům způsobeným pružností kladívka a objektu, je nezbytné těsně před nárazem pohyb kladívka prudce zpomalit. Šířka pulzu a tím i frekvenční rozsah lze ovlivnit hrotem kladívka. Čím tvrdší hrot je použit, tím vyšší frekvence lze vybudit. Standardně se používají hliníkové, plastové a gumové hroty.

- **Širokospektrální šum** - Je charakterizován výkonovou spektrální hustotou a hustotou pravděpodobnosti amplitudy, která má Gaussovo normální rozložení. Může být pásmově omezen podle toho, jaký frekvenční rozsah nás zajímá. Stejně dobře jej lze použít pro měření v základním pásmu i pro měření s frekvenční lupou. Signál není v čase záznamu periodický, je tedy nutné (na vstupní i výstupní signál) použít Hanningovo okno, abychom omezili chybu únikem. Změny amplitudy a fáze budícího signálu jsou náhodné, což znamená, že průměrováním se odstraní vliv případných nelinearit v systému a získáme ideální linearizovaný odhad FRF (Frequency Response Function). Jelikož jde o náhodný signál, je průměrování samozřejmě nezbytné. Činitel výkmitu a poměr signálu k šumu jsou u tohoto typu signálu docela dobré. [2]
- **Pseudonáhodný signál** - Jedná se o část náhodného signálu, který se neustále opakuje. Tím, že se již jedná o periodický signál, nevzniká potřeba váhových funkcí a může se použít obdélníkové okno. Hodí se pouze na dokonale lineární systémy.
- **Sinus** - Měření sinusovým signálem s konstantní frekvencí není příliš použitelné při modální analýze. Při měření sinusovým signálem se nevyužívá fourierovy transformace. Měří se přímo ustálená odezva systému na zvolených frekvencích. Proměření celého spektra je poměrně zdlouhavé a používá se proto pouze ke zkoumání oblastí okolo rezonančních kmitočtů.
- **Cvrkot** - Slouží pro širší proměření spektra. Základem je sinusový signál, který s časem mění frekvenci. Generátory analyzátorů umožňují nastavení nárustu frekvence (lineární/logaritmický), dále počáteční a koncovou frekvencí, méně často pak rampu nárustu amplitudy signálu na počátku a konci cyklu. Signál ze snímače síly a odezvy se následně vyřízne obdélníkovým oknem.

K vybuzení popsaných signálů se využívá elektrodynamických budičů (shakerů). Generovaný signál zesílený výkonovým zesilovačem rozkmitá jádro budiče a ten skrze budící tyčinku přenáší energii na měřený objekt. Osa budiče musí být totožná se směrem žádaného působení. Drobné vyosení při modální zkoušce je schopna kompenzovat budící tyčinka, která musí být tuhá ve směru působení, ale pružná při ohybu do strany. Elektrodynamickým budičem lze dosáhnout i napodobení rázového pulzu modálního kladívka a generovat tak periodicky impulsy.

1.4 Uložení

Vhodné uložení je nezbytnou součástí měření. Nesmí docházet k nechtěnému tlumení a ovlivňování frekvenčního spektra. Užívá se třech základních uložení.

- **Volné uložení** - Volné uložení je teoreticky takové, že vykazuje šest módů tuhého tělesa (3 ve směru souřadných os a 3 rotace kolem souřadných os).

Zvolená podložka musí zamezit šíření vibrací mezi objektem a podstavou, tedy nesmí mít jakékoli vazby. Vhodnou podložkou je molitan, nejlépe vroubkovaný akustický. Je možné použít i umístění na velmi měkké pružiny. Zejména u těžších objektů je možné zavěšení. Dle váhy měřeného objektu se může volit mezi silonem, provázkem, lanem, gumovými závěsy, nebo pružinami. Za volné uložení se dá považovat, pokud vlastními frekvencemi nepřesáhne 10% hodnoty prvního ohybového módu tělesa. Vhodné také je umístit upevnění pružin do uzlových bodů. Jedná se o nejjednodušší uložení a nejvhodnější při porovnávání se simulací.

- **Pevné uložení (vetknuté)** - Měřený objekt je v některé jeho části nehybně upevněn. Pevné uložení vykazuje odezvu znehybněných stupňů volnosti menší než 10% odezvy všech ostatních. Okrajové podmínky je dosti obtížné stejně nastavit, a tak se poměrně problémové sjednocení výsledků simulace i měření, případně dosáhnout stejných výsledků při opakovaném měření. V řadě případů však není možnost zaměnit uložení (např. lopatky turbín).
- **In-situ (na místě)** - Některé objekty neumožňují jak svou velikostí, vahou nebo náročností demontáže přemístit. Měření se provádí na místě za provozních podmínek. Co se týká přípravy, jde o nejjednodušší uložení, srovnání s modelem naopak jako nejobtížnější.

1.5 Snímače a měřicí technika

Volba správného snímače je zásadní pro získání odpovídajícího časového průběhu vibrací. Jsou to převodníky mechanického kmitání na elektrický signál. První parametr, podle kterého se dělí je frekvenční rozsah. Do 2 kHz se jedná o nízkofrekvenční, 2-50 kHz jsou vysokofrekvenční a s vyššími frekvencemi než 50 kHz již spadají do skupiny velmi vysoké. Dále se dělí na:

- **Aktivní** - pro generování signálu nepotřebují napájení (elektrodynamické, piezoelektrické snímače)
- **Pasivní** - ke své funkci potřebují externí napájení (kapacitní, indukční snímače)
- **Dotykové** - jsou v přímém kontaktu s měřeným objektem
- **Bezkontaktní** - nejsou v kontaktu s objektem
- **Absolutní** - pohyb je vztahován vůči gravitačnímu poli země (využívá seismické hmoty)
- **Relativní** - odměřuje od vztažného bodu (poloha hřídele vůči tělu motoru)

1.5.1 Snímače výchylky

Snímače výchylky [5] umožňují určit okamžitou polohu tělesa. Pracují na indukčním, indukčnostním, optickém, kapacitním a magnetickém principu. Patří do skupin bezdotykových relativních snímačů. Využívají se zejména při měření výchylky hřídele, nebo měření nízkých kmitočtů.

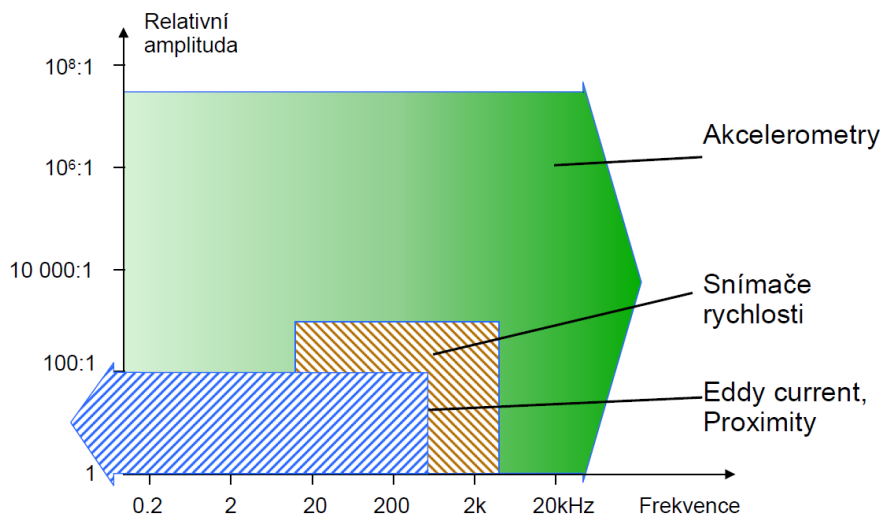
1.5.2 Absolutní snímače rychlosti

Snímač rychlosti je seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný mechanické vibrační rychlosti měřeného tělesa. Obecně se snímače rychlosti upevňují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Pokud je požadovaným parametrem výchylka, je nezbytné integrovat výstup ze snímače rychlosti tak, aby dal výstup úměrný výchylce. Typický frekvenční rozsah je od 1 Hz do 3500 Hz a rozsah teploty od -50 °C do 125 °C. Snímače rychlosti jsou zvláště vhodné pro měření nízkofrekvenčních vibrací. Většina snímačů rychlosti používaných pro monitorování má rezonanční frekvenci nad 10 Hz. [5]

1.5.3 Absolutní snímače zrychlení

Absolutní snímače zrychlení nebo také akcelerometry, generují signál úměrný zrychlení měřeného tělesa. Ze získaného signálu lze integrací získat rychlost vychýlení a opětovnou integrací polohu. Jsou charakterizovány velkým frekvenčním rozsahem (0,1 - 30 kHz) a dobrou tepelnou odolností v rozsahu typicky -50 až +120 °C. Frekvenční rozsah a citlivost jsou mimo jiné závislé na hmotnosti snímače. Při měření je žádoucí co nejmenšího ovlivnění struktury a tím i jejích vlastností. Může se tedy použít lehčí snímač, který však má nižší citlivost. V opačném případě, kdy je potřeba vyšší citlivosti, je nezbytné použít těžší snímače, které však mívají nižší frekvenční rozsahy.

Podstata akcelerometru je založena na seismické hmotě, která působí proti směru působení vnějších sil. Nejčastěji se používají piezoelektrické akcelerometry, ale je možné se setkat i s piezorezistivními, kapacitními a elektrodynamickými. U piezoelektrických snímačů deformuje seismická hmota krystal a generuje elektrický náboj úměrný způsobeným vibracím. Je-li akcelerometr vybaven interním zesilovačem, je označován ICP nebo IEPE a citlivost je v $[mV/ms^2]$. Akcelerometry bez zesilovače mají nábojový výstup $[pC/ms^2]$, který je nezbytné zesílit externím nábojovým zesilovačem.



Obr. 1.2: Pracovní rozsahy snímačů vibrací [16]

1.5.4 Snímače síly

Standardně se k měření síly [10] využívá tenzometrů a to jak polovodičových, tak kovových materiálů. Tenzometry se zapojují do můstků a jsou schopny měřit jak statickou, tak dynamickou zátěž. Tenzometry lze kontrolovat gravitační silou a tělesem o známé váze. Pro vyšší frekvence je však již není možné použít.

Měření vyšších frekvencí umožňují piezoelektrické snímače, kde podobně jako u akcelerometrů dochází k deformaci krystalu a tím i vytvoření náboje. Neobsahují však seismickou hmotu, tlak na krystal působí zvenčí skrze kovové tělo snímače. Slouží typicky pro dynamické měření síly.

1.5.5 Upevnění snímačů

Před montáží snímače musí dojít k dokonalému očištění a vyrovnání měřicího bodu. Je žádoucí, aby kontaktní plochy na sebe co nejlépe přiléhaly a nedocházelo k ovlivňování měření. Možností upevnění je několik přičemž každý způsob má jisté výhody i nevýhody.

- **šroubový spoj** - Jedná se o nejvíce preferovaný spoj. Dochází k takřka dokonalému spojení a tím minimálnímu ovlivnění měření. Při montáži je zapotřebí si dát pozor na délku závitu, aby nedošlo k poškození snímače. Prostor mezi kontaktními plochami se může vyplnit silikonovým olejem pro zlepšení parametrů spoje. Dotažení snímače je vhodné provést pomocí momentového klíče, který zaručí nepoškození závitu, optimální podmínky přenosu energie a opakovatelnost měření. Nevýhoda spočívá v nutnosti vytvoření otvoru se závitem. [7]

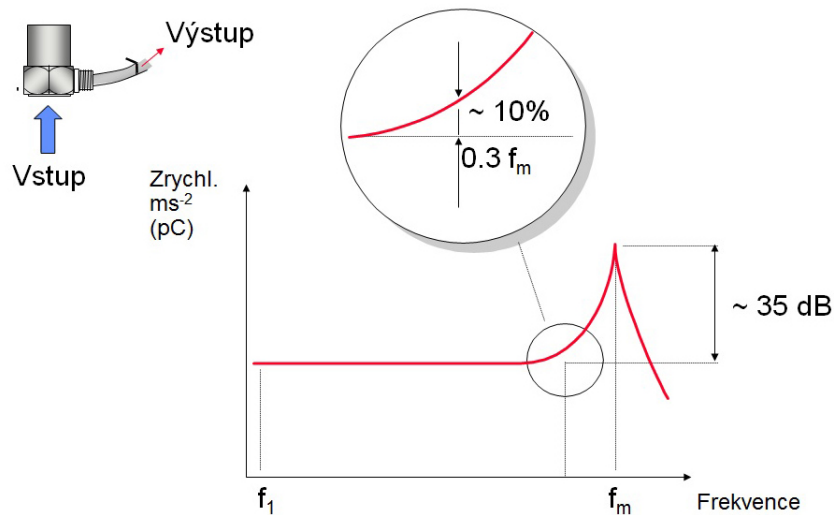
- **včelí vosk** [8] - Včelí vosk je velmi oblíbený kvůli jednoduše a rychlé montáži snímače. Na očištěný povrch se nanese tenká vrstva vosku a za současného torzního pohybu se snímač přitlačí. Nevýhodou je omezený teplotní rozsah na 40°C.
- **lepidlo** [8] - Některé miniaturní snímače je možné připevnit pouze pomocí lepidla. Dobu měření navyšuje čas na vytvrzení lepidla. Dosahuje však lepších teplotních parametrů než vosk. Demontáž snímače může být obtížná, až devastující. Je možné použít i lepicí podložku se závitem a zamezit tak kontaktu snímače a lepidla.
- **oboustranná lepicí páska** - Je vhodná při potřebě rychlého připevnění. Správným výběrem typu lepicí pásky lze dosáhnout dobrých parametrů spoje.
- **magnet**[9] [15] - Nejrychlejším způsobem upevnění snímače je pomocí magnetické podložky. Montáž tímto způsobem je vhodná spíše pro orientační měření, jelikož podložka omezí frekvenční rozsah na cca 1 až 2 kHz dle kvality magnetu. Tento typ spoje omezí rezonanční kmitočet snímače přibližně na 7 kHz.
- **ruční dotyková sonda** - Sonda je sestavena ze snímače zrychlení a hrotu. Hrot má na straně snímače závit pro připevnění. Měření probíhá přiložením hrotu sondy na povrch tělesa. Tento způsob uchycení se používá spíše jen na prvotní diagnostiku. Výhodu má ve velmi rychlém započítí měření. Převažují však nevýhody v podobě omezeného rozsahu měření, proměnné intenzity přítlaku a rušení.
- **montážní klip** [9] - Je vhodný především pro s odstupem času opakovaná měření. Připevnění klipu se realizuje šroubem, nebo lepidlem. Snímač se do klipu pouze zasune.

Způsob montáže snímače má samozřejmě značný vliv na frekvenční rozsah měření. Čím bude připevnění snímače „poddajnější“, tím se použitelný frekvenční rozsah sníží. Vrstva vosku, lepidla nebo lepicí páska dodává do systému snímač – zkušební povrch další prvek (pružinu-tuhost), který má vliv na frekvenční charakteristiku. Za použitelný frekvenční rozsah lze obecně uvažovat oblast frekvenční charakteristiky do frekvence, kde je odchylka napěťové citlivosti snímače do 10% (cca do 0.3 fm - viz.obrázek 1.3) a nábojové citlivosti do 5%. [8]

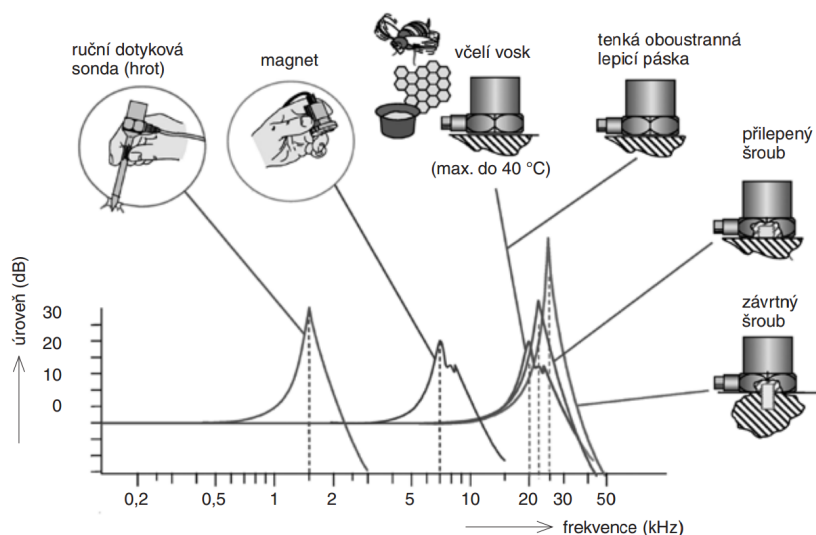
1.5.6 Laserové interferometické vibrometry

Princip laserových vibrometrů je založen na interferenci dvou koherentních, lineárně polarizovaných světelných paprsků. Jako zdroj záření se používají nízkovýkonové lasery. Pomocí laserových interferometrů lze bezdotykově přímo měřit amplitudu kmitů čítáním interferenčních proužků. [5]

Velkou výhodou nad zmíněnými snímači mají ve velkém frekvenčním rozsahu,



Obr. 1.3: Užitečný frekvenční rozsah upevnění [8]



Obr. 1.4: Porovnání druhů upevnění [6]

který se pohybuje až k 30 MHz, přesnost a lineární fázovou odezvu. Díky principu fungování, je možné měřit i velmi lehké struktury bez obavy z ovlivnění. Využívají se i ke kalibraci akcelerometrů, v místech kam by nebylo možné uchytit kontaktní snímač a v kombinaci s robotickým manipulátorem na měření rozsáhlejších struktur s větším počtem měřicích bodů. Další z výhod je i měření na horkých předmětech. K řadě kladných vlastností má i několik záporných. Nevýhodou je vysoká cena, problémové použití v prašném prostředí a měření na špatně odrazivých plochách.

1.5.7 Měřicí technika

U větší části metod vibrační diagnostiky je zapotřebí alespoň dvou měřicích kanálů. Vyjimku tvoří pochůzkové analyzátoři pro orientační měření. Alespoň dva kanály z důvodu použití jednoho pro referenční snímač a zbylých pro měření odezev. Každý kanál musí být schopen zaznamenat zkoumaný signál s co nejmenším zkreslením. Tedy musí dosahovat několikanásobně vyšší vzorkovací frekvence než nejvyšší frekvenční příspěvek signálu. Minimálně však dvojnásobného kmitočtu pro zachování vzorkovacího teorému. Antialiasingový filtr je vhodné nastavit na 0,4 rozsahu. Nastavení citlivosti měřicího kanálu závisí na použitých snímačích a nábojových zesilovačích. Dosáhnout nejlepších výsledků lze, pokud bude rozsah využíván blízko maxima rozsahu, nebo alespoň ve dvou třetinách. Pozor je nezbytné si také dát na přebuzení.

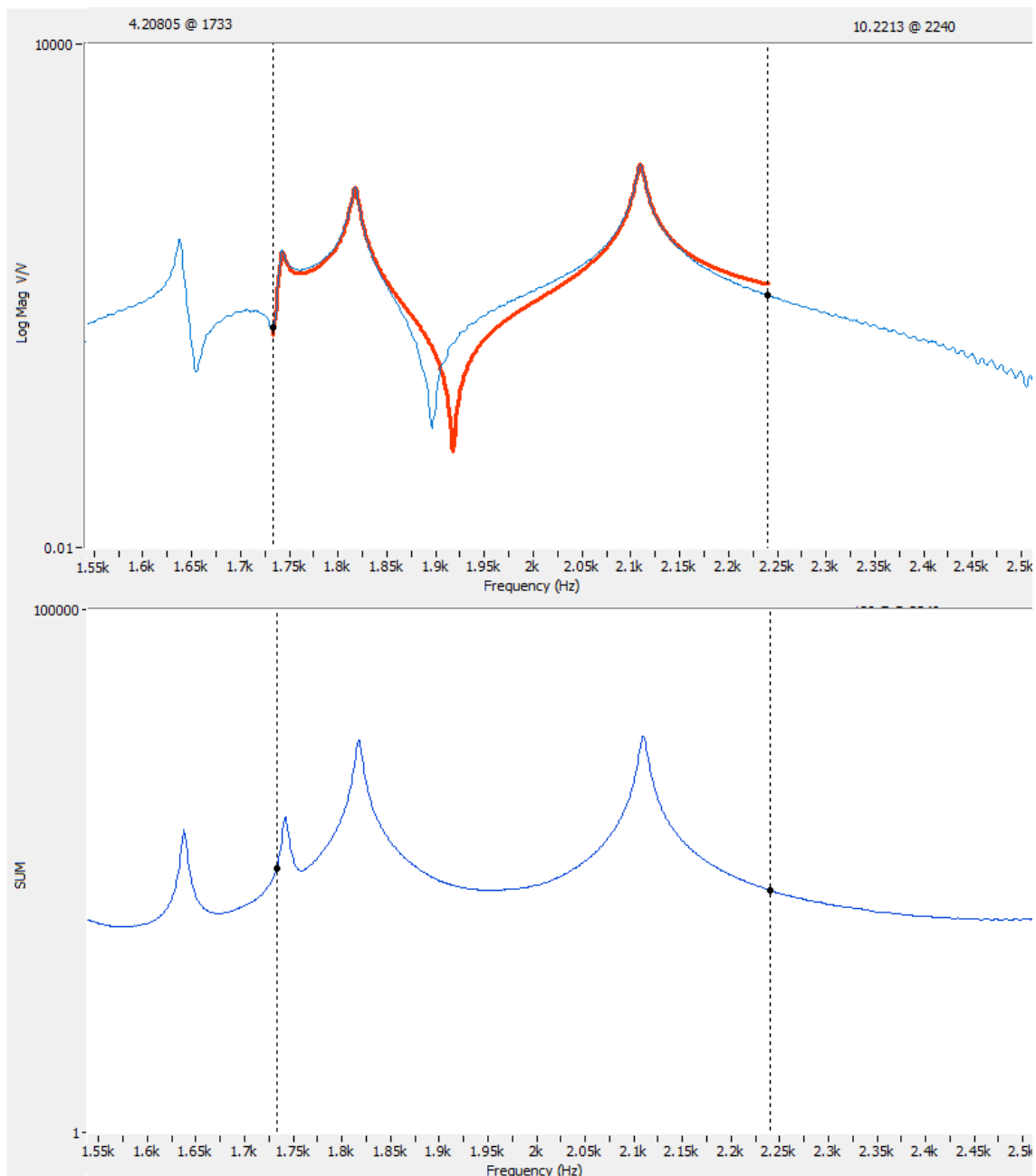
1.6 Experimentální modální analýza

Experimentální modální analýza[2] (EMA) je analýza prováděná experimentálně na zkoumaném objektu. Podstatou je vybuzení dané struktury známým signálem a zjištění jejich dynamických vlastností. Pro dosažení kvalitních výsledků je nezbytné zvolení správné techniky, uložení a zpracování dat. Celý postup je možné shrnout do několika kroků:

1. **Zjištění parametrů a odhad polohy uzlů** - V prvním kroku je nezbytné odhadnout nebo ze simulace určit vhodnou polohu referenčních bodů. Referenční bod by měl obsahovat rezonanční frekvence hledaných módů. V případě, že v daném bodě některá z rezonancí zmizí, znamená to, že se jedná o uzlový bod příslušného vlastního tvaru a nelze jej tedy použít jako referenční. Situaci však ještě může komplikovat váha snímačů. Ta nesmí překročit nejvyšší možnou mez a to 10% váhy objektu. Vždy podle situace je potřeba zvolit ze dvou protichůdných požadavků:
 - umístění do referenčního bodu, nebo jeho těsné blízkosti pro lepší poměr užitečného signálu a šumu
 - umístění dál od referenčního bodu a méně tak ovlivnit strukturu
2. **Volba vhodného měřicího vybavení a postupu měření** - Po zjištění parametrů a nalezení vhodných měřicích míst je na řadě volba buzení soustavy a sensorika. Prvním parametrem při rozhodování je velikost měřeného objektu, počet měřicích bodů, vlastnosti kontaktních ploch v měřicích bodech, umístění objektu, teplota objektu, teplota okolí, frekvenční rozsah, zdroj buzení a finanční prostředky.
 - Nejjednodušší kombinace je varianta s modálním kladívkem a jedním nebo

více akcelerometry. Montáž akcelerometrů je relativně zdlouhavá, proto je vhodnější akcelerometr(y) ponechat na jednom místě a strukturu vybudit ve zbylých vytipovaných měřicích bodech. Kombinace je vhodná i pro měření mimo laboratoř.

- Užití elektrodynamického budiče vyžaduje větší náklady na techniku. Výhodou to však přináší v důkladnějším prozkoumání frekvenčního pásma. Budič může být taktéž doplněn o N akcelerometrů, které je možno v případě jejich nedostatku přemísťovat.
 - Jenou z nejsložitějších kombinací je použití elektrodynamického budiče a laserového vibrometru. Doplněním o robotický manipulátor se stává skvělou volbou pro laboratoře vývojového oddělení zejména automobilek. Počáteční investice jsou větší, avšak vynaložené prostředky se vrátí v podobě úspory času, nákladů na obsluhu a kalibrace spousty akcelerometrů.
3. **Uložení objektu** - Pokud to situace umožňuje, je nejvhodnější použít volné uložení. To je nejlépe porovnatelné se simulací, má dobrou opakovatelnost a minimální rušení. U pevného (vetknutého) uložení je problém s okrajovými podmínkami což způsobuje možné nesrovnalosti oproti simulaci a opakovanému měření. In situ (na místě) se užije pokud není možné součást přemístit, nebo je zapotřebí měřit kompletní soustrojí.
 4. **Provedení měření ve vytipovaných bodech a jejich případná korekce** - Po zdárném splnění přípravy se může přistoupit k měření. V tomto bodě je nezbytné dodržet jen několik málo pravidel. Omezit dvojdotek v případě požití modálního kladívka, rázy směřovat kolmo, musí být nastavena dobrá citlivost, intenzita rázů musí ležet ve správných mezích a musí být zamezeno nežádoucím ovlivněním kontaktem s okolím, nebo kabeláží. Proměření několika málo bodů můžeme dojít k závěru, zdali jsou prvotní odhady správné, nebo bude zapotřebí korekce. V případě referenčního bodu by se v něm měly vyskytovat všechny zjištěné rezonanční frekvence. Zbylé měřicí body je vhodné korigovat tak, aby intenzita rezonančních frekvencí byla co nejvyšší. V případě použití modálního kladívka lze u některých struktur body odhadnout poslechem. Klepáním po objektu, uzlové body budou generovat tupější odezvu, kmitny naopak vygenerují intenzivnější vyšší tóny.
 5. **Zpracování dat a vyhodnocení** - Výstupem měření jsou časové záznamy signálu. Aby bylo možné lépe vyhodnotit data, je nezbytné provést rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Převodem dat z časové do frekvenční oblasti se získají informace o příspěvcích různých frekvencí. Nyní již stačí identifikovat rezonanční frekvence, které se vyznačují výrazným nárůstem amplitudy viz. následující obrázek 1.5:
Na obrázku je možné vidět tři zvýrazněné rezonanční frekvence o hodnotách



Obr. 1.5: ModalVIEW - přínos složek ve frekvenčním spektru

1742, 1817 a 2110 Hz z měření ocelového plátu demokitu. Horní okno obrázku zobrazuje příspěvky frekvencí z jednoho měřeného bodu. Ve spodním okně je zobrazen součet ze všech měřených bodů. Zobrazení součtu je vhodné především z důvodu lepší přehlednosti a možnosti absence, nebo slabší odezvy některé frekvence v daném bodě. Každá z rezonančních frekvencí náleží jednomu módu kmitání.

1.7 Vyhodnocení dat

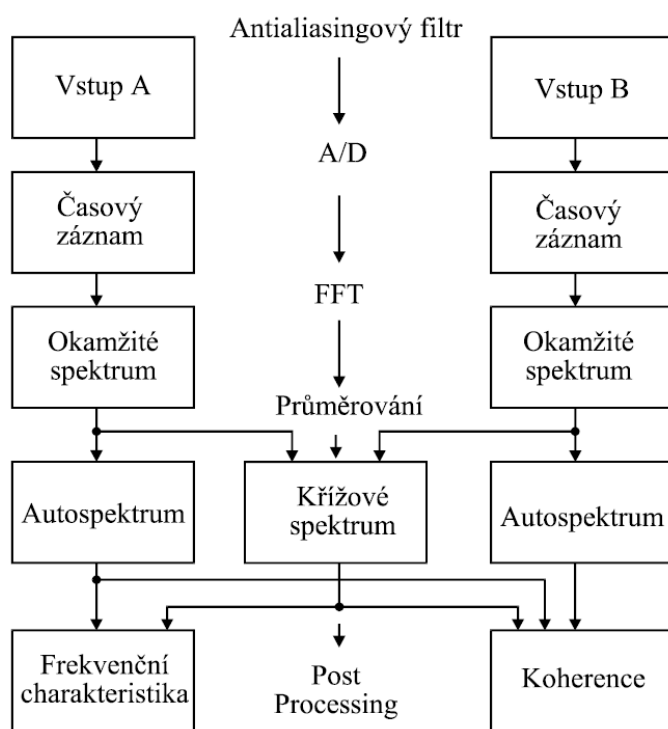
Frekvenční charakteristika dynamické soustavy a přenosová funkce jsou variantami popisu vlastností dynamických soustav. K experimentální identifikaci přenosových funkcí je vypracována řada metod. I přes jejich univerzálnost jsou přece jen některé metody pro daný typ soustavy, buzení a odezvy vhodnější než jiné. Je to jednak dáno typem přenosové funkce a přípustným způsobem buzení odezvy, tak i vlivem chyb měření nebo přítomností poruch. [10]

Přenosové vlastnosti mechanických soustav se vyznačují často velmi malým tlumením při rezonancích, tj. vznikem tlumeného kmitání při skokovém nebo rázovém buzení. K jejich identifikaci je velmi vhodný postup, který využívá měření spekter. Identifikace může poskytovat podklady pro návrh řízení takových soustav nebo může být využita k testování modálních vlastností mechanických struktur. [10]

Měření záznamů o konečné délce vede ke vzorkování, tj. k diskretizaci, obrazů vstupního a výstupního signálu, a tím také frekvenčního přenosu na jednotlivé přenosové součinitele pro jednotlivé frekvence harmonického signálu na vstupu a výstupu soustavy. Přenosový součinitel je komplexní číslo, proto obsahuje nejen informaci o modulu přenosu, ale i o fázovém posunu mezi oběma harmonickými signály. [10]

1.7.1 FFT analyzátor

Výpočet frekvenčních charakteristik a koherence se provádí ve speciálních programech, nebo vícekanálových analyzátorech. Podmínkou měřicích karet, či analyzátorů je mít alespoň dva vstupní kanály. Jeden kanál je využíván pro záznam budícího signálu, druhý pro záznam odezvového signálu. Oba analogové signály procházejí nejprve antialiasingovým filtrem, pak následuje A/D převod, FFT, průměrování a výpočet frekvenční charakteristiky s koherenční funkcí. Inverzní FFT lze z frekvenční charakteristiky určit impulsní odezvu. Předností FFT analyzátorů před jednoduchým řešením záznamu dat počítačem s kartou A/D převodníku a s přepínačem měřicích kanálů je to, že oba vstupní signály jsou snímány naprosto ve stejném časovém okamžiku, proto nevzniká ani při nejvyšším frekvenčním rozsahu žádné zpoždění mezi vstupy. [10]



Obr. 1.6: Blokový diagram dvoukanalového FFT analyzátoru [10]

2 Provozní tvary kmitů

Provozní tvary kmitů (PTK), anglicky Operation Deflection Shapes (ODS) je také jednou z metod technické diagnostiky. Metoda je dosti podobná experimentální modální analýze s rozdílem v buzení struktury. Jak bylo poznamenáno v předchozí kapitole, experimentální modální analýza je založena na vybuzení struktury známým signálem. Metoda provozních tvarů kmitů naopak pracuje s přirozeným buzením daného stroje, soustrojí, budov nebo konstrukcí. Nevyužívá tedy znalosti známého budicího signálu. Zobrazuje reálné kmitání stroje/konstrukce při provozním zatížení.

PTK obsahují celkové vibrace pro dva a více DOF (Degree of freedom - stupně volnosti) ve stroji nebo mechanické struktuře. Tedy ODS obsahuje jak vibrace vnučené, tak i rezonanční. Avšak tvar módu je charakterizován pouze rezonančními vibracemi jednoho nebo více DOF. [14]

Jelikož se využívá přirozeného buzení od stroje nebo okolí, není potřeba stroj odstavovat, případně konstrukci uzavírat což je velkou výhodou. Měřicí aparát může zůstat nainstalován a v určených periodách provádět měření. Neznalost budicí síly omezuje úplné určení dynamických sil. Metoda nalezne uplatnění v:

- diagnostice uložení
- odhalení chybné montáže
- změně tuhosti
- uvolnění spojů
- prvotního určení nesouososti, nebo nevyváhy
- identifikaci způsobu namáhání
- nalezení rezonančních frekvencí (za účelem omezení provozu v daných otáčkách)

Měření probíhá podobně jak u modální analýzy s rozdílem ponechání referenčního akcelerometru na stálém místě. Zbylé akcelerometry můžou zůstat taktéž připevněny, pokud to technické parametry měřicího zařízení a počet akcelerometrů dovolují, nebo je lze přemísťovat. V bodech shrnutý postup vypadá následovně:

1. identifikace stroje/konstrukce
2. odhad rezonančních frekvencí za účelem správného výběru měřicí techniky
3. určení vhodných bodů a směrů pro měření a umístění referenčního snímače
4. překreslení struktury do příslušného SW
5. montáž snímačů a měření včetně případného přemísťování
6. zpracování vhodným softwarovým nástrojem
7. identifikace problémových frekvencí a lokalizace problému

Včasná identifikace závady snižuje pravděpodobnost většího poškození a tím i šetří náklady. V okamžiku, kdy je člověk schopen sluchem nebo hmatem zaznamenat nestandardní chování, bývá často již pozdě.

2.1 Projevy závad [1]

Při hodnocení stavu strojů pomocí analýzy vibrací je důležité uvážit jejich podstatné charakteristiky, a to jak konstrukční, tak provozní. Tyto charakteristiky lze rozdělit do několika skupin [1]:

1. působení mechanických sil
 - odstředivá síla - otáčková frekvence, nebo její násobky
 - vliv spojení - soustrojí se dělí na hnací a hnanou část
 2. provozní funkce - dle podstaty stroje (elektromotor, čerpadlo,)
 3. konstrukční prvky - kluzná nebo valivá ložiska, ozubené převody, řemenice, ...
- Jednotlivé zmíněné závady mohou zapříčinit vznik jiných závad.

2.1.1 Nevyváženost

Jedná se o všeobecně známou závadu. Setká se s ní i většina laiků v podobě kmitajícího kola vozu. Příčinou je posun těžiště mimo osu otáčení. Na hřídel poté působí odstředivá síla úměrná vychýlené hmotnosti a úhlové rychlosti. S výjimkou vibračních strojů je cílem tomuto chování zamezit. Nevyváženost může být způsobena:

- konstruktivními požadavky
- nehomogenitou materiálu
- výrobní tolerancí
- přesností osazení

Podle toho, jakým způsobem je hmota na rotoru rozložena a jak se to projeví na poloze hlavní osy setrvačnosti ve vztahu k ose rotace, rozeznáváme tři typy nevyváženosti: silovou, momentovou a obecnou. Z toho se pak také odvozují způsoby vyvažování. Nejlépe se odstraňuje problém se statickou nevyvážeností (stačí vyvažování v jedné rovině). V praxi se téměř vždy jedná o nevyváženost obecnou, přesto se i v těchto případech pro svou jednoduchost často používají metody pro řešení nevyváženosti statické, které problém sice nemohou odstranit, ale mohou jej zmírnit.[1]

1. statická - osa těžiště je rovnoběžná (odstředivá síla působí na obou koncích hřídele stejným směrem)
2. momentová - osa těžiště protíná osu otáčení ve středu objektu (síly na koncích působí opačným směrem)
3. obecná - osa těžiště protíná osu otáčení mimo střed objektu (rozdílně velké síly na každém konci působí opačným směrem)

Ve frekvenčním spektru vibrací se nevyváženost projevuje vibrační složkou rotorové frekvence.

2.1.2 Nesouosost

Nesouosost je způsobena špatným sestavením stroje či soustrojí. Chybnou montáží nebo výrobou stroje může dojít k vyhnutí ložiska na jednom konci hřídele. Z počátku se závada nebude výrazněji projevovat. Jelikož je však vyvíjen nerovnoměrný tlak na ložisko, tak po nějaké době začne vykazovat vady.

Sestavení soustrojí, tedy spojení hnacího a hnaného zařízení se z velké části provádí skrze spojku. Jen málo soustrojí je propojeno celistvou hřídelí. Spojka je element spojující dvě hřídele v jejich ose. Spojení může být provedeno tuhou (sešroubování dvou ocelových disků) nebo pružnou spojkou (ve spoji jsou vloženy pružné elementy tlumící torzní kmity a umožňující mírnou nesouosost). Při montáži je nezbytné uvažovat i teplotní roztažnost materiálů.

Úhlová nesouosost je charakterizována axiálními vibracemi, které jsou v protifázi. Obvykle bývají výrazné první a druhé harmonické, případně i třetí. Úhlová nesouosost může vybudit více harmonických násobků otáčkové frekvence. Úroveň harmonických klesá se vrůstajícími otáčkami.

Nesouosost posunutím (paralelní) se projevuje podobně jako předchozí, ale má výraznější projevy v radiálním směru. Vibrace jsou přes spojku posunuté o 180°. Složka druhé harmonické bývá častokrát větší než první. Při větších nesouosostech dochází ke generování amplitudových špiček i ve vyšších řádech.

2.1.3 Ukotvení

Kvalitní kotvení je základním předpokladem pro správný chod. Uvolnění může znamenat zvýšení vibrací. Odhalení občas bývá složitější, jelikož příznaky jsou podobné neuvývaze. Zjištění je možné zaměřením se na půlotáčkovou frekvenci.

3 Řádová analýza

Řádová analýza [10] [11] [12] se používá při diagnostice rotačních nebo periodicky pracujících strojů. Cílem je nalézt souvislost deterministických signálů a odstranit šum z okolí. "Řád" (order) v tomto smyslu je vybuzená frekvenční složka signálu, jejíž frekvence je určitým fixním násobkem základní frekvence stroje, kterou je například frekvence otáček nebo opakování vratných pohybů. [11] S měřením vibrací je zapotřebí měřit i otáčky. Rezonanční frekvence nejsou závislé na rychlosti otáček stroje. Často není možné signál přímo zpracovávat z důvodu kolísání otáček. Musí tedy dojít k převzorkování podle změny rychlosti.

3.1 Řádová spektra

Řádová spektra nejsou frekvenčně vázané grafy ale řádově. Horizontální osa je vyjádřena poměrově v "Order" (řád) na rozdíl od frekvenčních spekter, kde se užívá Hertz. Měření se provádí za provozu. V ideálním případě za naprosto konstantních otáček se naměřený signál převede z časové oblasti do frekvenční a vydělí se otáčkovou frekvencí. Reálné podmínky toto však málo kdy dovolí a je zapotřebí alespoň nepatrné korekce vzorkování. Pro svázání vzorků a otáček se používá těchto možností:

- násobička - Již staré nedokonalé řešení. Užívalo se fázového závěsu za signálem z tachosondy a frekvenční násobičky. Nevýhoda spočívala v pomalé odezvě na změnu otáček.
- enkoder - V případě možnosti připevnění na hřídel se jedná o skvělý zdroj triggerování. Jednu otáčku lze rozdělit na 2^n částí, kde n je rozlišení enkoderu.
- značka - Nelze-li jakkoli upevnit enkoder, vytvoří se na hřídeli nejčastěji optická značka. Vrožky jsou triggerovány softwarově stálou frekvencí a následně převzorkovány.

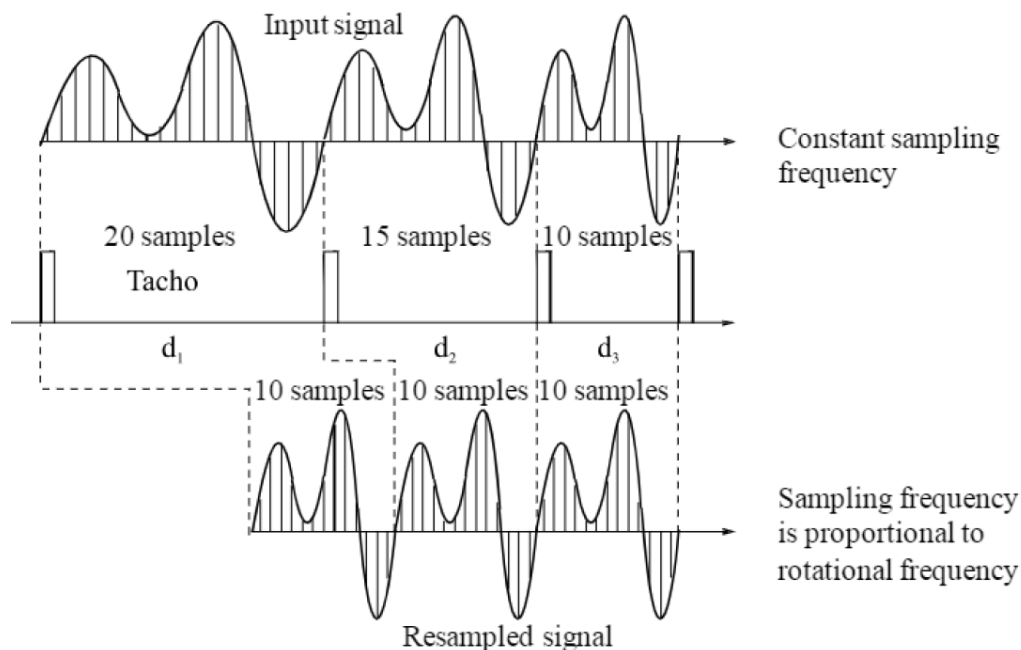
3.2 Rychlostní profil

Před započítáním převzorkování je nezbytné určit rychlostní profil. Ten se určuje pro zdroje s malým počtem pulzů na otáčku, které bývají doplněny o násobičku případně jsou vzorkovány konstantní frekvencí. Jedná se o časovou funkci frekvence otáčení.

Určení rychlostního profilu je možné i v případě, kdy nelze použít žádného ze způsobů detekce otočení. Slouží k tomu Bayesova metoda odhadu fundamentální frekvence. Metoda pracuje na předpokladu nalezení konkrétních řádů základní frekvence. Primární určení a následné roztrídění vzorků vyžaduje velký výpočetní výkon. Nelze použít pro kontinuálně běžící diagnostiku a není možné určit natočení hřídele.

3.3 Převzorkování signálu

Jak již bylo poznamenáno, pro řádovou analýzu je důležité zachování synchronního vzorkování s fází otáčení rotoru a zajištění konstantního počtu vzorků na otáčku. U softwarového triggeru toho nelze docílit. Převzorkování znamená interpolaci nových vzorků mezi původní vzorky.



Obr. 3.1: Převzorkování signálu [11]

Předpokladem přesné interpolace je zvýšený počet vzorků na takovou úroveň, aby byla splněna Shannon-Kotelnikova podmínka. Další zpřesnění lze docílit v postprocesingu zředěním (přidáním vzorků nulové hodnoty). Tento krok však změní frekvenční spektrum signálu. Obnovit jej lze použitím dolnoproústnou filtrací a výsledný signál váhovat koeficientem nadvzorkování pro zachování energie signálu. Poslední krok vyžaduje změnu vzorkování danou neceločíselným násobkem vzorkovací frekvence. K interpolaci se zvětšenou vzorkovací frekvencí již lze aplikovat Newtonův interpolační polynom.

Výsledku lze docílit i druhou metodou založenou na Fourierově transformacích. Zaznamenaný signál je převeden do frekvenční oblasti rychlou fourierovou transformací, kde dojde k rozšíření spektra nulami. Následně dochází ke zpětné transformaci. Výhodou této metody oproti interpolaci zředěním je zachování fáze signálu, jelikož odpadá potřeba filtrace. Má však i nevýhodu a to v nemožnosti použití pro online analýzu zapříčiněnou nenávazností po sobě jdoucích bloků.

3.4 Synchronní filtrace

Běžnou metodou, jak oddělit periodické signály fázově pevně spjaté s otáčkovou frekvencí stroje, je synchronní filtrace. Jde o průměrování několika segmentů signálu, kdy každý segment odpovídá právě jedné periodě (otáčce) rotoru. Vzhledem k tomu, že otáčky stroje nejsou během celé doby vzorkování konstantní, není toto vyjádření v praxi příliš vhodné. Mnohem výhodnější je průměrovat vzorky ne v časové oblasti, ale vztáhnout každý vzorek vzhledem k danému úhlu na rotoru. Toho je možné docílit hardwarově například za pomoci výstupu inkrementálního snímače jako vzorkovacího signálu pro sběr vibrací. To však většinou není možné, jelikož inkrementální snímač není standardní výbavou strojů a je tedy nutné navzorkovaný signál převzorkovat softwarově s použitím výstupu klasické tachosondy. Pokud je na vstupu synchronní filtrace dostatečný počet otáček, je výsledkem signál, ze kterého jsou odstraněny veškeré frekvence, které nejsou násobky základní otáčkové frekvence a nejsou s ní fázově spjaty. [12]

3.5 Krátkodobá Fourierova transformace STFT

Při analýze reálných signálů, které jsou většinou nestacionární a rozložení jejich energie se mění jak v závislosti na frekvenci tak na čase, není příliš vhodné použít klasickou diskrétní Fourierovu transformaci, jelikož jednou z podmínek, která musí být splněna při výpočtu spektra, je stacionární vstupní signál. Příkladem může být jednotkový impuls, který je ve frekvenční oblasti nerozlišitelný od šumu. Z tohoto důvodu je vhodné rozdělit signál na jednotlivé vzájemně se překrývající bloky. Pokud budou tyto bloky dostatečně krátké, lze je prohlásit za stacionární a je možné na jejich analýzu využít algoritmus FFT. Výsledný algoritmus se nazývá krátkodobá Fourierova transformace, zkr. STFT (Short Time Fourier Transform). [12]

3.6 Cepstrální analýza

Cepstrální analýza [13] je nástroj k nalezení skupin harmonických složek ve výkonové spektrální hustotě periodického a kvaziperiodického signálu. Může jít o vyšší harmonické složky některé ze základních frekvencí, případně o složky v postranních pásmech okolo nosné složky. Počet skupin složek může být velký a na první pohled těžce rozeznatelný od dominantních složek. Název cepstrum vzniklo záměnou prvních čtyř písmen anglického slova spectrum. Frekvenční osa (frequency) spektra se změnila podobným způsobem v quefreny s jednotkou času [s]. Kompletní seznam názvů je uveden v následující tabulce 3.1:

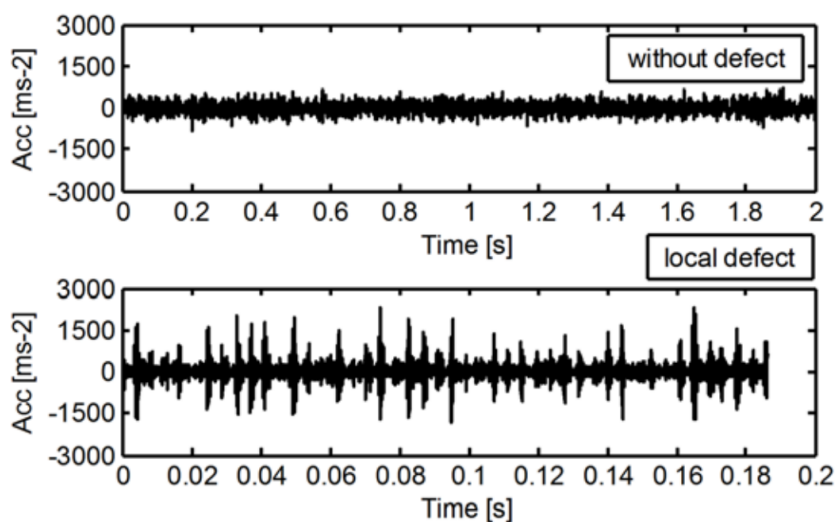
Frekvenční analýza	Cepstrální analýza
Spectrum	Cepstrum
Frequency	Quefreny
Harmonics	Rahmonics
Magnitude	Gamnitude
Phase	Saphe
Filter	Lifter
Low pass filter	Short pass lifter
High pass filter	Long pass lifter

Tab. 3.1: Přehledová tabulka názvů [13]

Řádový odstup hodnot harmonických složek snižuje logaritmus. První definice cepstra představovala druhou mocninu Fourierovy transformace logaritmu spektrální výkonové hustoty. Protože algoritmus přímé a inverzní DFT dává až na měřítko shodný výsledek, je nyní používána následující definice [13]:

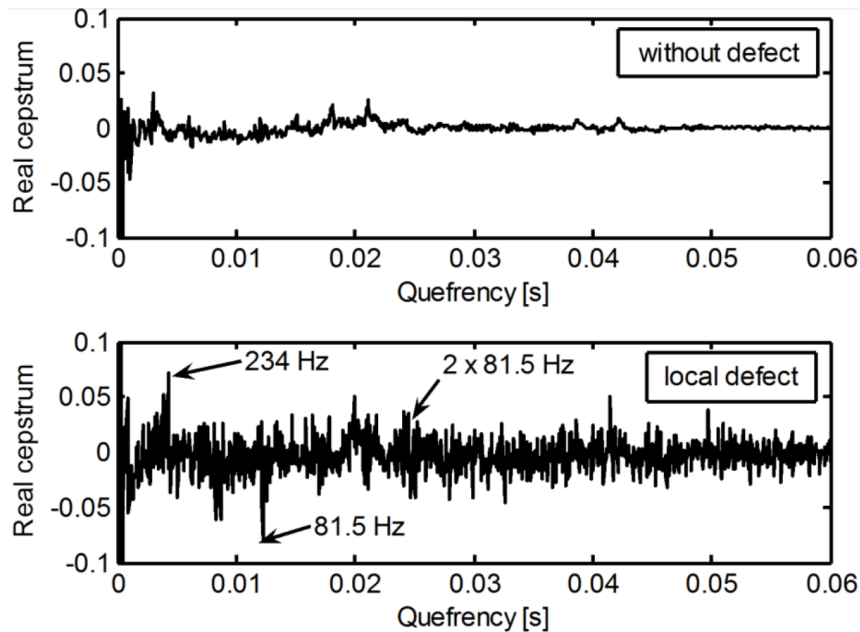
$$C(\tau) = F^{-1}\{\log S_x\} \quad (3.1)$$

Na ukázkou je analýza aplikovaná na diagnostiku uměle vytvořené závady na kuželovém ložisku. Měření bylo prováděno při 300 ot/min.



Obr. 3.2: Spektrum signálu ložiska [13]

Frekvenční spektrum z obou vibračních signálů je znázorněno na prvním obrázku. Vrchol o vysoké frekvenci ve spektru vibrací, která odpovídá strukturálním vibracím, ve spektru dominuje, zatímco složka spektra s opakovací frekvencí zámkitů se blíží



Obr. 3.3: Cepstrum signálu ložiska [13]

nule a není rozpoznatelná vzhledem ke své malé amplitudě. Rezonance zesílí skupinu buď harmonických složek, nebo postranních pásem, ale neexistuje žádný způsob frekvenční analýzy, jak určit přímo vzdálenost těchto spektrálních čar. Ani zoom spektrum tyto složky nedokáže odhalit, protože jsou „utopeny“ v šumu.[13]

Cepstrum obou signálů je na obrázku 3.3. Frekvence pro identifikaci defektu ložiska se rovná 234 Hz. Tato komponenta spektra se nachází v prvních pěti procentech kmitočtového rozsahu spektra. Cepstrum vibračního signálu vadného ložiska, je zřetelně odlišitelné od spektra vibračního signálu ložiska bez vad. [13]

Cepstrum je velmi užitečný nástroj pro detekci dlouhých periodických vln v diagnostických signálech, které jsou generovány zejména valivými ložisky. Cepstrum není použitelné pro kvantitativní posouzení závažnosti poruchy, ale rozhoduje o přítomnosti poruch.[13]

3.7 Projevy závad

Část závad, kterou je možné odhalit řádovou analýzou byla již popsána v kapitole 2 Provozní tvary kmitů. Zbylé závady je již lepší analyzovat vůči otáčkám stroje. Například u valivých ložisek dochází ke generování vysokých frekvencí, které by se mohly v metodě PTK jevit jako vysokofrekvenční šum.

3.7.1 Rezonance rotoru

Jakmile jsou otáčky rotoru blízké některé z jeho vlastních frekvencí, nastává jev zvaný rezonance. Takovým otáčkám se říká kritické otáčky. Vzhledem k tomu, že běžné ocelové konstrukce mají malé tlumení, je zvýšení amplitudy (zesílení) v okolí rezonance velmi vysoké (šestnácti až dvacetinásobně), zejména pro první vlastní frekvenci. To znamená, že i malá budící síla může mít na konstrukci destruktivní vliv. Proto je potřeba při návrhu stroj odladit tak, aby provozní budící frekvence byly dostatečně daleko od vlastních frekvencí. Např. u turbín se obvykle navrhuje konstrukce tak, aby provozní otáčky byly 70 % pod nebo alespoň 15 % nad kritickými otáčkami. První kritické otáčky jsou ty, kdy rotor kmitá první ohybovou vlastní frekvencí. [1]

3.7.2 Kluzná ložiska

Ložiska rozdělujeme dle několika konstrukcí a to zejména na kluzná a valivá. Kluzná již z názvu naznačují princip funkce. Ložisko nemá žádnou pohyblivou část. Vyrábí se mazaná ložiska (potřeba vtlačet olej a vytvářet tak kluzný film), ale také ložiska (malá) z kluzných materiálů co mazání nepotřebují (nedosahují však takových parametrů). Opotřebením vzniká v ložisku vůle zapříčiňující zvýšené vibrace. Ve spektru absolutních vibrací se závada projeví nárustem harmonických násobků.

3.7.3 Valivá ložiska

Valivá ložiska již obsahují pohyblivé elementy. Vnitřní kroužek se otáčí vůči vnějšímu. Závady na tomto typu ložiska jsou především ve vzniku vrypů nebo prasknutí klece. Vryp bývá způsoben vnikem nečistot, nebo rozpadu unaveného materiálu ložiska (tzv. pitting). Míra poškození se dělí dle čtyř kategorií. Z počátku se závada projeví vybuzením frekvence 250 Hz až 350 kHz a postupně klesá na desítky kilohertz což již lze detekovat ultrazvukovou technikou. Větší vrypy již budí vlastní frekvence komponent ložiska (500 Hz až 2 kHz). V třetí kategorii se objevují frekvence ložiskových závad a jejich harmonické násobky. Narůstá také počet postranních pásem. Ke konci životnosti již dochází z ovlivňování amplitudy otáčkové složky. Diskrétní frekvence ložiskových vad i vlastní frekvence ložiska začínají mizet a nahradí je širokopásmový šum.

4 Praktická část diplomové práce

Prvním krokem praktické části diplomové práce bylo seznámení se s demo kitem firmy Brüel & Kjaer dodaným skrze českého distributora SVMTech s.r.o. Následná etapa již spočívala v návrhu konstrukce pro zavěšení měřených objektů a vytvoření tak možnosti budít měřené struktury též vibračním budičem. Poté již bylo možné provádět veškerá žadaná měření. Po vyzkoušení komerčních programů pro měření modální analýzy bylo na řadě vytvořit vlastní měřicí software, umožňující zjednodušení měřicího postupu a export dat pro vizualizaci naměřených dat v programech ModalVIEW a BK Connect, což jsou komerční a poměrně složité softwary pro EMA.

4.1 Brüel & Kjaer demo kit

Demo kit WU 0588 se skládá ze dvou hliníkových plátů, dvou motorů s možností připevnění nevyvahy a ovládacího panelu otáček pohonů. Sestava tak v základu tak umožňuje provádět identifikaci provozních tvarů kmitů a řádovou analýzu. Po domluvě s vedoucím diplomové práce byla práce cílena na realizaci EMA. Testovací sada se rozšířila o modální kladívko Endevco 2302-5 a elektrodynamický budič BK 4809.

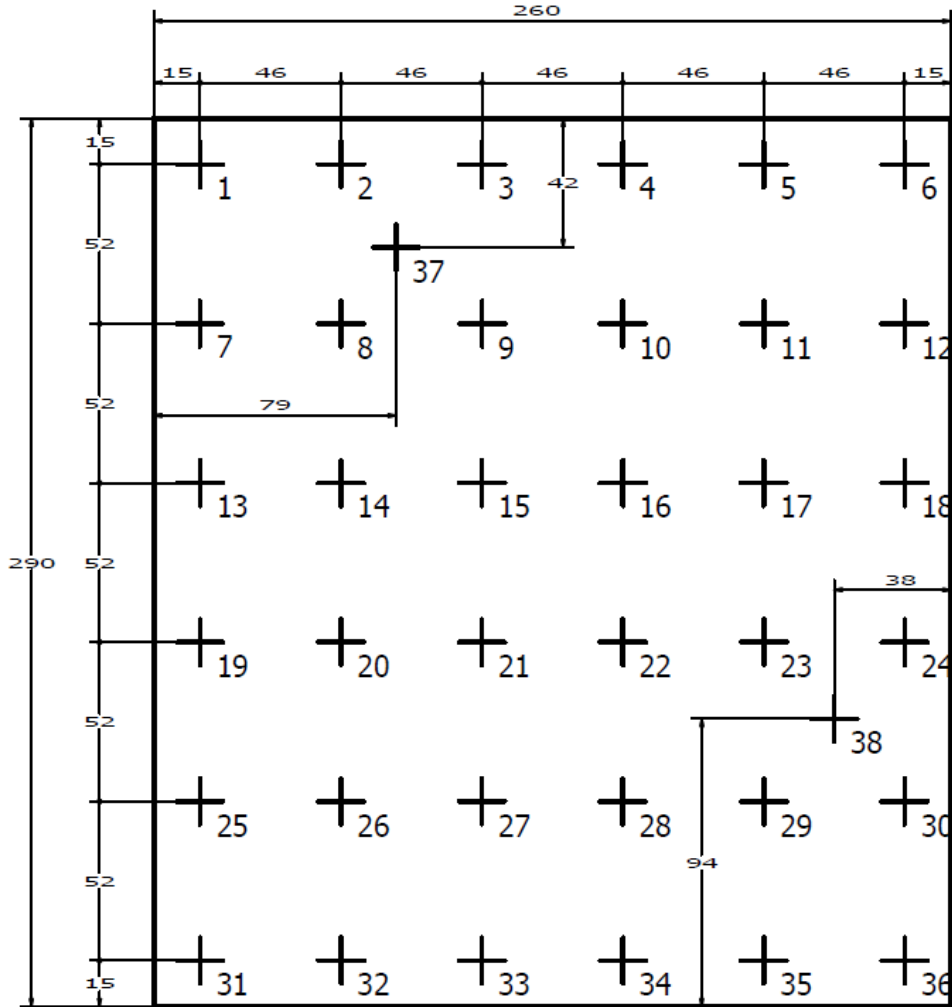
4.1.1 Hliníkové pláty

Jedná se o dva kusy hliníkových plátů s označením SP 008 délky 290 mm, šířky 260 mm, síly 8,22 a 10,24 mm, váhy 1678 g a 2090 g. Pláty jsou opatřeny ochranným nástříkem. Zároveň je zde vyfrézováno i třicet osm očíslovaných křížů viz. obrázek 4.1.

4.2 EMA rázové buzení

Hliníkové pláty byly podrobeny modální zkoušce. S ohledem na počáteční zkušenosti a omezené vybavení bylo užito jednoho akcelerometru trvale umístěného v bodě 37 viz. obrázek 4.1 a buzení bylo realizováno modálním kladívkem s plastovým hrotem. Připevnění akcelerometru se realizovalo přilepením oboustrannou transférovou lepicí páskou 3M 468MP. Uložení volné, plát byl umístěn na akustickém členitém molitanu. Seznam užitého vybavení je v tabulce 4.1

K měření a vyhodnocení bylo užito programu ModalVIEW. Měření probíhalo ve všech bodech včetně bodu číslo 37, který byl vybuzen v osově převrácených souřadnicích. V každém bodě došlo ke třem budícím úderům a jejich zprůměrování. Zprůměrování omezilo vliv rušení a možnou odchylku vybuzení. Část měřicích bodů



Obr. 4.1: Zobrazení okótovaného plátu

vycházela do blízkosti uzlových bodů a příspěvky rezonančních frekvencí byly relativně malé, ale i přesto identifikovatelné. Po sečtení příspěvků ze všech měření bylo snadné nalézt rezonanční frekvence ve spektrech jednotlivých bodů a to i na vyšších frekvencích. Poblíž desetinásobku rezonanční frekvence prvního módu již bylo spektrum poměrně zašuměné a hůře čitelné. V následující tabulce 4.2 je zobrazeno prvních osmnáct rezonančních frekvencí. První sloupec frekvencí f_a náleží tenčí desce, druhý f_b tlustší. Zbylá data z měření jsou v příloze.

Toto měření bylo užito jako referenční pro další experimenty. Následně se provedlo měření se snímači KD91, které bylo plánováno užít při dalších experimentech. Rozdíl mezi měřeními byl zanedbatelný.

Přístroj	Typ	IČ/VČ	Poznámky
Modální kladívko	Endevco 2302-5	2491	plastový hrot
Akcelerometr PCB	352C03	LW171389	fr > 50 kHz
Měřicí karta	NI 9234	17F1982	4xAI; 51,2 kS/s/Ch

Tab. 4.1: Vybavení pro referenční EMA plátů

Mód	f_a [Hz]	f_b [Hz]
1	343,1	430,6
2	501,3	623,1
3	687,5	861,2
4	865,5	1082
5	942,1	1177
6	1473	1833
7	1638	2045
8	1742	2165
9	1817	2264
10	2110	2629
11	2636	3279
12	2792	3471
13	2848	3527
14	3171	3929
15	3536	4388
16	3760	4662
17	3903	4845
18	4012	4968

Tab. 4.2: Rezonanční frekvence plátů (f_a -tenčí, f_b -tlustší)

4.3 Konstrukce pro volné uložení

Součástí práce bylo i vytvoření konstrukce pro zavěšení objektu. Tento typ volného uložení byl zvolen z důvodu použití elektrodynamického budiče jako druhé možnosti k buzení. Součástí návrhu bylo i nalezení vhodného závěsu a uchycení k měřenému objektu.

4.3.1 Konstrukce

Velikost konstrukce se odvíjela dle užitých komponent. První určující rozměr byla výška sestavy elektrodynamického budiče, budičí tyčinky, snímače síly a samotného

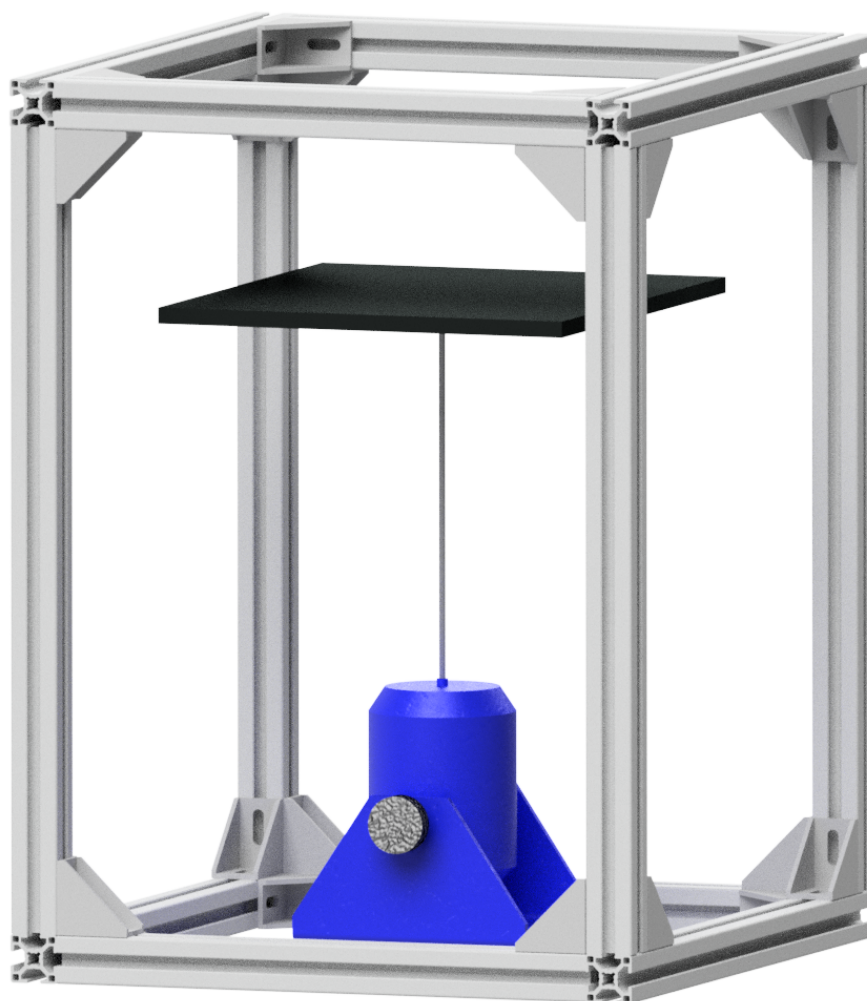
hliníkového plátu. Průměrná výška vytipovaných elektrodynamických budičů činila přibližně 170 mm, délka modální tyčinky činila 230 mm a snímač síly s montážní podložkou přibližně 20 mm. V součtu se sestava pohybuje okolo 420 mm dle délky zašroubování závitu. Délka závěsu již byl poslední parametr určující výšku konstrukce. Jako dostatečná a zároveň ne příliš velká délka se jevila čtvrtina celkové výšky konstrukce, čili necelých 150 mm. Celková výška konstrukce se tím vyšplhala na 550 mm. Rozměr půdorysu určoval měřený objekt. Aby byla zajištěna jeho stabilita a zároveň nebyl snížen stupeň volnosti (rotace okolo svislé osy) bylo ponecháno podél delší hrany plátu 40 mm, které následně ještě zmenšily oka pro zavěšení o 15 mm. Při použití aloxovaných hliníkových profilů rozměrů 30x30 mm činil vnější rozměr podstavy 430 na 400 mm. V tabulce 4.3 je sepsán použitý materiál. Následuje vizualizace sestavy na obrázku 4.2 a fotografie na obrázku A.2. Fotografie celého pracoviště je na obrázku A.1. Výkres pro sestavení je součástí příloh.

Prvek	Rozměr [mm]	Počet kusů
Al stojka 30x30	340	4
Al stojka 30x30	430	4
Al stojka 30x30	490	4
Spojka úhlová 30	-	24
Šroub imbus M6	12	48
Matice kladívková M6	-	48
Šroub M6 s okem	25	4
Matice M6 obdélníková	-	4

Tab. 4.3: Soupiska materiálu pro konstrukci

4.3.2 Zavěšení

Zavěšení bylo provedeno na oka šroubů na horním rámu konstrukce z vnitřní strany delších profilů. Upevnění plátu bylo mírně komplikované, jelikož byl požadavek na neponičení plátu. Nezbyvala tedy jiná možnost, než plát upevnit ze spodní strany. Upevnění bylo realizováno nalepovacími kabelovými příchytkami s pěnovou nalepovací vrstvou. Z předchozích měření na molitanové podložce bylo známo umístění kmiten a uzlů jednotlivých módů. Nejvhodnější umístění pro nalepení bylo přibližně 6,2 cm od delší a 6,8 cm od kratší strany v každém z rohů. V tomto stavu již byl plát schopen udžet na závěsech, avšak se závěs opíral o hrany, které byly zároveň kmitnami. Pro odstranění tohoto ovlivnění se ke kabelovým příchytkám připevnila hliníková trubička, která přesahovala 5 mm na stranách plátu. Trubička byla volena,



Obr. 4.2: Vizualizace konstrukce

tak aby svou váhou minimálně ovlivnila zavěšení, zároveň však nebyla příliš slabá, aby docházelo k deformacím při buzení.

Po sestavení bylo na řadě odzkoušení vybraných závěsů a porovnání s molitanovou podložkou. Pro závěs bylo zvoleno pružné lano silné 8 mm s gumovým jádrem, dále pak provázek 3 mm silný s částí elastických vláken a jako poslední pevné tenké lanko. Při měření na závěsu byly nastaveny totožné podmínky pro možnost porovnání. Bylo tedy užito stejného budícího i měřícího vybavení, jako u molitanové podložky včetně stejných bodů měření a buzení. V první řadě se zkoumalo, zda-li nejsou nová data jakkoli ovlivněna upevněním. Obavy z možného ovlivnění se neprojeví, módy zůstaly na stejných frekvencích. Drobné odchylky jsou způsobeny spíše nepřesností měření a interpolace při hledání módů kmitání. Dle dat z tabulky 4.4 by se mohlo jevit, že snad nezáleží na který závěs se plát zavěsí. Při porovnání spekter však lze odhalit jisté výhody a nevýhody jednotlivých uložení. Možná překvapivě, ale nejlépe z porovnání vyšla molitanová podložka. Všechny módy byly jasně rozeznatelné

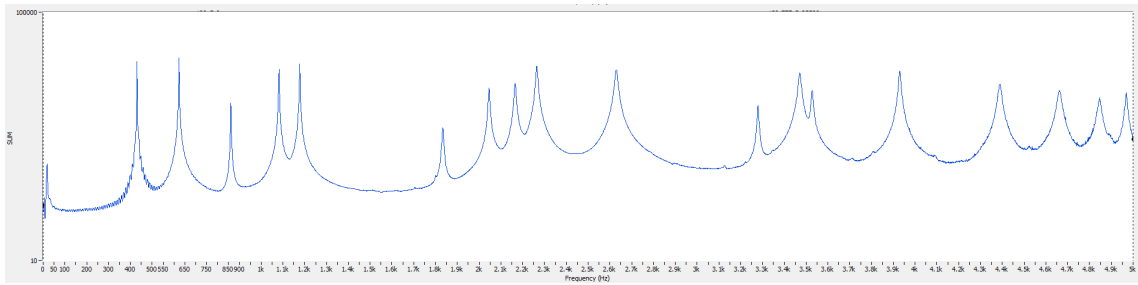
a spektrum bylo do 6 kHz nejméně zašuměné. Spektra závěsů byla mírně zašuměná (mohlo být způsobeno špatným upevněním kabelů) avšak také velmi dobře čitelná. Snímky spekter s rozsahy 0 az 5 kHz je možné vidět na obrázcích 4.3, 4.4, 4.5, 4.6. Pouze u silného lana s gumovým jádrem došlo k utlumení nultého módu. Následné módy již nebyly ovlivněny. Jistou výhodou v podobě výraznějších rezonančních frekvencí módů projevily závěsy. Na závěsech rezonanční frekvence doznávaly delší dobu a více se tedy projevily ve spektru. Pro experimentální modální analýzu prováděnou s pomocí modálního kladívka není rozhodující, které zavěšení, či podložku si uživatel vybere, pokud není cílem zkoumat vlastnosti v užším pásmu, které je daným upevněním ovlivněno. Pro měření s elektrodynamickým budičem je však vhodnější sáhnout po gumovém laně, které nejlépe zamezí přenesení vibrací při kontinuálním buzení. Pružný provaz již byl na mezi, kdy ještě působily pružná vlákna a kdy již začínala působit tuhá vlákna. V případě měření výkonového spektra v okolí nultého módu by již bylo nezbytné nalezení vhodnějšího závěsu než zmíněné gumové lano.

Mód	Molitan [Hz]	Gum. lano [Hz]	Pružný provaz [Hz]	Tuhé lanko [Hz]
0	431	430	422	421
1	623	625	624	624
2	861	862	861	862
3	1082	1084	1084	1084
4	1177	1180	1179	1179
5	1834	1837	1836	1837
6	2046	2047	2045	2047
7	2165	2168	2167	2168
8	2265	2271	2271	2271
9	2629	2639	2637	2638
10	3279	3282	3279	3282
11	3471	3475	3470	3474
12	3528	3530	3526	3529
13	3930	3932	3933	3931

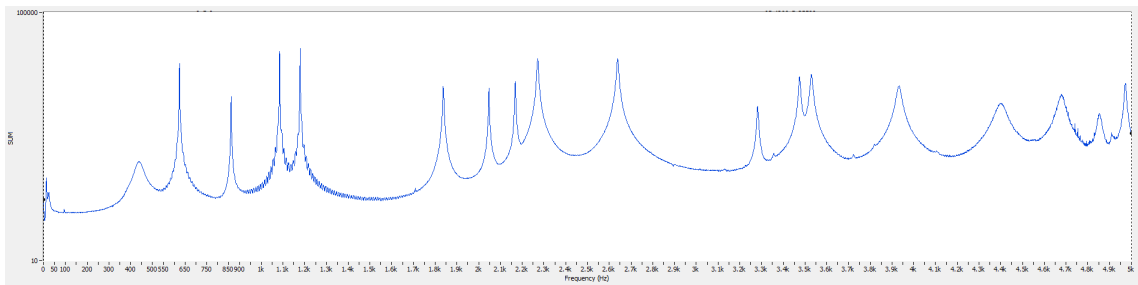
Tab. 4.4: Porovnání nalezených módů při různých závěsech

Přístroj	Typ	IČ/VČ	Poznámky
Modální kladívko	Endevco 2302-5	2491	plastový hrot
Akcelerometr	KD91	0280	fr > 50 kHz
Měřicí karta	NI 9234	17F1982	4xAI; 51,2 kS/s/Ch

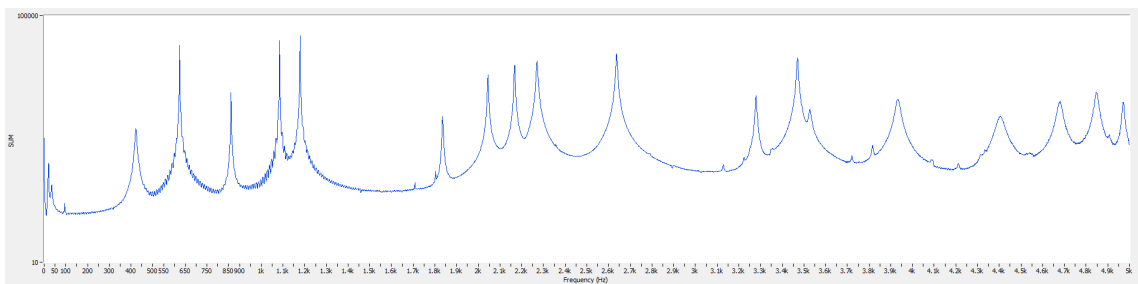
Tab. 4.5: Vybavení pro EMA plátu upevněného na závěsech



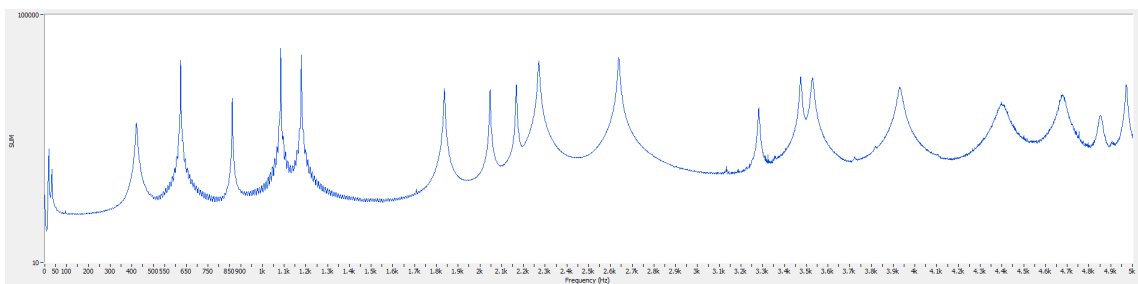
Obr. 4.3: Molitanová podložka



Obr. 4.4: Gumové lano 8 mm



Obr. 4.5: Pružný provázek

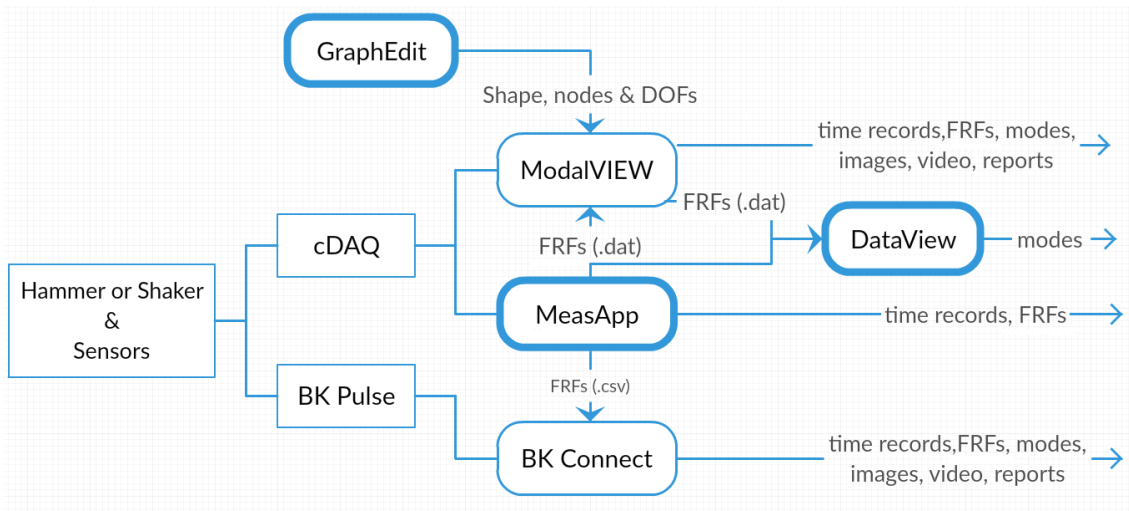


Obr. 4.6: Tuhé lanko

4.4 Vlastní řešení

Náplní vlastního řešení bylo vytvořit jednoduchý software, který dokáže provést měření, vytvořit frekvenční spektra a umožnit uživateli vyhodnocení měření vlastním

softwarovým nástrojem, nebo některým jiným používaným. Umístění programů v měřicím řetězci ilustruje diagram na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Diagram měřicího řetězce

Zdrojové kódy spolu se spouštěcími soubory jsou součástí CD přílohy. Vývoj probíhal v LabVIEW 2017 SP1 (64-bit). Pro spuštění bude zapotřebí stejné, nebo novější verze LabVIEW či Run-Time.

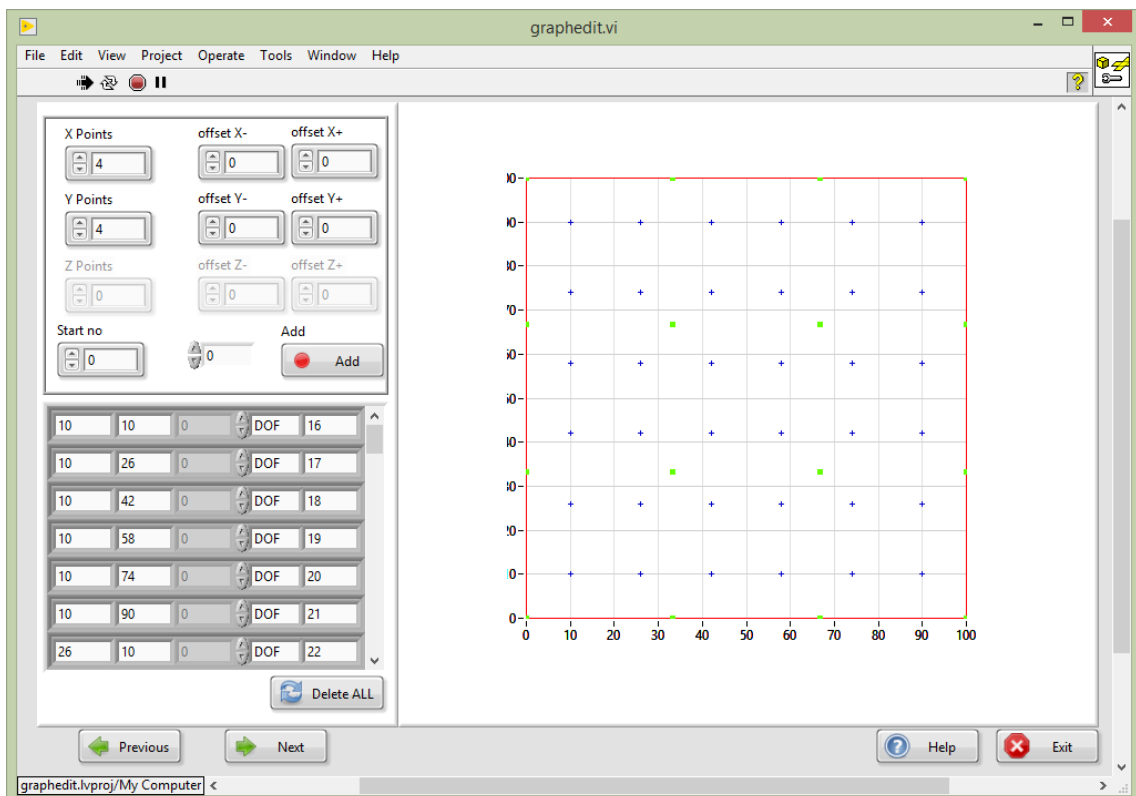
4.4.1 Program pro kreslení struktury GraphEdit

Tento program vznikl iniciací zjednodušit kreslení měřenému objektu. Po zkušenostech z ModalVIEW a později i BK Connect, které jsou pro neproškolenou osobu poměrně komplikované, došlo k rozhodnutí vytvořit vlastní maximálně uživatelsky přívětivou aplikaci. Vznikla tak aplikace GraphEdit do jisté míry nahrazující Graphical Editor z programu ModalVIEW.

Kreslení je omezeno na čáru a obdélník. Čáru lze použít při měření úzkého nosníku, kdy jsou měřicí body umístěny v jedné rovině. Obdélník, nebo také čtverec lze použít jak na širší nosníky, tak na plechy, nebo silnější profily.

Uživatelské prostředí se skládá ze čtyř ovládacích obrazovek, mezi kterými se přechází tlačítky *Next* a *Previous*. K těmto obrazovkám jsou svázány další dvě, které se automaticky přepínají. Po spuštění programu se zobrazí první obrazovka na které je možné určit pouze tvar objektu. Zároveň se také zobrazí pravá obrazovka se základními informacemi. Na následující obrazovce již může uživatel nastavit rozměry objektu. Dle tvaru je mu umožněno nastavení velikosti v jednom směru, nebo ve dvou. S druhou ovládací obrazovkou se také zobrazí druhá zobrazovací obrazovka, na které je možno vidět změnu velikosti při zadávání. Třetí obrazovka viz. obrázek 4.8 je již určena pro zadávání bodů. Může se jednat o obyčejný bod, který nebude

součástí měření, nebo měřicí bod (DOF) ve kterém dojde k měření. Body lze vkládat jednotlivě vyplňováním tabulky, nebo díky hornímu panelu hromadně. Lze nastavit počet bodů vložených na osy, následně zvolit, zdali body budou začínat a končit na okraji obrazce, nebo budou vzdáleny (ovladače *offset*). Pokud již uživatel zvolil typ bodu, stačí už jen vybrat od jakého čísla se budou body číslovat a zmáčknout tlačítko *Add*. Body se okamžitě zobrazí v tabulce a na pravém displeji. Oprava je možná přepsáním v tabulce, nebo vymazáním veškerých bodů a opětovnou definicí. Postup krok za krokem je také popsán v nápovědě, kterou lze vyvolat zmáčknutím tlačítka *Help*.



Obr. 4.8: Program GraphEdit

Závěrečná čtvrtá obrazovka již slouží k ukládání dat. Obsahuje ovladač pro nastavení adresáře, volbu formátu ukládání a tlačítko na potvrzení. V případě nezadání adresáře se soubor uloží do adresáře aplikace. Název je generován automaticky ve formátu: tvar_rozměr_datum_čas. Formát TXT a XML obsahují pouze informace o tvaru, rozměrech, počtu bodů a informace z tabulky o jednotlivých bodech. Formát TXT ModalVIEW je již komplikovanější. Je nezbytné vygenerovat soupisku bodů, propoje mezi sousedními body, plochy a směry působení sil.

Struktura programu se skládá z jedné *While* smyčky obsahující *Event* strukturu. Tato struktura byla zvolena z důvodu jednoduchosti, přehlednosti a omezení správy

fronty a druhé *While* smyčky. Množství výpočtů není velké, tak aby uživatele omezilo v práci, nebo došlo k překročení časového limitu smyčky. Další obsáhlejší programy jsou již řešeny zmíněnými frontami a větším množstvím *While* smyček. Správa uživatelského rozhraní je skrze vyvolávání záložek *Tab Control*. Postupným zadáváním hodnot se skrze *Property Node* mění omezení dalších ovládacích prvků.

Důležitou součástí je ukládání. Pro přehlednost a neztvrdění hlavního kódu, je vytvořeno *Sub VI* "Save to format" do kterého jsou přivedeny veškeré potřebné proměnné. Pokud je požadavkem standardní uložení, provede se pouze naformátování a zápis do souboru. V případě ukládání formátu pro ModalVIEW, je vyvolána složitější sekvence obsahující dvě další *Sub VI*, které naleznou spojení mezi sousedními body a druhé za pomoci zmíněných spojnic plochy.

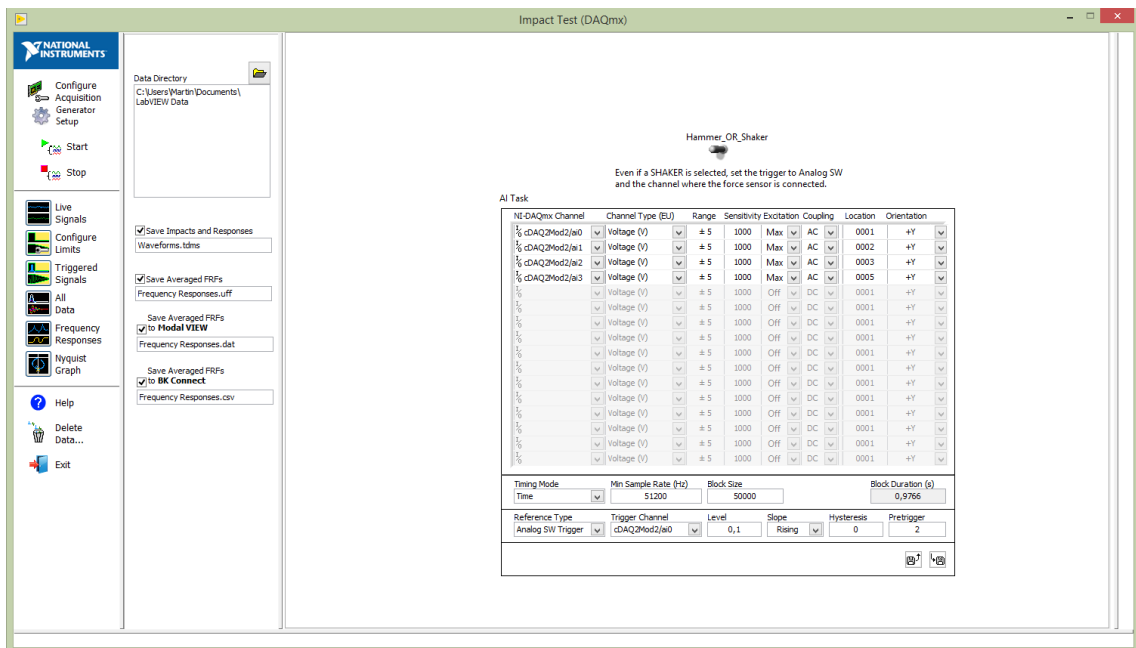
4.4.2 Měřicí program MeasApp

Měřicí program MeasApp je hlavní částí praktické části práce. Program slouží k záznamu, zpracování a vyhodnocení dat získaných z měřicí techniky. Řešení je postaveno na ukázkovém programu "Impact Test (DAQmx)". Tato struktura nejvíce vyhovovala potřebám. Některé části bylo možné použít beze změny, u jiných došlo k modifikaci a část bylo potřeba vytvořit.

Aplikace umožňuje měření s rázovým buzením kladívkem, ale i kontinuálním s pomocí elektrodynamického budiče. Počet vstupních kanálů je aktuálně omezen na šestnáct, což umožňuje kompletně využít jednotku NI cDAQ-9174 se čtyřmi sloty a měřicími kartami NI 9234 se čtyřmi analogovými vstupy. Omezení není definitivní, lze upravit změnou velikosti konfiguračního ovladače, nebo přidání postranního slideru. Výstupní kanál je povolen pouze jeden.

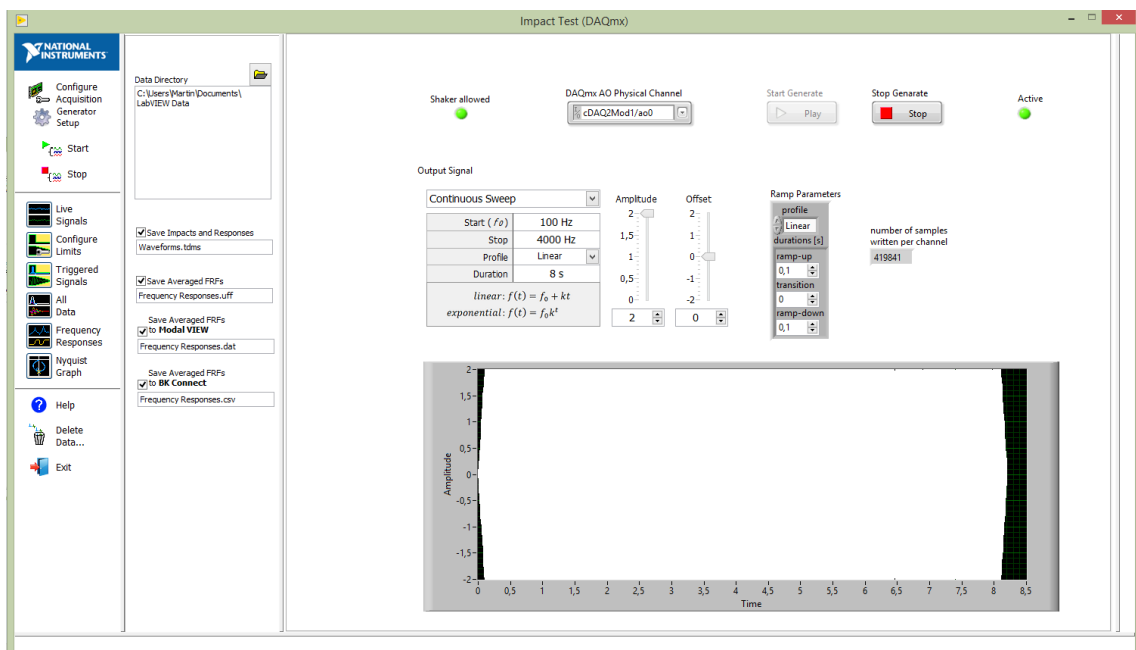
Úvodní obrazovka uživatelského prostředí viz. obrázek 4.9 zároveň slouží jako konfigurační pro nastavení ukládání dat a zároveň pro nastavení analogových vstupů a triggeru. Ukládat lze časové záznamy do TDMS pro přenos dat v rámci LabVIEW a formátu CSV pro přenos do BK Connect. Frekvenční spektra jsou ukládána do UFF taktéž používaného pro přenos v rámci LabVIEW a DAT pro export do ModalVIEW. Přidávání vstupních kanálů se provádí postupným vyplňováním tabulky. Součástí nastavení vstupů je i nastavení vzorkování a triggeru, a to i v případě použití budiče. Vzorkovací frekvence je používána i pro analogový výstup. Při aktivním budiči naopak dochází k nastavení počtu zaznamenaných vzorků dle délky budícího signálu. Pro měření za pomoci modálního kladívka je nezbytné nastavit veškeré parametry triggeru. Při měření s elektrodynamickým budičem stačí jen vybrat kanál na kterém je připojen snímač síly.

Aktivací přepínače *Hammer_or_Shaker* na úvodní obrazovce dojde k zobrazení nastavení výstupního kanálu viz. obrázek 4.10. Zde je možná volba výstupního



Obr. 4.9: Program MeasApp - konfigurace analogových vstupů

kanálu, výběr typu signálu a jeho parametrů. Zároveň je možné provést testovací buzení jednak pro zobrazení výstupního signálu, tak pro nastavení výkonu zesilovače. V případě spuštění měření se výstup sám automaticky aktivuje.

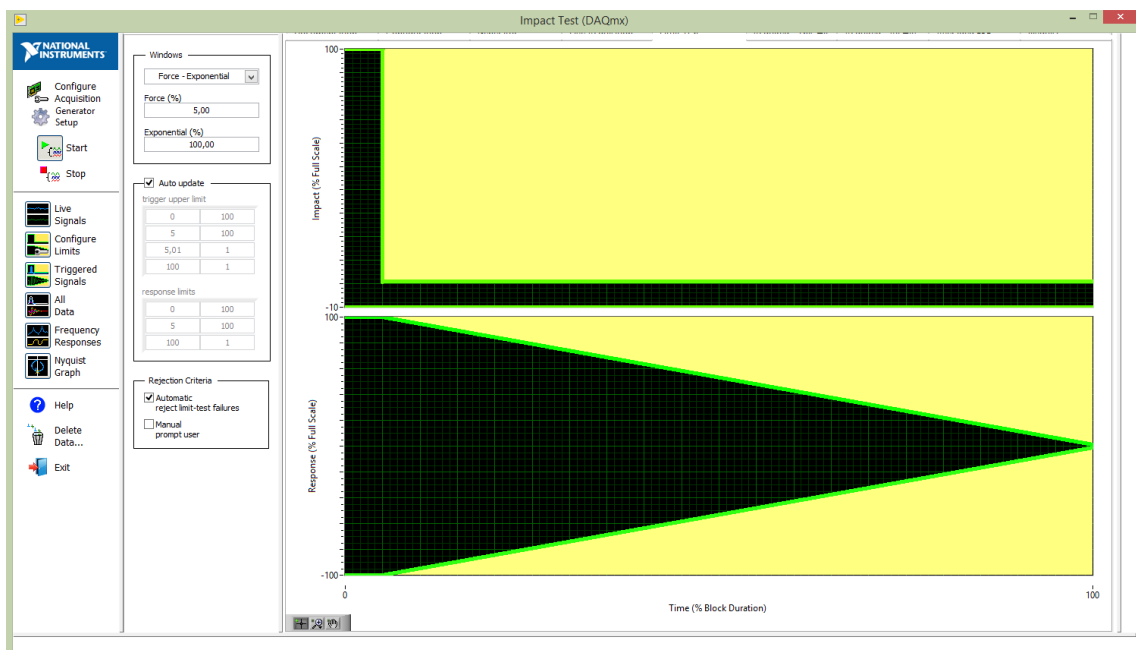


Obr. 4.10: Program MeasApp - konfigurace analogového výstupu

Mezi zmíněnými i zbylými okny lze přepínat tlačítky v levém sloupci. Prostřední

i pravé okno mají několik možností zobrazení. Pravé okno generuje pro každé tlačítko unikátní zobrazení, prostřední má méně podob, které jsou pro jisté tlačítka společné.

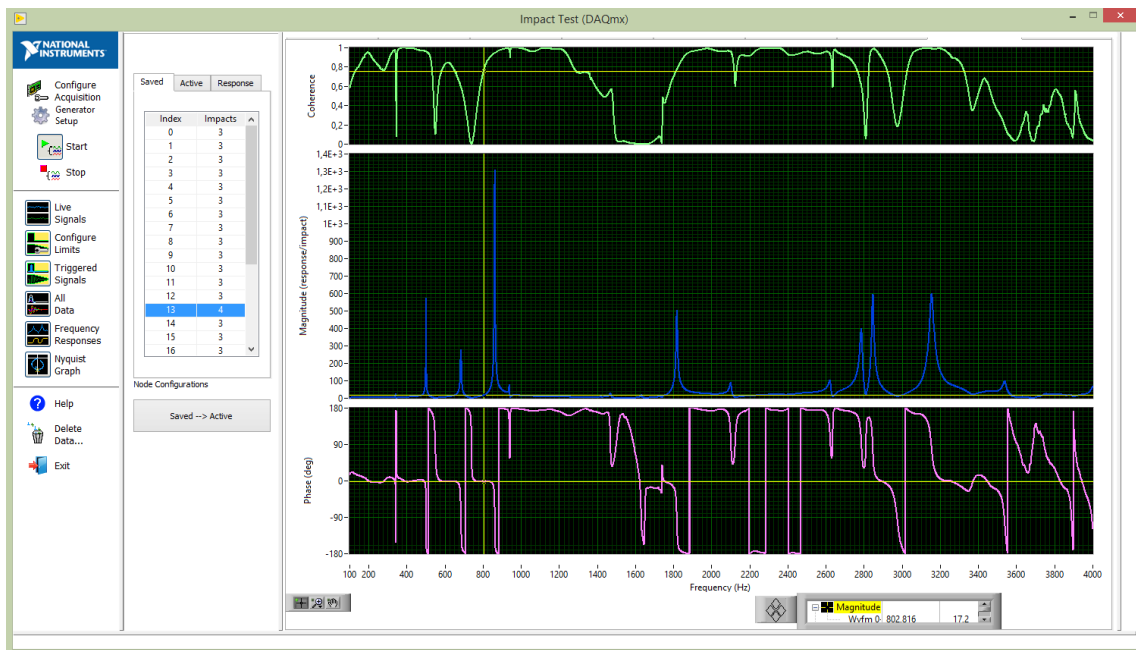
Dalším stěžejním krokem při měření je nastavení limitů. Do této nabídky je možné se dostat tlačítkem *Configure Limits*. Střední okno nabídne možnost úpravy doporučeného nastavení limitů a pravé okno již slouží k vizualizaci. Tyto hranice jsou následně automaticky hlídány, pokud uživatel nezvolí jinak. Překročení limitů zamezí zapsání posledního měření. Uznávat správnost měření má možnost provádět i sám uživatel. Na obrázku 4.11 lze vidět konkrétní nastavení limitů pro buzení modálním kladívkem.



Obr. 4.11: Program MeasApp - konfigurace limitních hodnot vstupních signálů

Po nastavení a kontrole zmíněných ovladačů lze začít s měřením. Spouští se tlačítkem *Start* v horní části levé obrazovky. Následně se zobrazí v pravé obrazovce podobné grafy s limity, kde se budou vykreslovat záznamy. Střední obrazovka indikuje umístění referenčního snímače, zbylých snímačů a počet měření s danou konfigurací bodů. Po dokončení měření je vhodné zastavit měření, vrátit se do konfigurace vstupů, změnit umístění snímačů, vrátit se nazpět a znovu spustit měření. Při měření s budičem je zapotřebí stisknout ukončení měření před dokončením finálního cyklu, jelikož vždy dochází k dokončení měření.

Zbylé tři tlačítka již slouží k zobrazení výsledků. Záložka *All Data* zobrazuje časové záznamy měření. Záložka *Frequency Responses* pak koherenci, spektrum a fázi. Pravou obrazovku mají odlišnou, avšak prostření společnou. Na středové obrazovce se nachází volba zobrazené skupiny měření ze které lze v záložce *Response* vybrat konkrétní měření.



Obr. 4.12: Program MeasApp - zobrazení spekter zaznamenaných měření

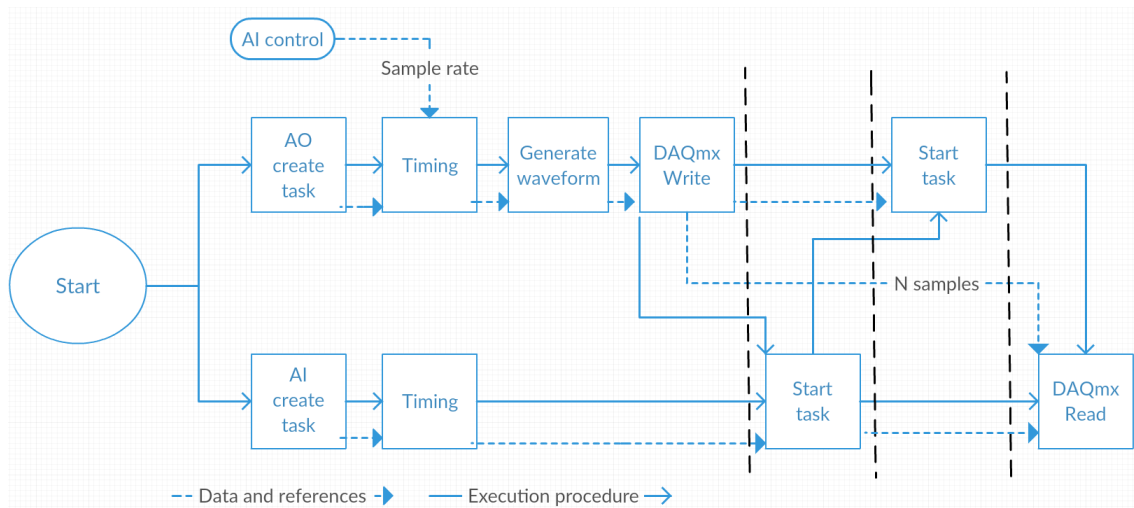
Řízení chodu programu je rozděleno do několika sekcí. Na úplném začátku stojí inicializační sekvence, která se stará jak o nastavení grafického prostředí, vytvoření front, tak i o reference. Fronty jsou nadefinovány čtyři. Jedna pracuje s naměřenými daty, zbylé tři se starají o řízení pracovních smyček.

Po vykonání inicializace již dochází ke spuštění čtyř paralelně běžících smyček zajišťující chod. První ze smyček se stará o rozhraní uživatel-stroj (UI - user interface) a řídí chod programu. Obsažená *Event* struktura reaguje na úkony uživatele a vyvolává odpovídající reakce. Kontrolovaných událostí je dvacet z čehož část reaguje na více ovladačů. Mimo nastavování proměnných, úpravy grafického prostředí zde dochází k plnění všech front řízení.

Druhá smyčka v pořadí *DAQ AI* zajišťuje správu analogových vstupů. Řízena je frontou *DAQmx_AI_State*. Case struktura obsahuje stavy *Default*, *Start*, *Read Imp*, *Read Sha*, *Stop* a *Clear*. V klidovém stavu se struktura nachází ve stavu *Default* a nic se nevykonává. Pokud však dojde požadavek na započítí měření, spustí se sekvence úkonů. Nejprve dochází k aktivaci *Start* stavu ve kterém dochází k vytvoření úkolu (*Task*) pro měření. Dochází zde také k rozhodování, zda se spustí měření rázovým kladívkem, nebo elektrodynamickým budičem. Je-li zvolena varianta měření s budičem, spustí se sekvence současného spuštění jak analogových vstupů, tak výstupu, která posléze přechází do stavu *Read Sha*. O této variantě bude pojednáno později. Pokud nenastala žádná chyba, která by sekvenci ukončila, přechází se do stavu *Read Imp*, kde je spuštěno měření. Je zde také realizován softwarový trigger, který po detekci impulsu zapíše časový průběh do datové fronty. Dokud nedojde

k požadavku ze strany uživatele, tak struktura zůstává v tomto stavu. *Stop* stav ukončuje měření a vyprazdňuje frontu. V případě, že by se však ve frontě nacházel nový požadavek na spuštění, začne sekvence od začátku, jinak přechází do stavu *Default*. Poslední stav *Clear*, který je aktivován ukončením programu, vyprázdní a smaže frontu *DAQmx_AI_State*, ukončí úlohy (*Stop Task*) a provede ukončení *while* smyčky.

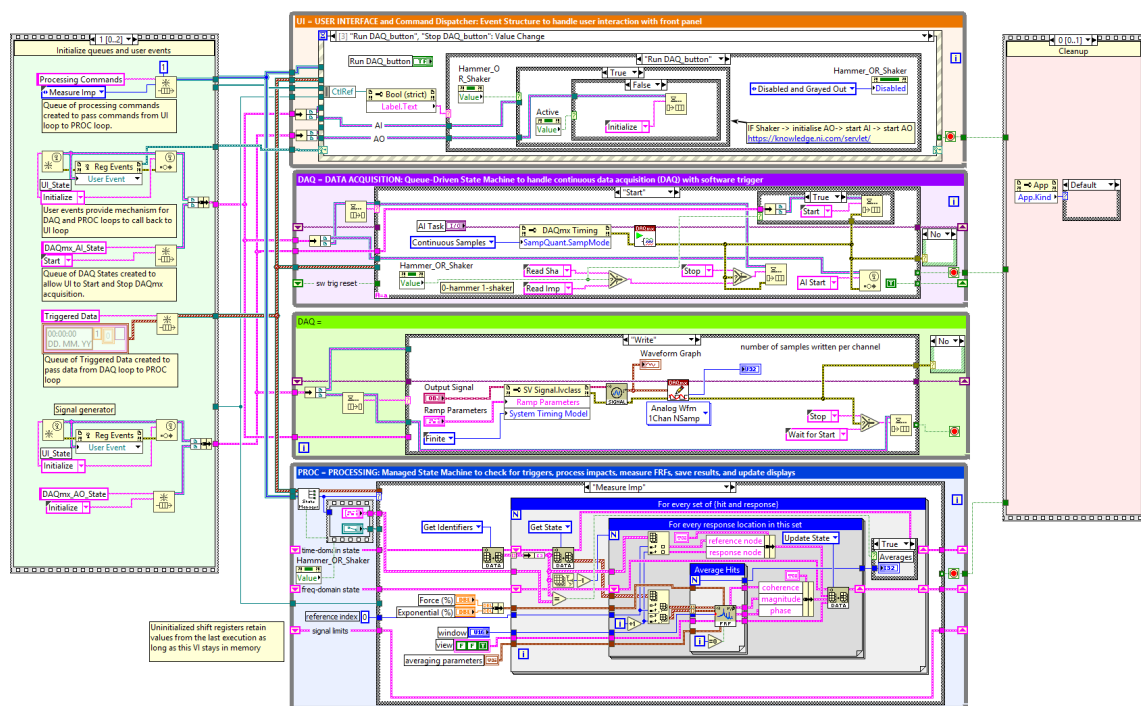
Třetí *While* smyčka se stará o správu analogového výstupu. Podobně, jako u předchozí má vlastní frontu *DAQmx_AO_State*. Standardně by řídicí sekvence obsahovala jen několik málo stavů, ale jelikož je zapotřebí při měření současného započítání, má stavů více. Sekvence začíná v okamžiku testovacího spuštění budiče, nebo již samotného měření. Do stavu *Initialize* se přechází se stavu *Default*. Zde dochází k nastavení kanálu a časování, které se nastavuje na stejnou hodnotu, jako analogové vstupy. Dalším krokem sekvence je vygenerování nadefinovaného průběhu a jeho zápisu do úlohy (nastavení výstupu). Po ukončení stavu *Write* sekvence přejde do stavu *Wait for Start*, kde se v případě testovacího spuštění pokračuje do dalšího stavu, jinak dochází k zápisu požadavku na spuštění sekvence analogového vstupu. Po vykonání spuštění analogového vstupu dochází ve smyčce *DAQmx AI* k nastavení následujícího stavu ve frontě analogového výstupu na následující *Start*. Synchronní spuštění obou typů kanálů je zobrazeno na obrázku 4.13. Ve stavu *Start* se cesty opět spojí a dochází k aktivaci výstupu. Stav *Stop* a *Clear* fungují stejně, jako u analogových vstupů s rozdílem hledání, zdali se při vyprazdňování fronty nenalezne požadavek na opětovné spuštění stavu *Initialize*.



Obr. 4.13: Program MeasApp - sekvence současného spuštění analogových vstupů a výstupů

Čtvrtá *While* smyčka je řízena frontou *Processing Commands* a stará se o správu dat. Obsažená *Case* struktura je řízena skrze *SubVI* nazvané *StateManager*. Toto

řešení oddělit řízení stavů a zpracování dat zpřehledňuje a zjednodušuje kód. Po standardním stavu *Default* se po obdržení dat přechází do stavů *Process Imp* (kladívko) nebo *Process Sha* (shaker). Zde v první řadě dochází ke zpracování limitů, které by měřený signál neměl překročit. Následuje automatická, nebo uživatelem prováděná kontrola přijímající, nebo zamítající naměřená data. Uznaná data se předávají do *Shift* registru pro pozdější zpracování. Následují stavy *Measure Imp* a *Measure Sha*, které zpracovávají data. Oba stavy obsahují dvě smyčky zajišťující zpracování každého páru dat (z akcelerometru a snímače síly). Uvnitř smyček se nachází *SubVI* zpracovávající signály daného typu. *Measure Imp* obsahuje *SubVI SVFA Frequency Response(Mag-Phase).vi*, které je součástí knihovny *Sound and Vibration*. Data z měření budičem jsou v *Measure Sha* zpracovávány programem *SVFA Cross Spectrum(Mag-Phase)*. Výsledné spektra se průměrují v případě více měření a následně zapisují do *Shift* registru. Součástí dokončení sekvence jsou čtyři stavy pro ukládání dat do souborů. Nejprve dochází k uložení časových průběhů do TDMS souboru. Následuje uložení spekter do UFF souboru. Pro zajištění kompatibility s ModalVIEW se v dalším kroku ukládají frekvenční spektra ve speciálním formátu nesoucí veškeré potřebné informace do souboru typu DAT. Poslední ukládání je do souboru CSV kompatibilní s BK Connect. Jedním z posledních stavů je *Delete* pro mazání skupiny měření, posledního měření, nebo všech měření. K tomuto velkému množství stavů již chybí stav *Display*, který umožňuje zobrazování záznamů a ukončující stav *Exit*.



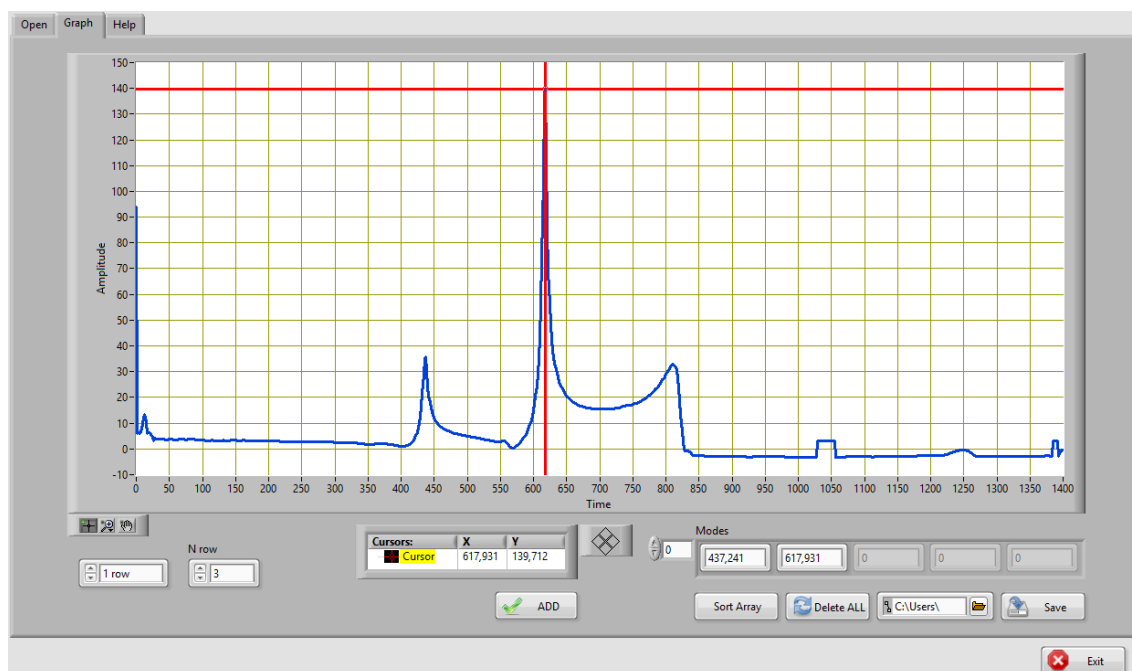
Obr. 4.14: Program MeasApp - blokový diagram

Stack sekvence už jen zastavuje případné zbylé běžící procesy.

4.4.3 Program pro zobrazení a vyhodnocení spekter DataView

Třetím a posledním vytvořeným programem je program DataView pro zobrazení a vyhodnocení spekter. Formát dat je také kompatibilní s programem ModalVIEW. Jednak je možné zpětně procházet naměřená data z vlastního programu, tak i ze zmíněného ModalVIEW.

Uživatelské prostředí obsahuje jeden *Tab Control* se třemi záložkami, které si může uživatel přepínat dle libosti. První záložka obsahuje adresář, kde se zadává cesta k souboru. Po zmáčknutí tlačítka *Open* se vyčtená data zobrazí níže v tabulce a je možné přejít do grafického zobrazení na druhé záložce. Tam se po zvolení zobrazení (jednotlivě spektra, všechny současně, nebo součet spekter) ve spodním levém rohu zobrazí graf viz. obrázek 4.15. Kurzor v grafu je ručně stavitelný a lze po jeho nastavení na rezonanční frekvenci tlačítkem *ADD* přidat mód do tabulky. Pro správu tabulky jsou zde ještě tři další tlačítka, u kterých je na první pohled zřejmá funkce. Jen by však stálo za zmínku, že se data z tabulky ukládají přímo a nedochází již ke třídění. Pokud nedojde k vyplnění adresáře, soubor se uloží do složky ke vstupnímu souboru.



Obr. 4.15: Program DataView

Strukturu programu tvoří dvě *While* smyčky z nichž je jedna řídicí a druhá pracovní. Řídicí smyčka obsahuje pouze *Event* strukturu, která se stará o uživatelské

prostředí, správu módů a plní řídicí frontu pro druhou smyčku. Správa módů není nikterak náročná, jelikož se jen velmi zřídka odečte více než dvacet módů. Naproti tomu druhá smyčka pracuje s velkou většinou dat souboru což můžou být i desítky tisíc hodnot.

4.5 Porovnání výsledků - rázové buzení

Experimentální modální analýza s pomocí kladívka byla nadále již prováděna pouze na tenčím z plátů. Porovnávány byly jak komerční programy ModalVIEW a BK Connect, tak i program MeasApp vyvinutý v grafickém programovacím prostředí LabVIEW. K měření bylo využito stejného vybavení s rozdílem v měřicích zařízeních. BK Connect využíval Pulse a zbylé pracovaly s jednotkou cDAQmx a měřicími kartami. Podrobný seznam vybavení je v tabulce 4.7

Jako referenční snímač již byl využit akcelerometr KD91. Při měření s ModalVIEW byl umístěn ve vyznačeném bodě číslo třicet sedm viz. obrázek 4.1 a buzení probíhalo ve všech třiceti osmi bodech. Měření s BK Connect a vlastní LabVIEW aplikací již byly rovnoměrně rozděleny do sítě 5x5 bodů začínající v rozích. Referenční snímač byl umístěn v rohovém bodě.

Mód	ModalVIEW	BK Connect	LabVIEW
0	343,7	342,3	343,0
1	501,7	501,5	501,0
2	687,8	685,1	684,0
3	866,3	862,0	861,0
4	942,4	939,3	938
5	1480	1469	1469
6	1640	1630	1629
7	1749	1739	1739
8	1821	1819	1817
9	2115	2105	2101
10	2639	2625	2622
11	2792	2789	2790

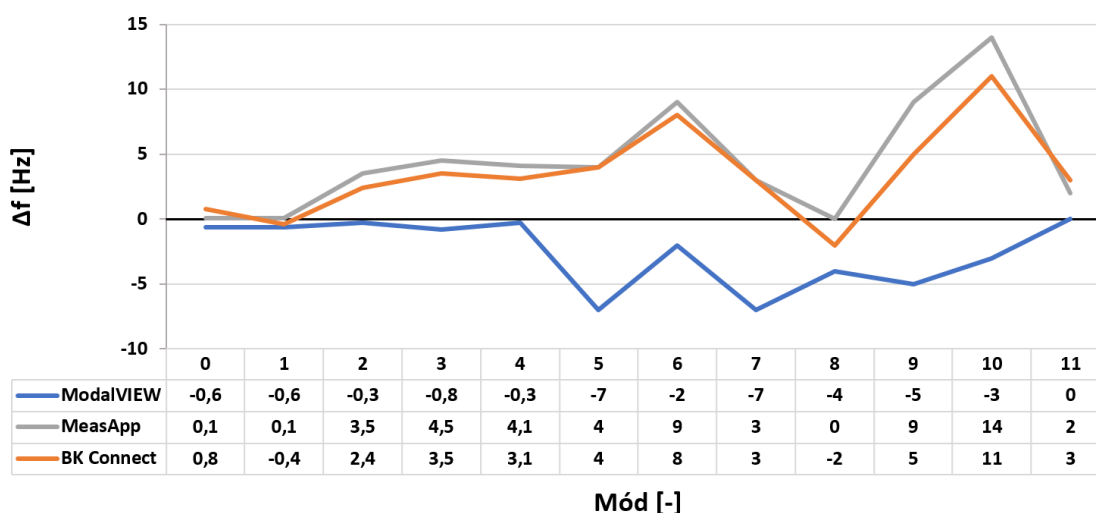
Tab. 4.6: Srovnání výsledků měřicích aplikací - rázové buzení

Výsledky (tabulka 4.6) spolu korespondují. Z počátku se liší nejvýše o jednotky Hertz. Od pátého módu se však začínají odlišovat více. Do jisté míry může být odchylka způsobena interpolací při určování módů v programech ModalVIEW a BK

Přístroj	Typ	IČ/VČ	Poznámky
Modální kladívko	Endevco 2302-5	2491	plastový hrot
Akcelerometr	KD91	0280	fr > 50 kHz
Měřicí karta	NI 9234	17F1982	4xAI; 51,2 kS/s/Ch
Měřicí stanice BK	Typ 3109	-	4xAI; 16-bit; 25,2 kHz

Tab. 4.7: Vybavení pro modální analýzu tenkého plátu - rázové buzení

Connect, a drobnou chybou ručního určení ve vlastním programu. Srovnáním s referenčním měřením (akcelerometrem PCB) to potvrzuje. V obrázku 4.16 jsou graficky znázorněny rozdíly vůči referenčnímu měření. Zde je vidět, že výsledky z vyvíjené aplikace takřka kopírují ty z BK Connect.



Obr. 4.16: Chyba měření - porovnání s referenčním měřením - rázové buzení

4.5.1 Měření s pomocí budiče

Měření se prováděla na silnějším hliníkovém plátu. K buzení byl použit elektrodynamický budič B&K typ 4809 s možností vybuzení frekvencí od 10 Hz do 20 kHz. Zesílení signálu zajišťoval výkonný zesilovač Brüel & Kjaer typ 2732. Budič působil na objekt skrze nerezovou budič tyčinku 211G09 délky 9" (22,86 cm). Upevnění modální tyčinky bylo provedeno skrze přilepenou podložku se závitem. Jelikož byly obě kontaktní plochy dokonale rovné a odmaštěné, držel spoj dostatečně. Rozsah frekvencí od 100 Hz do 4 kHz tento typ spoje nijak neovlivnil.

Měření programem ModalVIEW probíhalo v těsné blízkosti vyfrézovaných bodů jedna až třicet šest. S programy BK Connect a MeasApp se již měřilo v řidší síti 5x5

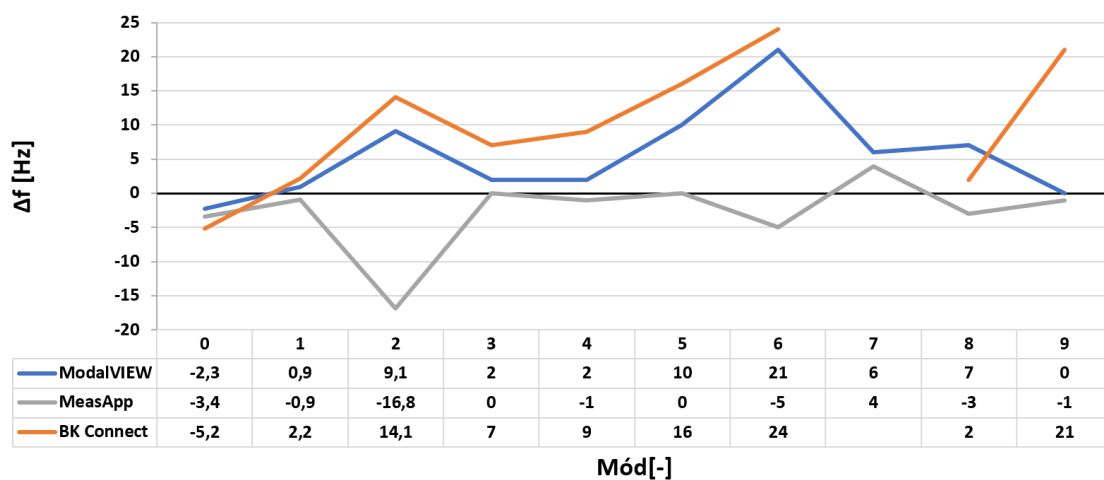
bodů začínající v rozích. Měření se provádělo třemi akcelerometry, kdy se všechny současně přemísťovaly na nové měřicí body. Snímač síly byl upevněn pod bodem 21.

Možnosti generátorů byly mírně odlišné a nešlo vytvořit dostatečně podobný signál stejné délky. Pro buzení se využíval rozmítaný sinus. Generátor ModalVIEW byl nastaven na rozsah 200 Hz až 4000 Hz a vygenerování pěti period na každé frekvenci. Jako jediný neumožňoval synchronizovat počátek a konec signálu s měřením. Program BK Connect měl generátor řešen trochu odlišně. Výstupní signál trval pouze jednu vteřinu, přičemž vygeneroval frekvence od 200 Hz do 3200 Hz. Měření bylo nastaveno na sto opakování a následné zprůměrování. Aplikací MeasApp byla struktura buzení rozmítaným sinusem s počátkem ve 100 Hz a koncem na 4 kHz s dobou trvání tří vteřin. Prudký nárůst amplitudy na začátku a pokles na konci byl omezen vyšováním po rampě. Měření proběhly tři a následně byly zpracovány a zprůměrovány.

Přestože každý z programů měl průběh měření mírně odlišný, nevznikly nijak velké rozdíly ve výsledcích. Hodnoty některých módů jsou takřka stejné a jiné se naopak liší více. Vůči referenčnímu měření se frekvence módů liší nanejvýš o 24 Hz a vůči sobě maximálně 31 Hz. Z porovnání nejlépe vyšel vyvíjený program a to i při srovnání s měřením za pomoci budícího kladívka a plátu zavěšeného na gumových závěsech. Jelikož se však oba komerční programy takřka shodují, musí se zvážit zdali nedošlo připojením budiče k ovlivnění struktury a posunu některých módů. V tom případě by se musela uznat možná chyba obsluhy při odečtu.

Mód	ModalVIEW	BK Connect	LabVIEW
0	432,9	435,8	434,0
1	622,2	620,9	624,0
2	852,1	847,1	878,0
3	1080	1075	1082
4	1175	1168	1178
5	1823	1817	1833
6	2024	2021	2050
7	2159	-	2161
8	2257	2262	2267
9	2629	2608	2630

Tab. 4.8: Srovnání výsledků měřících aplikací - buzení elektrodynamickým budičem



Obr. 4.17: Chyba měření - porovnání s referenčním měřením - buzení elektrodynamickým budičem

Přístroj	Typ	IČ/VČ	Poznámky
Akcelerometr	KD91	0280,0143,5641	fr > 50 kHz
Šasi	cDAQ 9174	017D9876	4 sloty
Měřicí karta	NI 9234	17F1982	4xAO; 51,2 kS/s/Ch
Měřicí karta	NI 9263	016FF0C6	4xAO
Měřicí stanice BK	Typ 3109	-	4xAI, 2xAO
Elektrodynamický budič	BK 4809	-	
Modální tyčinka	211G09	-	9" (22,86 cm)
Snímač síly	BK 8200	957118	3,93 pC/n

Tab. 4.9: Vybavení pro modální analýzu tlustého plátu - buzení elektrodynamickým budičem

5 Závěr

Tato práce si kladla za cíl navrhnout a realizovat výukový model umožňující demonstrovat možnosti vibrační diagnostiky, zejména pak experimentální modální analýzy s podporou více softwarových a hardwarových nástrojů. Hlavním úkolem bylo vytvořit vlastní měřicí aplikaci, která zjednoduší technicky náročná měření a umožní studentům analyzovat data i v jiných programech.

V teoretické části je pojednáno o metodách vibrační diagnostiky, jejich možnostech a uplatnění v praxi. Podstatná část i s ohledem na praktickou část diplomové práce byla věnována modální a experimentální modální analýze. Spolu s vlastnostmi analýz bylo zmíněno i o souvisejících fyzikálních dějích, snímačích, metodách a postupech. První kapitola v závěru shrnuje postup provádění experimentální modální analýzy a zpracování dat. Zmíněna je také metoda provozních tvarů kmitů, která má za cíl získání parametrů strojů a konstrukcí bez použití známého budícího signálu. Jako poslední je zmíněna řádová analýza používaná na diagnostiku cyklicky pracujících strojů.

Praktická část práce seznamuje s použitými měřicími nástroji a vlastními měřenými objekty. První praktická měření byla provedena pomocí programu ModalVIEW, kde bylo uskutečněno měření s akcelerometrem PCB a modálním kladívkem Endevco. Následně byl demonstrátor rozšířen o konstrukci pro zavěšení měřeného objektu a tedy možnosti budit měřené objekty i pomocí elektrodynamického budiče. Součástí práce je i experimentální posouzení, jaký typ závěsu bude vhodné používat. Současně s tím byla vyvíjena vlastní softwarová aplikace pro měření a export dat pro následnou modální analýzu v programu BK Connect nebo ModalVIEW. Tyto programy sloužily pro porovnání a ověření uskutečněných měření. Jakmile byly dokončeny práce na vývoji, došlo k uskutečnění porovnávacích měření. Získaná data byla zpracována do tabulek a grafů, ze kterých plyne, že výsledky jsou plně porovnatelné a tedy realizované aplikace je možné prohlásit za plně funkční.

Realizace této práce, tedy vytvořený laboratorní model a vyvinutý měřicí program je v souladu s požadavkem a body zadání. Získané výsledky by měly posloužit v laboratorní výuce pro praktickou demonstraci zmíněné problematiky. Zároveň je možné na práci navázat a rozšířit ji o další analýzy. Program je konstruován jako otevřený pro možné rozšíření například o řádovou analýzu.

Vlastním nápadem bylo rozšířit realizovaný program o aplikaci GraphEdit na vytváření základních objektů a sítí měřicích bodů pro software ModalVIEW. A dále, aby bylo možné spektrální charakteristiky zkoumat i bez potřeby jiné placené aplikace, vznikl program DataView pro jednoduchou vizualizaci dat. Součástí práce je i vyhotovení návodu k ovládní programu BK Connect, jehož výuková licence byla v průběhu realizace diplomové práce zakoupena.

Literatura

- [1] BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2758-2.
- [2] BILOŠOVÁ, Alena. *Týmová cvičení předmětu Experimentální modální analýza: návody do cvičení předmětu "Experimentální modální analýza"*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011. ISBN isbn978-80-248-2756-8.
- [3] BLATA, Jan. *Metody technické diagnostiky: učební text předmětu "Technická diagnostika"; Metody technické diagnostiky CV : návody do cvičení předmětu "Technická diagnostika"*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN isbn978-80-248-2735-3.
- [4] OPLT, Tomáš. *Porovnání výsledků modální analýzy desky plošných spojů dosažených výpočtovým a experimentálním modelováním*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [5] STRACHOŇ, Martin. *Vibrodiagnostika průmyslových strojů*. Zlín, 2009. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav aplikované informatiky.
- [6] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice [online]*. FCC PUBLIC s. r. o. : Automa : časopis pro automatizační techniku, 2010, 2010(1) [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [7] *Způsoby upevnění snímačů vibrací - 4.díl: Šroubový spoj*. SVM tech [online]. Praha [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.svmtech.cz/cz/zpusoby-upevneni-snimacu-vibraci-4-dil>
- [8] *Způsoby upevnění snímačů vibrací - 2.díl: Včelí vosk, Lepidlo*. SVM tech [online]. Praha [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.svmtech.cz/cz/zpusoby-upevneni-snimacu-vibraci-2-dil>
- [9] *Způsoby upevnění snímačů vibrací - 3.díl: Magnet, Montážní klip*. SVM tech [online]. Praha [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.svmtech.cz/cz/zpusoby-upevneni-snimacu-vibraci-3-dil>
- [10] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Štramberk, 1997. ISBN 80-901936-1-7.

- [11] TŮMA, Jiří. *Řádová analýza signálů z točivých strojů s proměnlivými nebo neustálenými otáčkami*. Ostrava: Technická univerzita v Ostravě, 2015. Dostupné také z:
<http://homel.vsb.cz/~tum52/publications/Tuma-seminar-Raztoka.pdf>
- [12] HONC, Lukáš. *Řádová analýza signálů*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D. Dostupné také z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=124405
- [13] TŮMA, Jiří. *Použití cepster v diagnostice strojů*. Ostrava: Technická univerzita v Ostravě, 2015. Dostupné také z:
<http://homel.vsb.cz/~tum52/publications/Diago-2014-Tuma.pdf>
- [14] *Provozní tvary kmitů* [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z:
<https://docplayer.cz/5228185-P9-provozni-tvary-kmitu.html>
- [15] *Měření chvění*. Dánsko: Bruel & Kjaer DK BR0123.
- [16] *Snímače vibrací a úprava signálu*. Bruel & Kjaer .
- [17] CASTRO, Rito Mijarez a Jeremy J HAWKES. *EXPERIMENTS AND MODELLING OF A STEPPED HORN AND A PLATE USING NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPES FOR CONTROLLING PARTICLES MOTION* [online]. In: . Madrid, 2007 [cit. 2019-05-09].
 Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/240631604_EXPERIMENTS_AND_MODELLING_OF_A_STEPPED_HORN_AND_A_PLATE_USING_NATURAL_FREQUENCIES_AND_MODE_SHAPES_FOR_CONTROLLING_PARTICLES_MOTION

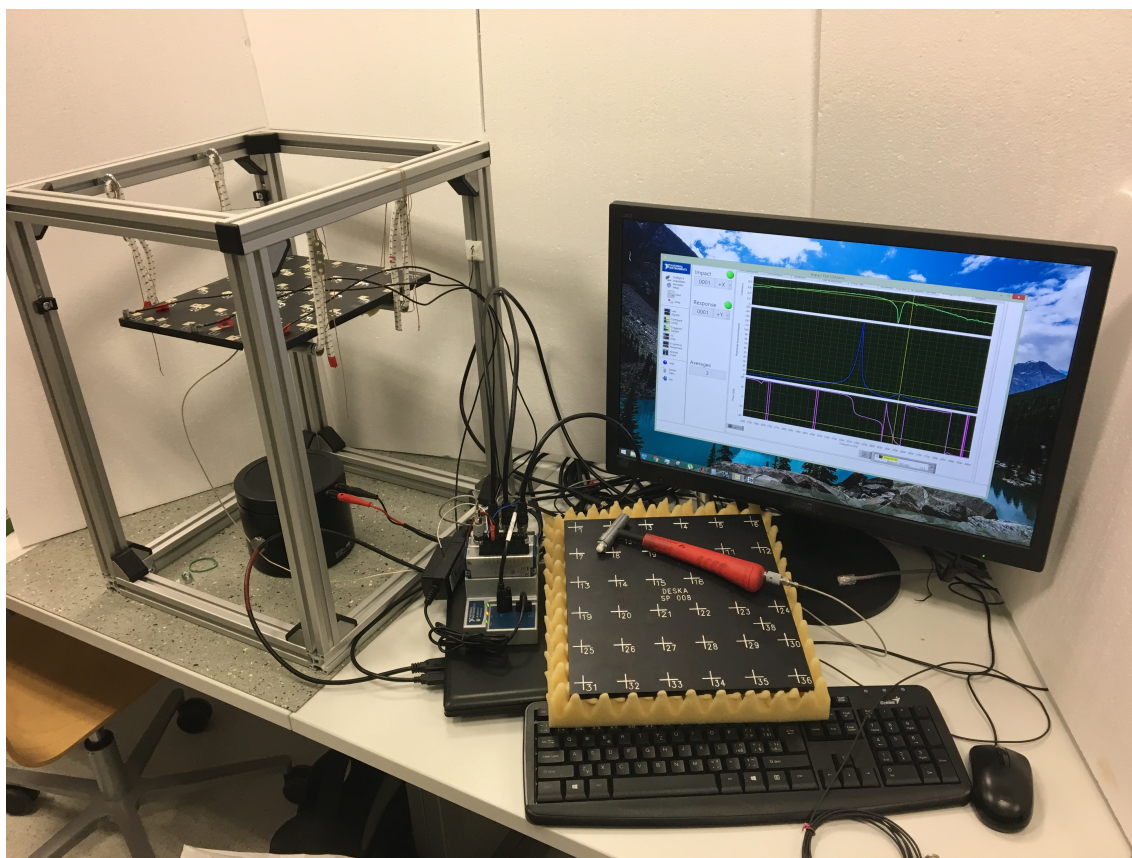
Seznam symbolů, veličin a zkratek

EMA	Experimental Modal Analysis / Experimentální Modální Analýza
ODS	Operation Deflection Shapes - česky PTK
PTK	Provozní Tvary Kmitů
DOF	Degree of Freedom
DAQ	Data Acquisition
ICP	Integrated Circuit Piezoelectric
IEPE	Integral Electronics Piezoelectric
FFT	Fast Fourier transform
STFT	Short Time Fourier Transform
SW	Software
AI	Analog Input
AO	Analog Output

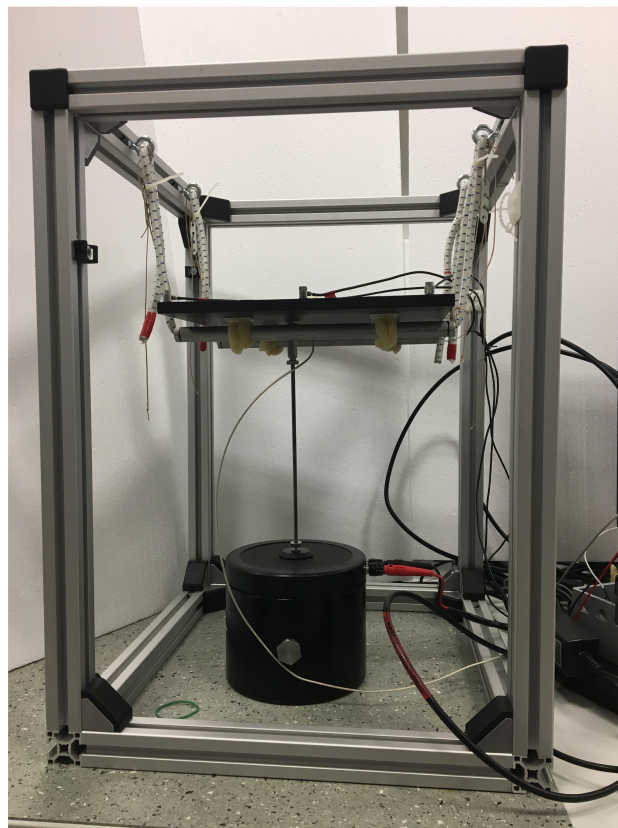
Seznam příloh

A Fotografie	59
B Obsah přiloženého CD	61
C Výkres - Sestava pro měření dynamických vlastností	62

A Fotografie



Obr. A.1: Fotografie pracoviště



Obr. A.2: Fotografie konstrukce

B Obsah přiloženého CD

/	kořenový adresář přiloženého CD
├── Data	Naměřená data
│ ├── BK Connect	Data z BK Connect
│ ├── MeasApp	Data z MeasApp
│ ├── ModalVIEW	Data z ModalVIEW
│ └── Read me.txt	
├── Programy	Zdrojové kódy a spouštěcí soubory
│ ├── GraphEdit	Program GraphEdit
│ ├── MeasApp	Program MeasApp
│ ├── DataView	Program DataView
│ └── Read me.txt	
├── Fotografie	Fotografie pracoviště
│ ├── Měření.jpg	
│ ├── Pracoviště.jpg	
│ ├── Sestava.jpg	
│ └── Sestava2.jpg	
├── DP_Blecha_2019.pdf	
├── Sestava shaker vykres.pdf	
└── Návod BK Connect.pdf	

C Výkres - Sestava pro měření dynamických vlastností

Výkres je formátu A3 a je volně vložen.