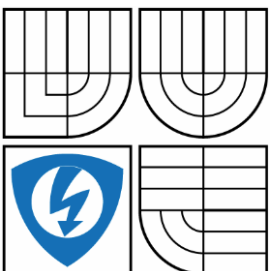


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MODÁLNÍ ANALÝZA

MODAL ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

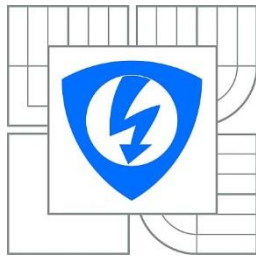
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN ZACH

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Martin Zach

**ID:** 147004

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

## Modální analýza

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace měřicího systému pro modální analýzu. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Zpracujte krátký přehled problematiky modální analýzy a měření provozních tvarů kmitů.
2. Vypracujte přehled trhu se SW pro vizualizaci vlastních tvarů kmitů.
3. Navrhněte, realizujte a prakticky ověřte na laboratorním přípravku měřicí systém pro měření odezvy mechanického systému na buzení rázovým kladívkem a získaná data použijte pro vizualizaci vlastních kmitů.
4. Předpokládá se využití rázového kladívka Endevco, měřicích karet firmy National Instruments, vytvoření obslužného SW v LabVIEW, vizualizace v programu PULSE Reflex.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Agilent Technologies - The Fundamentals of Modal Testing. Application Note 243-3  
Bilošová, A. - Experimentální modální analýza. Skriptum VŠB TU Ostrava

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 26.5.2014

**Vedoucí práce:** doc.Ing. Petr Beneš, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**

Předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 bakalářská práce se zabývá problematikou modální analýzy a měření provozních tvarů kmitů. Poskytuje přehled trhu se SW pro vizualizaci vlastních tvarů kmitů. V několika kapitolách je popsán způsob měření modální analýzy a návod na obsluhu měřicího a vizualizačního programu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Modální analýza, provozní tvary kmitů, obslužný a vizualizační SW, návod k PULSE Reflex

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis solves questions of measuring of modal analysis and operational deflection shapes. It provides the summary of visualizations software to viewing of natural deflection shapes. In several chapters is described a way of measuring of modal analysis and operating instructions to measuring and visualization programme.

## **KEYWORDS**

Modal analysis, operational deflection shapes, utility and visualization SW, PULSE Reflex manual

## **Bibliografie**

**ZACH, M.** *Modální Analýza*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 49s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Modální analýza“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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.121/2000Sb., 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.40/2009Sb.

V Brně dne: .....

.....  
(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>7</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Teorie.....</b>	<b>10</b>
1.1 Modální analýza .....	10
1.2 Provozní tvary kmitů .....	10
1.3 Uložení měřené struktury .....	11
1.3.1 Volné uložení .....	11
1.3.2 Pevné (vetknuté) uložení.....	12
1.3.3 Uložení in-situ.....	12
1.4 Uchycení snímače odezvy .....	12
1.5 Způsoby snímání .....	12
1.5.1 Kontaktní snímače .....	13
1.5.2 Bezkontaktní snímače .....	13
1.6 Typy budících signálů .....	14
<b>2 Vizualizační software.....</b>	<b>15</b>
2.1 COMSOL Multiphysics.....	15
2.2 ModalVIEW .....	17
2.3 PULSE Reflex Modal Analysis Type 8721 .....	19
2.4 ME'scope VES 5.0.....	20
2.5 ARTeMIS Modal .....	22
2.6 DATS Modal Analysis .....	24
2.7 SolidWorks Simulation Premium .....	25
2.8 ANSYS.....	26
2.9 Souhrnný přehled SW .....	27
<b>3 Měření .....</b>	<b>29</b>
3.1 Zapojení měřicí aparatury .....	29
3.2 Příprava měřené struktury.....	29
3.3 Programové vybavení LabVIEW .....	30
3.4 Program Impact Test (DAQmx) .....	30
3.4.1 Configure Acquisition .....	31
3.4.2 Triggered Signals .....	32
3.4.3 Configure Limits.....	33
3.4.4 Ostatní .....	33
3.4.5 Blokové schéma.....	34
3.5 Postup měření.....	36

<b>4 PULSE Reflex .....</b>	<b>37</b>
4.1 Tvorba modelu .....	37
4.2 Import naměřených dat .....	38
4.3 Tvorba vizualizace .....	38
4.4 Operace s importovanými daty .....	39
<b>5 Výsledek měření .....</b>	<b>40</b>
5.1 Grafické zobrazení dat .....	40
5.2 Vlastní frekvence .....	41
<b>6 Snímání 3D objektů .....</b>	<b>43</b>
<b>7 Závěr .....</b>	<b>44</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>45</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk .....</b>	<b>47</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>48</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.: Typy budících signálů .....	14
Obr. 2.: Schéma zapojení měřicí aparatury.....	29
Obr. 3.: Uživatelské prostředí SW Impact Test (DAQmx) – Configure Acquisition....	31
Obr. 4.: Uživatelské prostředí SW Impact Test (DAQmx) – Triggered Signals .....	32
Obr. 5.: Uživatelské prostředí SW Impact Test (DAQmx) – Configure Limits.....	33
Obr. 6.: Blokové schéma SW Impact Test (DAQmx) .....	34
Obr. 7.: Blokové schéma SW Impact Test (DAQmx) - Ukládání dat .....	35
Obr. 8.: Rozložení bodů v mřížce - a) ve sledu měření, b) dle PULSE Reflex .....	35
Obr. 9.: Uživatelské prostředí programu PULSE REFLEX - Model .....	37
Obr. 10.: Uživatelské prostředí programu PULSE REFLEX - Analysis.....	38
Obr. 11.: Průběh vizualizace 3. módu pásoviny .....	40
Obr. 12.: Průběh vizualizace při 3700 Hz - torze .....	41
Obr. 13.: Geometrie nosníku.....	41



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.: Přehled cen licencí SW ARTeMIS.....	23
Tab. 2.: Přehled cen licencí SW SolidWorks.....	26
Tab. 3.: Přehled SW I.....	27
Tab. 4.: Přehled SW II.....	28
Tab. 5.: Přehled SW III.....	28
Tab. 6.: Vlastní frekvence volně uloženého nosníku.....	42

# ÚVOD

Tato práce se zabývá problematikou modální analýzy a měřením provozních tvarů kmitů. Za pomoci modální analýzy lze získat modální parametry, které slouží k diagnostice problémů vyvolaných strukturálními vibracemi a případnému simulování modifikovaného modelu. Ten se pak převádí do reality. Vibrace mohou vyvolat pro uživatele nežádoucí rušivý element (hluk, chvění, apod.), či jejich působením může docházet k trvalým deformacím struktury, a tedy i k ohrožení samotného uživatele. Cílem je navrhnout měřicí aparaturu k zaznamenávání odezvy mechanického systému na budící signál a získaná data následně zobrazit na modelu měřeného předmětu.

Bakalářská práce navazuje na semestrální projekt, ve kterém jsem se zabýval problematikou modální analýzy a měřením provozních tvarů kmitů. Dále byl vytvořen stručný přehled vizualizačního SW a na veřejně dostupném obslužném SW se otestovala průchodnost měřicího řetězce. Bakalářská práce je rozšířena o další dostupný vizualizační SW a o upravený obslužný SW, navržený v LabVIEW.

Prvních několik stran mé práce je vyhrazeno teoretickému úvodu do problematiky měření, možnostem umístění měřené struktury, způsobům získávání dat a jejich následnému zpracování. Další kapitoly jsou věnovány aktuálně dostupnému SW určenému k vizualizaci vlastních kmitů, popisu obslužného SW a stručnému návodu na vizualizační program PULSE Reflex. V závěru je pak zhodnocení dosažených výsledků.

# 1 TEORIE

Rozlišujeme dva experimentální přístupy zabývající se vibracemi:

1. Analýza signálů - určení povahy a úrovně vibračních odezev. Vibrační odezvy jsou měřeny za provozních podmínek stroje. Tento přístup spadá do oblasti vibrační diagnostiky.
2. Analýza systémů - získání nebo ověření teoretických modelů a předpokladů. Struktura nebo její část je rozkmitána známým budícím signálem.

## 1.1 Modální analýza<sup>1</sup>

Modální zkouška je soubor procesů aplikovaných na testovanou strukturu za účelem získání matematického popisu jejího dynamického chování.

Zkoušky se používají pro:

- zjištění modálních parametrů (vl. frekvence, vl. tvary, apod.)
  - bez návaznosti na teoretický model
  - s cílem srovnat experimentálně získaná data s odpovídajícími daty získanými pomocí teoretické metody
- získání matematického modelu součásti, jež je zařazena do složitější struktury
- tvorbu modelu (fyzikální, modální, odezvový), na němž se sleduje vliv strukturálních modifikací na dynamické chování struktury
- určení budící síly

Příkladem použití modální analýzy může být např. hledání vlastní frekvence komponent řízení v automobilech, kde je struktura vybudena budícím signálem a zaznamenává se jeho odezva. Vlastní frekvence se řadí k základním parametrům komponent a při testech ve zkušebních laboratořích je kladen velký důraz na optimalizaci tohoto parametru, neboť by mohla nastat situace, kdy například při startování motoru automobilu by komponenta vlivem rezonance způsobila v lepším případě nežádoucí hluk, v horším případě by došlo k sebedestrukci.

## 1.2 Provozní tvary kmitů<sup>2</sup>

ODS (z ENG - Operational Deflection Shapes), nebo též zviditelnění vibrací strojních zařízení při daných provozních podmínkách, lze definovat jako vychýlení jednoho či více bodů při určité frekvenci. Druh pohybu bodů je pak určen tvarem. Jinak řečeno, tvar je pohyb jednoho bodu ve vztahu k bodům ostatním. Provozní tvary kmitů spadají do oblasti vibrodiagnostiky a přiřazení této problematiky k modální analýze je patřičné, neboť obě využívají jak po technické, tak po softwarové stránce stejných prostředků. Rozdílnost metod spočívá v tom, že u ODS neznáme velikost a působíště budící síly systému - daná situace nevyžaduje, resp. je nemožné použít, externího buzení a měříme

---

<sup>1</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

<sup>2</sup> SCHWARZ, B. J., RICHARDSON, M. H. 1999. Introduction to operating deflection shapes. [20]

jen vibrace vznikající v samotné struktuře. Nutno podotknout, že získaný modální model je nenormovaný a nelze tak provádět simulace modifikací.

Měřením provozních tvarů kmitů nám je umožněno např. stanovení míry pohybu stroje, identifikování bodu s největší hybností, tedy lokalizace nejvíce rušivého elementu, lokalizaci místa buzení struktury, určení způsobu eliminace hladiny vibrací. Metodu ODS používáme tehdy, převažuje-li při kmitání jedna frekvence nad ostatními. Pokud by tomu tak bylo, je zde velká pravděpodobnost, že se stroj přeladil blízko k rezonanční frekvenci.

Typ ODS se volí podle provozních podmínek (např. otáčky, zatížení, výkon, apod), které mohou být stacionární, kvazistacionární (mírně se měnící), či přechodové, a dělí se na:

1. Spektrální ODS: jsou získány tvary kmitu na jednotlivých frekvenčních (stacionární podm.) nebo řádových (kvazistacionární podm.) složkách. Pro měření spektrální ODS postačí 2 akcelerometry (1x referenční, 1x pro snímání odezvy).
2. Časové ODS: je získán průběh deformace v čase. Používá se u přechodových signálů. Zde jsou kladeny velké nároky na technické vybavení, a to díky nemožnosti měření jednotlivých stupňů volnosti (DOF) postupně vlivem přechodového děje. Je zapotřebí použít více snímačů a speciálního softwarového vybavení (nelze použít stejného SW jako pro modální analýzu).

### 1.3 Uložení měřené struktury<sup>3</sup>

Existuje několik možných způsobů umístění měřené struktury. Každý způsob má své pro a proti a může tak ovlivnit výsledek měření. Volbu mezi jednotlivými možnostmi provádíme podle toho, co přesně od výsledku požadujeme a jak velké přesnosti chceme při měření dosáhnout.

#### 1.3.1 Volné uložení

Těleso je uloženo bez jakýchkoliv vazeb s okolím. Může být tedy uloženo na měkké podložce, jako je např. molitan, nebo jej zavěsíme na měkkých pružinách. Uložení lze označit za volné, předpokládáme-li, že nejvyšší vlastní frekvence módu tuhého tělesa je menší než 10% hodnoty nejnižší deformační vlastní frekvence.<sup>4</sup>

V místě styku tělesa s nosičem dochází k tlumení, které je možné eliminovat umístěním styčných ploch nosiče do uzlových bodů. Avšak uzlové body pro každý mód mají jinou polohu, což by v reálu znamenalo, že pro každé měření bychom museli měnit i umístění závěsů.

Toto uložení se považuje za nejjednodušší v případě, že potřebujeme srovnat reálný modální model s modelem vypočítaným.

---

<sup>3</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

<sup>4</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

### 1.3.2 Pevné (vetknuté) uložení

Těleso je pevně spjato svou částí s jiným objektem (např. ukotvení v zemi). O pevném uložení lze hovořit tehdy, je-li odezva znehýbněných částí menší než 10% odezvy ostatních stupňů volnosti.<sup>5</sup> Pevné uložení není vhodné pro srovnávání reálného modelu s modelem vypočítaným. Další nevýhodou je nedosažitelnost 100% opakovatelnosti měření. Pokud bychom demontovali těleso a následně jej opět nainstalovali, mohou se naměřené hodnoty lišit, a to v rozsahu až  $\pm 5\%$ .<sup>6</sup> V některých případech se však tomuto typu uložení nevyhneme.

### 1.3.3 Uložení in-situ

Měření provádíme za provozních podmínek na velkých konstrukcích, kde zaznamenáváme data z celého objektu za pomoci několika snímačů, nebo tehdy, potřebujeme-li znát modální vlastnosti za provozu. Porovnání reálného a vypočteného modelu je mnohem komplikovanější než u zbylých dvou typů uložení.

Pozitivní u uložení in-situ je, že samotnému měření nepředchází žádné přípravy struktury.

## 1.4 Uchycení snímače odezvy<sup>7</sup>

Aby nedocházelo k ovlivnění výsledku měření, je nutné brát v úvahu i uchycení samotného snímače. Ten musí být s měřenou strukturou spojen tak, aby snímal výhradně strukturní děje (poměr odezvy a šumu co nejmenší). Každý snímač má rezonanční frekvenci, která je ovlivněna rozměry snímače a v nějaké míře i způsobem uchycení. Několik možných způsobů uchycení je sepsáno níže (od nejlepších k nejhorším):

- šroub
- speciální lepidlo
- oboustranná lepicí páska
- včelí vosk (jen do 40°C)
- magnet

## 1.5 Způsoby snímání<sup>8</sup>

Snímač je jednoznačně jeden z nejdůležitějších prvků měřicího zařízení, neboť svou konstrukcí a principem určuje, jaká bude výstupní veličina. Při volbě snímače je nutné brát v potaz vlastnosti měřeného předmětu (typ, umístění, tvar/rozměry, statický/dynamický, atd.), požadavek přesnosti výsledků a v neposlední řadě finanční možnosti. Snímač je složen ze dvou částí - čidlo (část snímače, která převádí kmitání

<sup>5</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

<sup>6</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

<sup>7</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

<sup>8</sup> Weigl, M. 2011. Měření vibrací. [27]

měřené struktury na dráhu) a převodník (převádí naměřené dráhy čidlem na jinou analogovou fyzikální veličinu).

## **1.5.1 Kontaktní snímače**

Do této skupiny patří mechanické akcelerometry. Podle definice nulového bodu dělíme snímače na relativní a absolutní.

### **1.5.1.1 Relativní snímače**

V případě, že můžeme umístit snímač např. na rám stroje, či nějaké jiné místo, které je vůči kmitajícímu předmětu v klidu, pak mluvíme o relativním měření. Snímač však musí být umístěn dostatečně blízko, aby přenosový člen dosáhl na měřenou součást nebo aby nedocházelo k velkým odchylkám vlivem délky přenosového členu (prvek, který přenáší kmitání na čidlo).

### **1.5.1.2 Absolutní snímače**

Naopak pokud nenalezneme vhodné umístění pro relativní snímač, je třeba snímač umístit přímo na měřenou strukturu, a to pomocí pružného spojení. Absolutní snímače nemají referenční bod, proto výsledky nejsou reprezentovány jako odchylky od nějakého bodu, ale jako absolutní odchylka v určitém směru.

## **1.5.2 Bezkontaktní snímače**

Bezkontaktní snímače nachází uplatnění v případech, kdy je nemožné či nevhodné užití mechanického akcelerometru. Jedná se o novodobější způsob měření, který je dnes hojně používán. Tyto snímače nám např. umožňují měřit struktury konající rotační pohyb.

K pozitivním vlastnostem lze přisoudit mechanickou bezzásahovost do měřeného systému, a tedy i výsledné neovlivnění vibrací tělesa vlivem přidané hodnoty, která by modifikovala jednotlivé módy. Vykazují velkou přesnost a umožňují vyšší frekvence snímání, avšak jsou použitelné jen do krátkých vzdáleností a mají vyšší pořizovací cenu.

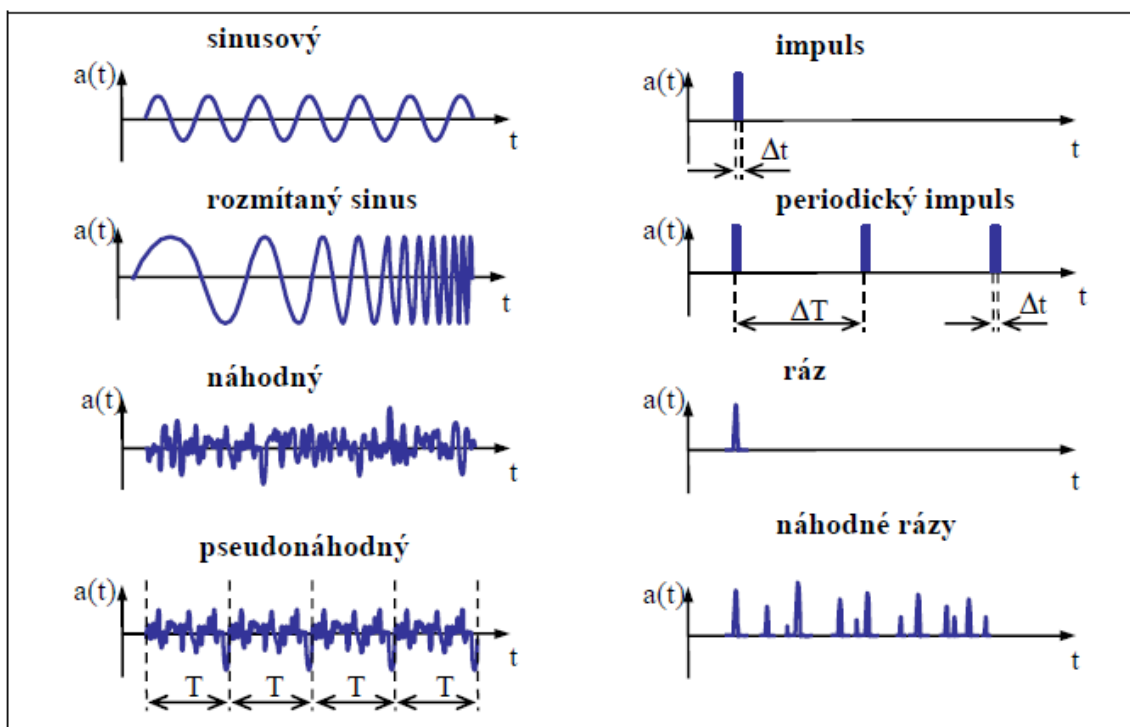
Pro bezkontaktní způsob se používají indukčnostní oscilátorové senzory, kapacitní snímače a laserové vibrometry.

## 1.6 Typy budících signálů<sup>9</sup>

Pro modální analýzu existuje několik typů budících signálů. Základní dělení je následující:

- harmonické - sinusový signál
- širokopásmové
  - impulsní
    - jeden impuls (ráz)
    - náhodné
    - periodické
  - náhodné
  - pseudonáhodné
  - rozmítaný sinus

Jako budič pro impulsní signál se nejčastěji používá rázové kladívko, případně je možné aplikovat přípojný vibrační budič. Harmonické signály jsou buzeny dynamickým budičem vibrací.



Obr. 1.: Typy budících signálů<sup>10</sup>

<sup>9</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

<sup>10</sup> BILOŠOVÁ, A. 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů. [3]

## 2 VIZUALIZAČNÍ SOFTWARE

Vizualizační software se používá k zobrazení dynamického chování strojů nebo soustrojí. Jedná se o nejlepší způsob zobrazení naměřených dat. Na rozdíl od tabulkové formy je praktický, přehledný a člověk mu snáze porozumí. Poskytuje tak dostatečné podklady k rozhodování o řešení problému.

Simulační software nevyužívá ke své činnosti experimentálně získaná data, ale vychází pouze z matematických výpočtů získaných v rámci programu samotného. Simulovanému modelu lze přiřadit několik fyzických podstat. Výsledky následně zobrazuje na 2D/3D geometrii, v grafech nebo tabulkách. Většina programů rovněž umožňuje srovnání experimentálních a teoretických výsledků.

Funkční výbavou se jednotlivé softwary liší. To se samozřejmě odráží i na ceně produktu, avšak i zde platí, že dražší neznamena automaticky lepší. Některé z nich nabízejí i licence pro akademickou půdu. Základním požadavkem v tomto projektu je, aby vizualizační software dokázal zpracovat experimentálně získaná data.

### 2.1 COMSOL Multiphysics<sup>11</sup>

Použití:

- modelování a simulace fyzikálních jevů (elektrické proudy, elektrostatika, přenos tepla v pevných látkách a kapalinách, jouleovo teplo, laminární proudění, tlaková akustika, pevná mechanika, atd.)
- vizualizace naměřených dat na 2D/3D modelu<sup>12</sup>

Vlastnosti:

- grafické rozhraní Ribbon pro Windows (uživatelsky příznivé prostředí a intuitivní ovládání programu, implementováno i v MS Office)
- simulace několika fyzikálních podstat zároveň (např. magnetické pole a akustiku)
- proložení naměřených dat s následným vytvořením animace
- grafické porovnání naměřených dat se simulovanými výsledky s možností matematických operací (např. pro zjištění odchylky)
- nastavení libovolného množství parametrů a vlastností zkoumanému subjektu (např. definice materiálů jednotlivých komponent zkoumaného předmětu)
- bezproblémová integrace do programu MATLAB od společnosti The MathWorks – modelování rozšířeno o skriptové programování v prostředí MATLAB (umožňuje manipulaci s modelem a plnohodnotný preprocessing a postprocessing dat)
- podpora propojení se: SolidWorks, Inventor, Creo™ Parametric, Solid Edge, SpaceClaim, Pro/ENGINEER, CATIA V5

---

<sup>11</sup> COMSOL [5]

<sup>12</sup> Emailová korespondence s Pavel Ludvík [10]



- sestavení geometrie z uživatelem definovaných geometrických primitiv
- import, export CAD geometrie (podporuje formáty: Parasolid, ACIS a standardních formátů, jako je STEP a IGES) s možností její modifikace řadou nástrojů přímo v programu COMSOL
- export simulace a naměřených dat do textového souboru, Excelu, obrázku, videa či CADu
- Export sítě do NASTRAN formátu (analýza metodou konečných prvků)
- rychlá a ochotná technická podpora

Reference:

- k dlouhodobým uživatelům COMSOL Multiphysics se řadí například Evropská organizace pro jaderný výzkum, známá též pod zkratkou CERN. Tento program jim umožňuje provádět v průběhu výzkumu, návrhu a vývoje systémů reálné simulace fyzikální podstaty
- Vysoké učení technické v Brně

Výrobce:

- švédská firma COMSOL AB

Distributor:

- výhradním zástupcem firmy COMSOL pro Českou republiku a Slovensko je společnost HUMUSOFT s.r.o.

Technická podpora

- email: support@comsol.cz
- diskuzní fórum: <http://www.comsol.com/community/forums/>

Ceny a licence:<sup>13</sup>

- při koupi tohoto produktu uživatel získá časově neomezenou licenci. Jedna standardní licence COMSOL Multiphysics v.4.4 stojí 257 980,- Kč, síťová licence pak vyjde na 513 980,- Kč. Ceny zahrnují předplatné nových verzí a technickou podporu na 12 měsíců
- při použití ve školství lze uplatnit slevy za předpokladu, že licence budou využívány pouze pro výuku a výzkumnou činnost studentů a pedagogů. Pro komerční účely je využití zcela zakázáno!
- zkušební instalační kódy jsou poskytovány na dobu 14 dnů

---

<sup>13</sup> Humusoft [13]

## 2.2 ModalVIEW<sup>14</sup>

Použití:

- vizualizační nástroj
- modální testování a analýzy

Vlastnosti:

- aplikace je podporována společností National Instruments
- vyvinuto v prostředí NI LabVIEW, čímž je zaručena jednoduchá a rychlá komunikace s měřicím hardwarem téže produkční značky
- kompatibilní s DSA (NI dynamics signal acquisition) hardwarem, plug-in deskami, USB zařízeními a PXI systémy
- multikanálový sběr dat s integrovanou možností jejich správy, díky níž je možné jednotlivá data v projektu zpřístupnit a zobrazit
- odhadování modální parametrů a jejich validace
- experimentální modální analýza (EMA) při použití rázového kladívka nebo shakeru
- metoda polynomiálního prokládání křivek MDOF – zkoumání přirozené frekvence, tlumení a tvaru módu
- pokročilé metody analýzy (metoda nejmenších čtverců komplexní frekvenční oblasti) – identifikace pozice módu z vytvořeného stabilizačního grafu, odhad tvaru módu založený na zvolených módech
- stochastická metoda identifikace podprostoru (SSI) pro OMA
- pozice módu mohou být detekovány automaticky nebo manuálně
- možnost zaznamenávání zvukových či vibračních signálů ze statických nebo dynamických struktur
- získaná data se pak snadno použijí pro vizualizace odezev struktury a zobrazení vibračních vlastností struktury zároveň
- animace mohou mít časovou nebo frekvenční bázi
- interpolace pro neměřené body z okolí blízkých známých hodnot
- ovládání rychlosti a amplitudy animace
- součástí aplikace jsou i post-processingové nástroje: okénkové filtry, frekvenční odezvové funkce (FRF), průměrování, atd.
- pro návrh 3D modelů jsou k dispozici základní strukturní bloky, v nichž lze volit mezi trojúhelníkovými, kruhovými, krychlovými, kuželovitými, cylindrickými a sférickými tvary, které napomáhají rychlé tvorbě experimentálních struktur. Ty se pak pomocí dalších nástrojů mohou libovolně modifikovat
- import CAD ve formátu \*.stl
- generování reportů dle požadavků uživatele

---

<sup>14</sup> ABSignal [1]

Reference:<sup>15</sup>

- nejvíce zákazníků, kteří využívají tento produkt, tvoří čínské univerzity. Jmenovitě např.: Power Machinery and Engineering Konming University of Science and Technology, College of Mechanical Engineering Tongji University, South China University of Technology a několik dalších.
- Qring Technology AB, Švédsko (vibroakustika)
- Tech Damper, Norsko (vibrace, hluk, dynamika kapalin a interakce mezi nimi)
- AQUATURBO, Francie (vyrovnávání laserem, analýza vibrací, modální analýza, měření napájení a torzních vibrací, výpočet a simulace)

Hodnocení uživateli:<sup>16</sup>

- Kaci L (USA): „Výborný produkt. Jednoduché ovládání, technická podpora je rychlá a účelná.“
- John P (Philadelphia): „Po vybalení z krabice je třeba software upravit tak, aby komunikoval s našimi aplikacemi, ale vývojáři nám vyšli vstříc a asistovali nám při prvotním spuštění.“
- Even L (Norway): „Rychlá podpora. Vylepšení programu na základě uživatelských návrhů.“

Výrobce:

- ABSignal

Distributor:

- NI, Technical Sales Česká republika

Technická podpora:

- email: [info@absignal.com](mailto:info@absignal.com)

Ceny a licence:<sup>17</sup>

- základní jednouzivatelská licence kupující zaplatí 122 800,- Kč (platí pro květen 2014). Ceny se neustále mění (prosinec 2013 za 95 100,- Kč; březen 2014 za 118 800,- Kč). Možnost uplatnění akademické slevy (neplatí pro Mexiko, Střední východ, Severní Afriku a členské státy GCC). ModalVIEW vyžaduje LabVIEW runtime engine
- pro získání bezplatné zkušební licence je třeba na email [sales@absignal.com](mailto:sales@absignal.com) zaslat ID počítače. Uživateli bude pak zpětně zaslán zkušební licenční kód

---

<sup>15</sup> ABSignal [1]

<sup>16</sup> National Instruments [16]

<sup>17</sup> National Instruments [16]

## 2.3 PULSE Reflex Modal Analysis Type 8721<sup>18</sup>

Použití:

- vizualizační nástroj
- post-processingový nástroj určený pro klasickou modální analýzu, která je založena na rázovém a vibračním testování

Vlastnosti:

- mono/poly reference
- odhad modální parametrů
- možnost provést korelační analýzu (CoMAC), například korelaci dvou modelů. To umožňuje vytvářet analýzu a dokumentaci dynamických vlastností struktury tělesa a zajišťuje tak přesné a spolehlivé výsledky.
- vestavěný návrhářský modul pro tvorbu 2D/3D CAD model
- import geometrie z externích programů v datových formátech, jako je UFF, CSV, DXF a další
- manuální/automatické prokládání modelu sítě bodů, v nichž probíhá vizualizace
- nástroje pro rychlé vyhledávání, třídění a filtrování velkého množství dat
- generování reportů. Výsledky analýzy, včetně geometrie, všech použitých tabulek s hodnotami a doplňujících textů lze vygenerovat a uložit. Reporty mohou mít formu standardních vestavěných šablon, nebo se mohou vytvořit přímo v Microsoft Word, Excel a PowerPoint.
- není multiplatformní. Podporuje pouze OS od společnosti Microsoft, což může být pro uživatele Linux a MAC zařízením limitujícím faktorem. Naproti tomu, díky podpoře ze strany Microsoftu, lze prostřednictvím Visual Basic vyvíjet zakázkové řídicí programy.
- funkce, které nejsou implicitně v PULSE Reflexu dány, lze doprogramovat pomocí programovacího jazyka PULSE v textovém editoru a následně je zkompilovat
- díky aplikování tohoto SW v praktické části této práce je možné posoudit i celkovou intuitivnost ovládání, která by měla být dle všech propagačních materiálů na výborné úrovni. Opak je však pravdou. Během používání programu jsme narazili na několik nedostatků: odezva programu při práci je někdy neúnosná (testováno na Intel Core I5, 2.26 GHz, 3MB L3 cache, 6GB Memory), postup návrhu modelu a propojení s importovanými daty je poměrně komplikovaný, časté pády programu, problémy s načítáním interní databáze projektů (program bez ní nelze spustit), atd.
- pro měření vibrací je nasnadě použít SW PULSE Reflex Core, který zaručí plnou kompatibilitu se simulačním SW PULSE Reflex
- část SW je přeložena do češtiny

---

<sup>18</sup> Brüel & Kjær [4]

Reference:

- ISUZU (viz <http://www.bksv.com/newsevents/news/isuzu>)
- VOLVO (viz <http://www.bksv.com/doc/bo0474.pdf>)
- Vysoké učení technické v Brně
- video: (viz <http://youtu.be/mPhiTqoVXKE>)

Výrobce:

- dánská společnost Brüel & Kjær, která se již více jak 65 let zabývá měřením a analýzami hluku a vibrací v domácnostech, továrnách a lokálních prostředích

Distributor:

- Spectris Praha, která v ČR software nejen prodává, ale pořádá i řadu školení a seminářů zabývajících se oblastí zvuku, vibrací a měřicích přístrojů

Technická podpora:

- vyžaduje registraci uživatele

Ceny a licence:<sup>19</sup>

- základní cena PULSE Reflex Modal Analysis Type 8721 pro jednoho uživatele je 435 450,- Kč
- možnost slevy pro akademickou půdu

## 2.4 ME'scope VES 5.0<sup>20</sup>

Použití:

- průmyslový 3D animační nástroj pro získávání a post-processingové zpracování dat vibrací, akustiky a pevnosti strojů, konstrukcí a materiálů
- modální analýza (FRF, operační), vibro-akustická analýza, dynamické modelování a simulace, strukturální dynamické modifikace, experimentální, analýza metody konečných prvků (FEA)

Vlastnosti:

- využívá multikanálových experimentálních údajů, s časovou nebo frekvenční doménou, získaných během provozu stroje nebo statického/dynamického zatížení konstrukce
- obsahuje interpolační funkce (MDOF - polynomiální prokládání křivek), které dopočítávají hodnoty chybějících bodů ze známých hodnot v jejich okolí
- frekvence a útlum zobrazeny v grafu indikace módu
- zajištění modálního kritéria (MAC) – numerické porovnání páru tvarů. Pokud je hodnota kritéria větší než 0.9, pak se jedná o podobné tvary, je-li menší než 0.9 jsou tvary odlišné a pro hodnotu 1.0 jsou tvary identické. Hodnoty MAC jsou zobrazeny jak v tabulce, tak v 3D sloupcovém grafu.
- používá překladač pro import dat z více než 60 různých datových souborů třetích stran. Import a export modálních parametrů ve formátu \*.uff.

---

<sup>19</sup> Emailová korespondence s Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D. [9]

<sup>20</sup> Polytec [17]

- disponuje řadou kreslicích nástrojů pro tvorbu 3D modelů testovaných struktur, za účelem zobrazení jejich tvarů v animacích. Jednotlivé elementy struktury jsou kresleny pomocí interaktivních tahů objektů. Ty mohou být následně editovány v tabulkách.
- práci při návrhu usnadňuje kreslicí asistent
- případně lze použít i vestavěné knihovny s předdefinovanými 3D modely, importovat model z internetového obchodu nebo využít kompatibility s programem Photo Modeler, který model vytvoří z digitální fotografie.
- možnost napsat programy, které automaticky provádí sekvence příkazů v oknech otevřeného projektu. Vstupní parametry, které se zadávají ručně, lze načíst z předem definované tabulky. Sekvence je tak možné jednoduše aplikovat na několik vstupních dat. Programy se uplatní v linkových kvalifikačních testech, či kontinuálním strukturálním a strojním monitorování.
- internetová uživatelská podpora. Registrovaní uživatelé tak mají neustálý přístup k instruktážním dokumentům, tréninkovým videím a posledním aktualizacím softwaru.
- prostřednictvím Digital Movie se zaznamenávají jakékoliv animace v rámci programu ME'scope, a to do formátu \*.avi nebo \*.wmv
- reporty se pak vytváří v PowerPointu, Wordu nebo ve formě internetových stránek

#### Reference:

- Volkswagen Wolfsburg, Porsche Weissach
- video: Impact Testing for Modal Analysis (viz <http://youtu.be/tBRjPN8m6zE>)
- brožura: (viz <http://issuu.com/vibranttechnology/docs/brochure2012>)

#### Výrobce:

- Vibrant Technology, Scotts Valley, California

#### Distributor:

- nemá Českého distributora, alternativy: Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH (D), Acsoft Ltd. (GB), Brüel&Kjær (DK)

#### Technická podpora:

- tutoriál: (viz [http://issuu.com/vibranttechnology/docs/mescopesves\\_tutorial](http://issuu.com/vibranttechnology/docs/mescopesves_tutorial))
- email: [support@vibetech.com](mailto:support@vibetech.com)

#### Cena a licence:

- ceny nejsou dostupné online a distributor nereagoval na emaily

## 2.5 ARTeMIS Modal<sup>21</sup>

Použití:

- Ambient Response Testing and Modal Identification Software, neboli software pro testování odezev a modální identifikaci
- uplatnění v případě testování rotujících strojů, jako jsou například motory, čerpadla, vrtule, větrné turbíny nebo generátory, a to za plného provozu stroje (tzv. in-situ) – online analýza.

Vlastnosti:

- 3 stupně funkčního vybavení
  - Modal - pro základní modální analýzu
  - Modal STD - pro standardní modální aplikace
  - Modal Pro - flexibilní pro všechny aplikace
- uživatelské prostředí je velmi podobné (téměř identické) tomu, které je použito v PULSE Reflexu
- tvorba reportů (grafy, tabulky), které jsou propojeny s kancelářským balíkem Microsoft Office, a to s programy Word, Excel a PowerPoint, s možností využití předdefinovaných šablon
- signal processing – filtry (dolno/horno propustní, pásmová propust, Butterworth, atd.), digitální anti-aliasing filtr, spektrální odhad pomocí FFT
- geometrie se vytváří přímo v programu nebo se importuje z externích programů s možností následné modifikace (\*.uff, \*.unv, \*.svs)
- propojení importovaných měřených dat s uzly geometrie se provádí metodou „drag&drop“ nebo přímým editováním, v obou případech s automatickou identifikací referenčního kanálu
- uspořádání měřených dat do vhodné testovací sady a editace signálů (ořezávání, atd.) před samotnou analýzou
- import \*.uff, \*.txt, \*.svs
- export do formátu \*.svs ve tvaru: NODE / X-ABS / X-ANG / Y-ABS / Y-ANG / Z-ABS / Z-ANG
- export do formátu \*.uff ve tvaru: reálná a imaginární část

Modal STD:

- harmonická detekce využívající rychlé a rozšířené analýzy špičatosti
- animace fyzického chování v uživatelsky zvolené frekvenci
- ukládání specifického ODS tvaru, zobrazení unscaled/scaled ODS tvaru, porovnání odhadovaných a importovaných módů
- porovnání komplexnosti módu
- zajištění modálního kritéria
- interpolační funkce: curve-fit frekvenčního rozkladu (CFDD), rozšířený frekvenční rozklad (EFDD), animace tvarů módu top/bottom, animace tvarů

---

<sup>21</sup> SVIBS [23]

módu „side-by-side“, animace rozdílových tvarů módu, animace překrytých tvarů módu

#### Modal Pro:

- k funkcím modálního odhadu ještě přidává podmíněný odhad s důrazem na uživatelem definované množství fyzických módů a potlačení zbývající části informací v datech (crystal clear SSI). Dojde tak k odstranění rušivých módů uvnitř viditelného frekvenčního rozsahu.
- SSI-UPC (Unweighted Principal Component), SSI-PC (Principal Component ), SSI-CVA (Canonical Variate Analysis ), SSI-UPC-Merged (Unweighted Principal Component Merged Test Setups)

#### Reference:

- Brüel & Kjær Sound and Vibration A/S, Siemens AG, Fraunhofer LBF, Bureau Veritas, Weidlinger Associates Ltd.
- video: (viz [http://www.svibs.com/download/flash/2013/ARTEMIS\\_Modal\\_Flash/ARTEMIS\\_Modal\\_Flash.html](http://www.svibs.com/download/flash/2013/ARTEMIS_Modal_Flash/ARTEMIS_Modal_Flash.html))

#### Výrobce:

- dánská firma Structural Vibration Solutions A/S

#### Distributor:

- Structural Vibration Solutions A/S

#### Technická podpora:

- email: [support@svibs.com](mailto:support@svibs.com)
- help: [www.svibs.com/resources/ARTEMIS\\_Modal\\_Help/WebFrame.html](http://www.svibs.com/resources/ARTEMIS_Modal_Help/WebFrame.html)

#### Ceny a licence: <sup>22</sup>

- na výběr je ze dvou typů licencí, a to trvalá nebo pronájem na jeden rok
- licenční klíč je standardně vázán na jedno HostID (tzn. jeden počítač), avšak je tu i možnost zakoupit USB klíč za příplatek 600 EUR (cca. 16 512,-Kč) a nainstalovat SW na několik počítačů, ale ve stejnou dobu lze pracovat pouze na jedné stanici
- pro akademickou půdu je nabízena 50% sleva na všechny výše zmíněné verze
- po vyplnění formuláře na stránkách výrobce možnosti získat 30ti denní zkušební licenci

Tab. 1.: Přehled cen licencí SW ARTEMIS<sup>23</sup>

	<b>ARTEMIS Modal</b>	<b>ARTEMIS Modal STD</b>	<b>ARTEMIS Modal Pro</b>
Perpetual license	1 950 EUR	3 975 EUR	7 950 EUR
1 Year Rent	683 EUR	1 391 EUR	2 783 EUR

<sup>22</sup> Emailová korespondence s Herdis Nielsen [8]

<sup>23</sup> Emailová korespondence s Herdis Nielsen [8]



## 2.6 DATS Modal Analysis<sup>24</sup>

Použití:

- vizualizační software
- sběr dat (Impact Hammer Analysis)

Vlastnosti:

- frekvenční odezvové funkce (FRF)
- měření strukturálních odezev s detekcí dvojího rázu, automatické průměrování
- nastavení: frekvenčního rozsahu a rozlišení, síly a exponenciálního okna, počtu průměrů na měřený bod
- experimentální modální analýza (EMA) a provozní modální analýza (OMA)
- identifikace modálních parametrů (vl. Frekvence, tlumící faktor, modální amplitudy), FRF syntéza pro modální parametry
- alternativní prokládání křivkami (SDOF, MSDOF & MDOF, ERA-DC)
- stabilizační diagram
- animace ve frekvenční nebo časové doméně
- 2D a 3D vizualizace v programu DATS Structural Animation package
- neměřené odezvy mohou být interpolovány z konvoluce regenerovaných FRFs, a to buď ze simulace, nebo známých odezev
- vestavěný editor modelu
- import modelu z: NASTRAN, \*.csv, \*.uff

Reference:

- Ford UK, Volkswagen, Volvo, TUV, Honeywell, NASA
- University of Nottingham
- video: Hammer Impact Testing (viz [http://youtu.be/YrCM3H0\\_NpE](http://youtu.be/YrCM3H0_NpE))
- video: Modal animation (viz <http://youtu.be/836Oyn6xqK0>)

Výrobce:

- Prosig

Technická podpora:

- fórum: <http://prosig.com/user-support/>
- kontakt: <http://support.prosig.com/contact-us/>

Distributor:

- Prosig (DE), Prosig (UK)

Ceny a licence:

- ceny nejsou veřejně dostupné

---

<sup>24</sup> Prosig [18]

## 2.7 SolidWorks Simulation Premium<sup>25</sup>

Použití:

- simulační nástroj

Vlastnosti:

- hardwarová nenáročnost, příjemné a intuitivní uživatelské rozhraní
- řešení nelineárních úloh, lineární dynamiky a kompozity
- analýzy: vibrační, drop test frekvenční, tepelná strukturální, lineární pevnostní, strukturální, plastových a pryžových částí a metoda konečných prvků
- iOS aplikace eDrawings Pro pro iPad (lze zakoupit v App Store společnosti Apple) umožňuje prohlížet soubory s návrhy produktů a zobrazovat tak 3D modely 1:1 do reálného kontextu za pomoci kamery
- k dispozici je několik kreslicích a konfiguračních nástrojů pro případné úpravy modelu
- pro simulace se využívá 3D CAD modelů. Bez dalších úprav 3D modelu je možné zobrazit analýzu 2D řezu.
- každoroční aktualizace s mnoha rozšířeními a vylepšeními, která vznikají na základě podnětů uživatelů
- získal několik mezinárodních ocenění
- několik poboček distributora v ČR a SK – rychlá technická podpora
- celý SW je přeložen do češtiny

Reference:

- Robert Bosch, Garmin, Vysoké učení technické v Brně
- video: Vibration Analysis (viz <http://youtu.be/ygivXDQiEXU>)

Výrobce:

- SolidWorks - Waltham, Massachusetts, USA

Technická podpora:

- help:  
[http://help.solidworks.com/2014/Czech/SolidWorks/sldworks/c\\_introduction\\_to\\_plevel\\_topic.htm](http://help.solidworks.com/2014/Czech/SolidWorks/sldworks/c_introduction_to_plevel_topic.htm)

Distributor:

- autorizovaným prodejcem softwarů SolidWorks a SolidCam pro Českou republiku je společnost SolidVison, která získala i status Autorizované školící a testovací centrum a centrum technické podpory

Ceny a licence:

- 3 komerční verze (SolidWorks, SolidWorks Professional, SolidWorks Premium)
- 3 výukové verze (SolidWorks Student Design Kit, SolidWorks Education Edition, SolidWorks Student Edition)
- zkušební verze zdarma
- ceny viz *Tab. 2*

---

<sup>25</sup> Solidvision [21]

Tab. 2.: Přehled cen licencí SW SolidWorks<sup>26</sup>

	SolidWorks Standard	SolidWorks Professional	SolidWorks Premium
Cena	\$3,995.00	\$5,490.00	\$7,995.00

## 2.8 ANSYS<sup>27</sup>

Použití:

- simulační software

Vlastnosti:

- import dat v textovém formátu
- podpora většiny CAD nástrojů (IGES, Parasolid, ACIS a STEP)
- automatická tvorba sítě (body-by-body meshing) – čtyřboké, šestihranné, inflační vrstvy
- řada nastavení pro síť – povrch, velikost hran, sféra vlivů, atd.
- automatická detekce kontaktů a spojů mezi částmi sestavy
- numerické metody pro řešení nelineárních úloh – nelineární kontroly konvergence, kontaktní diagnostika, nelineární diagnostika, 2D rezoning, nelineární stabilizace, lineární odchylka
- rozsáhlý post-processing – řezy geometrie, max/min hodnota, atd.
- reporty do textového souboru nebo tabulky
- pro každý výsledek nebo okrajovou podmínku lze vytvořit vlastní graf
- rozšíření možností aplikací - psaní maker s využitím jazyka ANSYS Parametric Design Language
- analýzy – statické, modální, harmonické, tranzientní, spektrální, náhodného buzení, vzpěrné stability, teplotní, sdružené (teplotně-strukturální, akusticko-strukturální, teplotně-elektrické, elektro-mechanické, piezoelektrické, akustické)

Reference:

- Kato Engineering, Siemens
- video: Modal Analysis (viz [http://youtu.be/XhoxTchLO\\_c](http://youtu.be/XhoxTchLO_c))

Výrobce:

- ANSYS Inc., Pennsylvania, USA

Distributor:

- SVS FEM s.r.o., ANSYS Channel partner pro Českou republiku a Slovensko (prodej, instalace, školení, technická podpora)
- TechSoft Engineering s.r.o.

Ceny a licence:

- ceny nejsou dostupné online

<sup>26</sup> ModerntechStore [15]

<sup>27</sup> ANSYS [2]

## 2.9 Souhrnný přehled SW

Tab. 3.: Přehled SW I.

Vlastnosti	COMSOL	SolidWorks	ModalVIEW
Vizualizace	✓	×	✓
Simulace	✓	✓	×
Freeware	×	×	×
Shareware	✓	✓	✓
Tvorba reportů	✓	✓	✓
Na trhu [roky]	14	21	6
Reference	CERN, VUT	Robert Bosch, Garmin	AUQATURBO, Qring Technology AB
Ústředí	Švédsko	Waltham, Massachusetts, USA	Čína
Podporované OS	Windows/Mac/ Linux/Solaris	Windows	Windows
Import	CAD, *.txt	*.dat/CAD	*.uff/ASCII/CAD
Export	*.txt/*.xls/ video	*.doc/*.xls/ *ppt/*.txt	*.avi/reporty
Jazyk	ENG	ENG/CZE	ENG
Cena [Kč]	257 980,-	134 245,-	118 800,-

Pozn.: Informace značené symbolem „-“ nebyly z veřejných zdrojů dostupné

Tab. 4.: Přehled SW II.

Vlastnosti	PULSE Reflex	Vibrant ME'scope VES Polytec	ARTEMIS Modal
Vizualizace	✓	✓	✓
Simulace	×	×	×
Freeware	×	×	×
Shareware	✓	✓	✓
Tvorba reportů	✓	✓	✓
Na trhu [roky]	5	23	15
Reference	VOLVO, ISUZU	Volkswagen Wolfsburg, Porsche Weissach	Siemens AG, Fraunhofer LBF, Bureau Veritas,.
Ústředí	Dánsko	California	Dánsko
Podporované OS	Windows	Windows	Windows
Import	*.uff/*.csv/*.str/CAD	*.uff/*.dat/*.buff	*.uff/*.unv/*.hdr/*.ghf/ *.dat/*.csv/*.evt/*.asc
Export	*.avi/*.doc/*.xls/*.ppt	*.avi/*.wmv/ ASCII/ Word	*.avi/*.svs/ ASCII/ *.ppt
Jazyk	ENG/CZE	ENG	ENG
Cena [Kč]	435 450,-	-	53 420,-

Pozn.: Informace značené symbolem „-“ nebyly z veřejných zdrojů dostupné

Tab. 5.: Přehled SW III.

Vlastnosti	ANSYS	DATS
Vizualizace	×	✓
Simulace	✓	✓
Freeware	×	×
Shareware	✓	✓
Tvorba reportů	✓	✓
Na trhu [roky]	44	37
Reference	Kato Engineering Siemens	NASA, Volvo, Ford
Ústředí	USA	Velká Británie
Podporované OS	Windows	Windows
Import	CAD, *.txt	NASTRAN, *.csv, *.uff
Export	*.doc/*.xls	*.doc, *.xls
Jazyk	ENG	ENG
Cena [Kč]	-	-

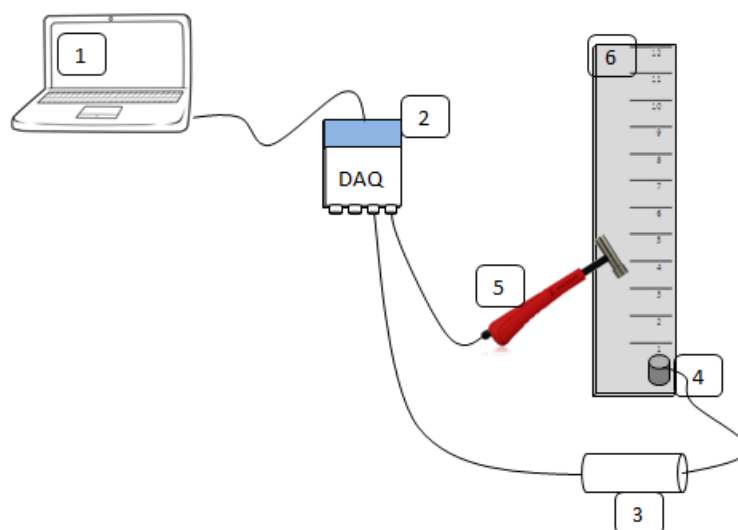
Pozn.: Informace značené symbolem „-“ nebyly z veřejných zdrojů dostupné

## 3 MĚŘENÍ

Tato kapitola se zabývá praktickou částí projektu. Obsahuje mj. soupis použitého HW a SW, včetně návodu k jejich obsluze. Níže je také částečně popsáno blokové schéma použitého měřicího softwaru.

### 3.1 Zapojení měřicí aparatury

Pro buzení struktury bylo použito rázové kladívko (impact hammer) Endevco s modelovým označením 2302-5. Ke snímání odezev se využilo akcelerometru KD91, který se za pomoci vosku pevně připevnil k měřené struktuře. Aby výstup akcelerometru byl dostatečně silný, přidává se k němu nábojový zesilovač MMF 7007 JCP120 se zesílením 10mV/pC. Propojení výpočetní techniky se čtyřkanálovou měřicí kartou DAQmx od společnosti National Instruments se uskutečnilo prostřednictvím USB kabelu. Schéma zapojení měřicí aparatury je zobrazeno níže.



Obr. 2.: Schéma zapojení měřicí aparatury

1. PC s měřicím a vizualizačním SW
2. Čtyřkanálová měřicí karta NI DAQmx
3. Nábojový zesilovač (10mV/pC)
4. Akcelerometr
5. Rázové kladívko (reference)
6. Měřená struktura s rozvržením měřených bodů

### 3.2 Příprava měřené struktury

Na nosníku je třeba rozvrhnout několik měřených bodů. Jejich počet musí být takový, aby měřená data dostatečně popisovala nosník a modální analýzu pak bylo možné

věrohodně zobrazit ve vizualizačním programu. Při návrhu rozmístění bodů se musí pamatovat i na to, aby se snímač odezvy nenacházel v uzlech budícího signálu.

Aby nedocházelo k výraznému útlumu budícího signálu, umístí se nosník na optimálně tvrdou (např. molitanovou) podložku, která nahradí volné uložení.

### 3.3 Programové vybavení LabVIEW

Celý proces zpracování dat probíhal v rámci programového vybavení LabVIEW od společnosti National Instruments. Pro měření bylo použito LabVIEW ve verzi 2013 a byly nainstalovány následující komponenty:

- NI LabVIEW Core Development Suite
  - LabVIEW Core Professional Development System (PDS) for Windows (v.: 2013)
  - LabVIEW Digital Filter Design Toolkit (v.: 2013)
  - NI-DAQmx (v.: 9.7.5)
- Signal Processing and Communications Option
  - LabVIEW Adaptive Filter Toolkit (v.: 2013)
  - LabVIEW Advanced Signal Processing Toolkit (v.: 2013)
  - LabVIEW Spectral Measurements Toolkit (v.: 2.6.4)
  - LabVIEW Sound and Vibration Measurement Suite (v.: 2013)

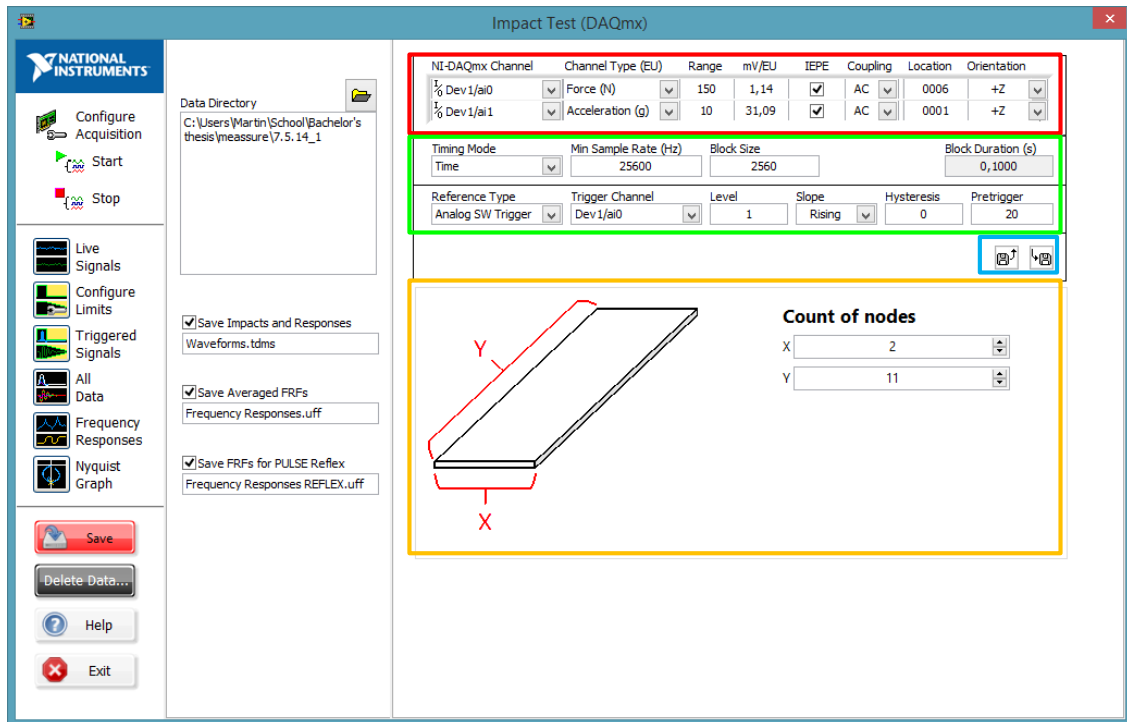
Po nainstalování LabVIEW je nezbytné do systému přidat i ovladače měřicí karty. U Windows 7 a novějších se ovladače doinstalují automaticky po připojení karty přes USB. Program Impact Test (DAQmx) musí být spuštěn až po připojení měřicí karty.

### 3.4 Program Impact Test (DAQmx)

SW pro záznam odezvy, naprogramovaný v jazyce G, byl převzat z NI šablon, které jsou součástí toolboxu Sound and Vibration Measurement Suite. Pro tento případ zkoumání modální analýzy je plně dostačující. Byl pouze modifikován tak, aby bez dalších nadbytečných operací s naměřenými daty spolupracoval s vizualizačním softwarem PULSE Reflex. Uživateli je tak usnadněn a zpřehledněn měřicí řetězec.

Ovládání programu je poměrně snadné. Po jeho spuštění je uživatel vyzván k určení místa uložení měřených dat, kde se definuje pouze adresa složky. Původně zde byla i možnost uložení do souboru, ale ta pro tento případ ukládání nebyla použitelná a způsobovala ztrátu měřených dat. Program ukládá celkem 4 soubory zároveň, jejichž výstupním formátem jsou dva soubory s příponou \*.uff, kde soubor s názvem *Frequency Responses* obsahuje data signálů řazená v takovém sledu, v jakém byla měřena, a *Frequency Responses REFLEX*, který data řadí dle automatického rozmístění jednotlivých bodů v modelu struktury. Zbylé dva soubory mají koncovku \*.tdms a \*.tdms\_index. Měřená data projdou v rámci zpracování signálů Fourierovou transformací (signál je převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční).

### 3.4.1 Configure Acquisition



Obr. 3.: Uživatelské prostředí SW Impact Test (DAQmx) – Configure Acquisition

V záložce konfigurace se nastavují vstupy měřicí karty (■) a SW trigger (■). Nastavení vstupů a triggeru je možné uložit pro budoucí použití tlačítkem diskety (■). Konfigurační soubor je též součástí přílohy. Nastavení při použití výše zmíněné HW konfigurace by mělo být následující: první řádek konfigurační tabulky je vyhrazen pro parametry rázového kladívka. NI-DAQmx Channel volit dle fyzického zapojení Endevo do měřicí karty. Channel Type (EU) :: Force(N), Range :: 150, mV/EU :: 1.14, Coupling :: AC. Při nastavování akcelerometru je postup obdobný. Je však nezbytné nutné, aby na prvním řádku byl umístěn budící kanál a na následujícím řádku kanál odezvy, čímž se zajistí správné uložení dat, a tedy i korektní zobrazení průběhu signálů na modelu. Channel Type (EU) :: Acceleration (g), Range :: 10, mV/EU :: 31.09, Coupling :: AC. Parametry byly vyčteny z datasheetů použitých snímačů, tedy při použití jiných snímačů se nastavení s největší pravděpodobností bude lišit. U obou vstupů povolit externí napájení - zaškrtnout IEPE a nastavit souhlasnou orientaci - nejlépe Z+. Orientace směru buzení a odezvy je v PULSE Reflex defaultně nastavena na +Z (2D model leží v rovině XY). Pokud by tedy uživatel zvolil jinou orientaci, musí navrhnout i model v Reflexu tak, aby ležel v odpovídající rovině. Pozice akcelerometru (location) je defaultně nastavena na hodnotu 0001. U rázového kladívka se hodnota pozice mění manuálně dle pozice aktuálního buzení na struktuře (podrobněji bude pojednáno níže).

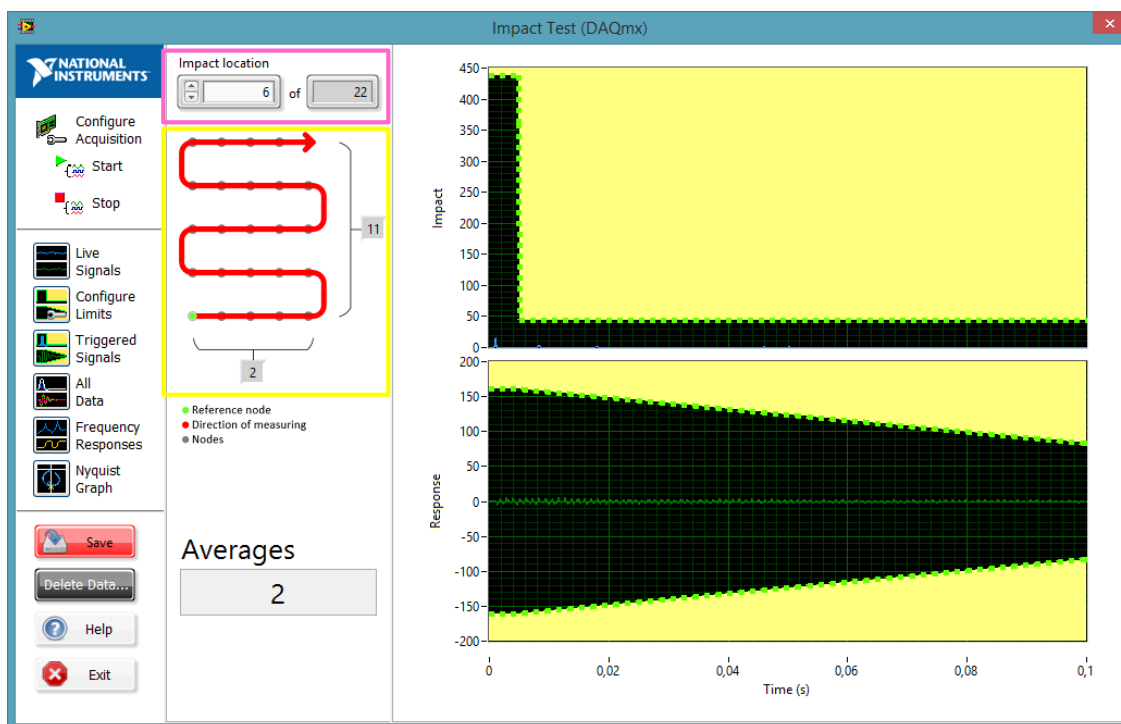
Timing Mode :: Time, Min Sample Rate(Hz) :: 25600, Block Size :: 2560. Aby nedocházelo k zaznamenávání nepotřebných dat (tzn. dat, kdy strukturu externě



nebudíme) použije se analogového softwarového trigeru. Trigger Channel bude stejný jako Channel rázového kladívka. Level :: 1, Slope :: Rising, Hysteresis :: 0, Pretrigger :: 20. Pokud se v nastavení vstupů objevila chyba, signalizovaná červeným symbolem s vykřičníkem a nápisem *Configuration Error*, je třeba zkontrolovat nastavení kanálů a rozsahů.

Ve stejné záložce je ještě možné definovat názvy datových souborů, adresu uložení souborů a počet měřených bodů na struktuře. Právě počet měřených bodů (■) je modifikací původního programu. Tato volba byla přidána z důvodu lepší orientace při měření a zároveň zajišťuje kompatibilitu s PULSE Reflex. Jak již bylo řečeno, rozměr je dobré volit tak, aby měření dostatečně zachytilo chování struktury. Body tedy musí být rovnoměrně rozloženy – ve vzorovém případě bylo použito X :: 2 a Y :: 11. Stejný počet bodů pak obsahuje model ve vizualizačním SW.

### 3.4.2 Triggered Signals



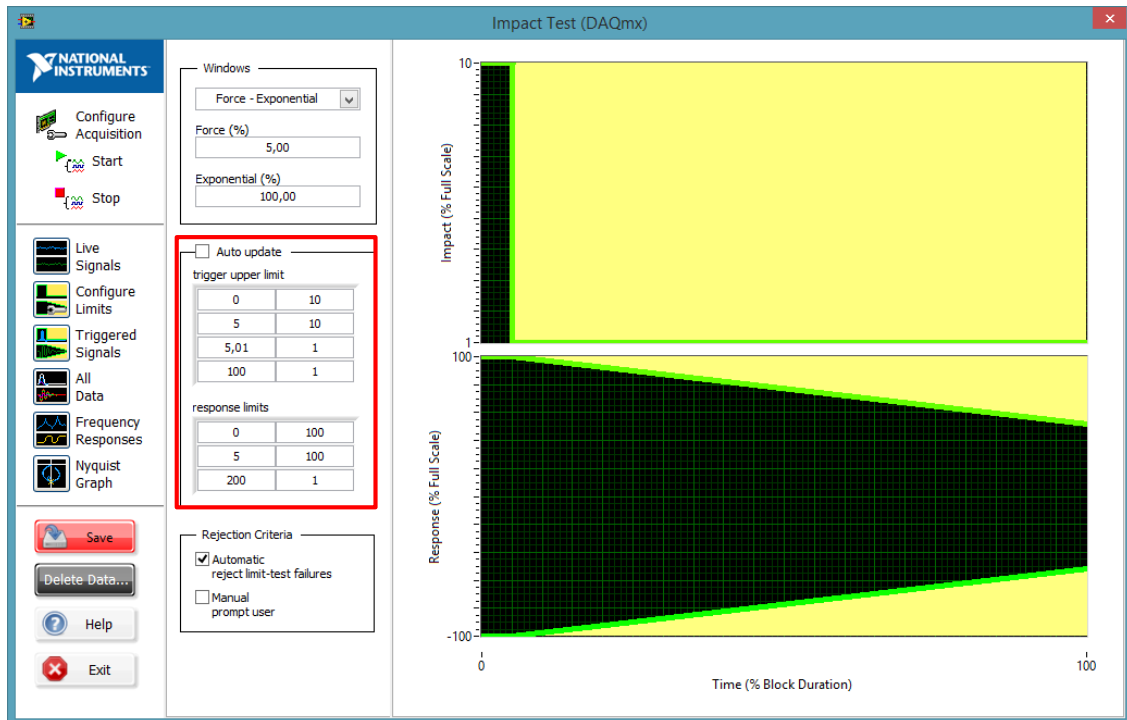
Obr. 4.: Uživatelské prostředí SW Impact Test (DAQmx) – Triggered Signals

Další změnou prošla záložka *Triggered Signals*, kde přibyl nový ovládací prvek sloužící ke změně lokace úderu kladívkem (■). Ovládací prvek lokace neumožní překročení limitu uvedeného ve vedlejším indikátoru, který informuje uživatele o celkovém počtu měřených bodů – počet, který si uživatel nadefinoval pomocí XY rozměrů v záložce *Configure Acquisition*. Hodnota logicky odpovídá součinu prvků X a Y.

Níže se nachází ilustrační obrázek (■), který uživateli udává směr buzení na struktuře. Tento směr musí být zachován, neboť při jeho nedodržení by program nemohl správně uložit výstupní formát dat pro vizualizační SW PULSE Reflex. Zelený bod na

obrázku přísluší umístění akcelerometru (lokace 0001), šedé body jsou místa úderů kladívkem. Po stranách obrázku jsou opět indikátory rozměrů měřené struktury.

### 3.4.3 Configure Limits



Obr. 5.: Uživatelské prostředí SW Impact Test (DAQmx) – Configure Limits

Program je též vybaven sledováním kvality obou vstupní signálů, a to prostřednictvím limit. Budící signál by měl mít v ideálním případě tvar jednoho peaku, bez dalších záchvěvů v celém průběhu. Lze toho dosáhnout, ale vyžaduje to opravdu velké úsilí a trpělivost. Signál odezvy má při proložení dominantních peaků tvar klesající exponenciální funkce. Pokud alespoň jeden ze signálů překročí nastavené limity, data nejsou zaznamenána a uživatel je varován červenými LED indikátory na frontpanelu.

Defaultní nastavení limitu odezvového signálu je vzhledem k velké době doznívání vibrací nevyhovující. Jeho přenastavení se provede v tabulce *response limits* (■), v 1. sloupci, 3. řádku – hodnotu nastavit na 200.

### 3.4.4 Ostatní

Záložka *Live Signals* obsahuje dva displeje pro sledování online průběhů obou vstupních signálů. V *All Data* si uživatel může prohlédnout naměřená data pro jednotlivé lokace buzení. Stejně tak je tomu v *Frequency Responses*, kde jsou signály zobrazeny ve frekvenční oblasti. Konkrétně zde lze sledovat amplitudu (buzení/odezvy), fázi a koherenci signálů. Poslední záložkou je *Nyquist Graph*.

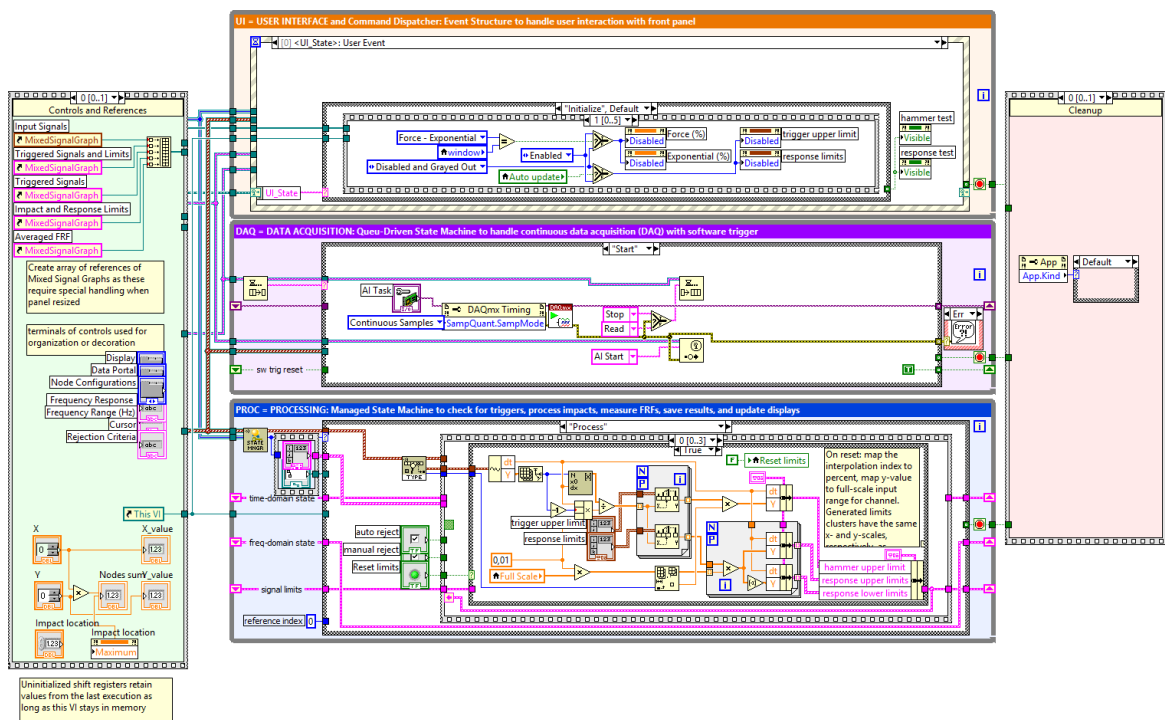
Vlevo pod záložkami jsou ještě 4 tlačítka: *Save* pro uložení všech naměřených signálů (uloženy budou pouze ty výstupní formáty, který byly zvoleny v záložce

Configure Acquisition), Delete data... pro vymazání (dat posledního úderu/dat konkrétní lokace/všech dat všech lokací), Help pro nápovědu a Exit pro ukončení programu.

### 3.4.5 Blokové schéma


Jak již bylo řečeno, program je vytvořen v jazyce G, který má za úkol programátorovi zpřehlednit strukturu VI a usnadnit tak práci při návrhu. Každý program se skládá ze tří komponent: čelní panel (popsán výše), blokové schéma a panel konektorů. Část blokového schématu je možné vidět na Obr. 6. Je složen ze 3 while cyklů a dvou sekvencí.

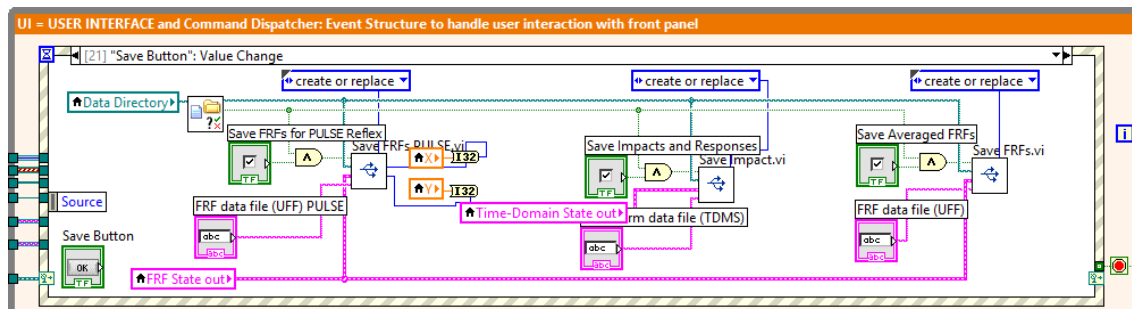
Levá sekvence slouží k inicializaci programu. Je vykonána pouze jednou, a to při spuštění VI-čka. Horním oranžovým while se řídí uživatelské prostředí – obsahuje několik event-case bloků, zpracovávají se zde všechny pokyny od uživatele. Prostřední fialový while zaznamenává signály z měřicí karty. Spodní modrý while zpracovává naměřená data (průměrování, převedení do frekvenční oblasti, atd.). Pravá sekvence se provede při vypnutí programu, kdy dojde k ukončení všech operací související s programem.



Obr. 6.: Blokové schéma SW Impact Test (DAQmx)

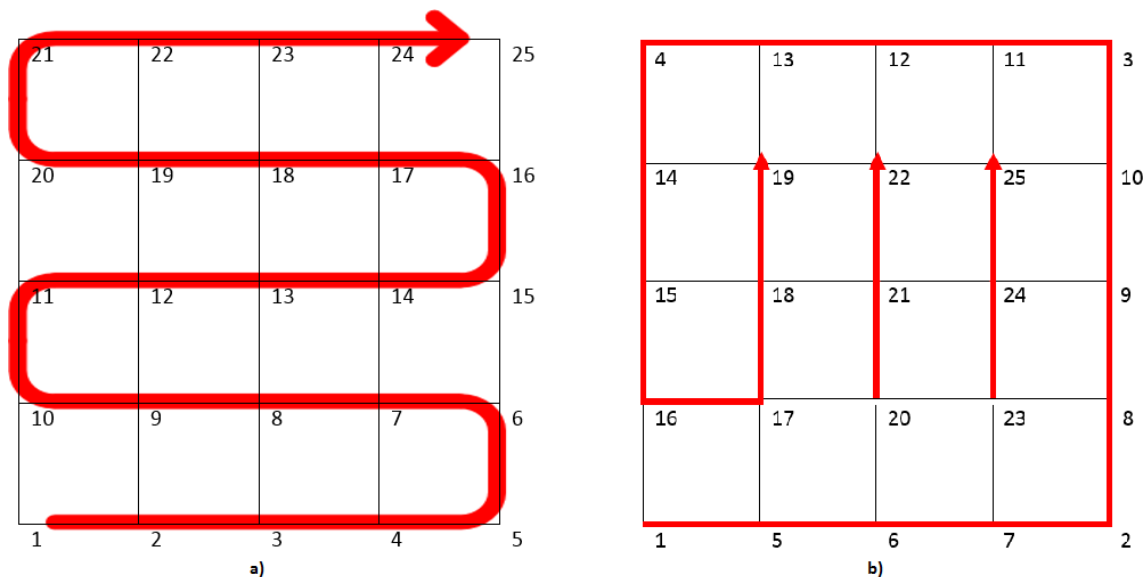
Za zmínku ještě stojí proces ukládání dat, který je znázorněn na Obr. 7. Kód byl přidán do while cyklu pro řízení uživatelského rozhraní, a to především z důvodu potřeby uložení dat až po proměření všech definovaných bodů struktury. Původní program totiž ukládal data kontinuálně (ihned po správném úderu a odezvě), avšak této metody zde nebylo možné použít. Proces započne při stisku tlačítka Save na

frontpanelu. Bločky s tímto symbolem  jsou subVI, která byla vytvořena jednak za účelem úspory místa v programovatelné ploše, jednak kvůli specifickému ukládání dat každého z nich. 1. a 3. bloček ukládají data ve formátu \*.uff, rozdílem je pouze indexace jednotlivých lokací. Výstupem prvního bločku jsou data pro PULSE Reflex, prostřední ukládá data v časové doméně ve formátu \*.TDMS a poslední ukládá data opět ve frekvenční doméně, ale s původní indexací (ve sledu měření).



Obr. 7.: Blokové schéma SW Impact Test (DAQmx) - Ukládání dat

Původní řetězec pro získání vizualizace měřených dat byl zatížen o nezbytný a komplikovaný proces přeindexování bodů 2D modelu a nastavování přiřazení importovaných signálů jednotlivým bodům. Příčinou byla specifická metoda automatické tvorby rozložení bodů v mřížce na modelu ve vizualizačním softwaru PULSE Reflex (viz Obr. 8 b)).




Obr. 8.: Rozložení bodů v mřížce - a) ve sledu měření, b) dle PULSE Reflex


Možnými řešeními bylo: budit strukturu dle rozvržení bodů v PULSE Reflexu, manuálně vytvořit mřížku ve vizualizačním softwaru, anebo ukládací proces doplnit o korekční funkci. První varianta je nepřehledná. Uživatel by se neustále musel soustředit na nastavenou lokaci buzení a rozvržení bodů ve struktuře. Druhá varianta je vhodná pouze pro mřížky malých rozměrů, kde by se jednotlivé body mřížky vkládaly ručně. Proto byla zvolena možnost poslední – naprogramování korekční funkce. Vzhledem

k tomu, že souběžně s tímto projektem probíhal ještě jeden projekt (TOMEK, T. *Bezkontaktní měření provozních tvarů kmitů*: bakalářská práce) využívající stejných softwarových prostředků, kde se vyskytla stejná komplikace, byla s řešitelem druhého projektu navázána spolupráce za účelem zefektivnění práce. Kolegovi se podařilo navrhnout subVI, které nejprve vytvoří z rozměrů X a Y pole čísel. Pole obsahuje  $X*Y$  prvků a je indexováno od 0. Jednotlivé hodnoty tohoto pole jsou použity jako indexy pole naměřených hodnot, čímž na výstupu dojde k seřazení dat do potřebného sledu. Tento výstup se následně uloží do souboru *Frequency Responses REFLEX.uff*. Data se pak jednoduše importují (viz kap. 4.2) do vizualizačního SW a uživatel může s polovičním počtem úkonů sledovat průběhy signálů na modelu. Nedostatkem tohoto programu je to, že umožňuje měřit jen struktury obdélníkového (resp. čtvercového) půdorysu.

### 3.5 Postup měření

Měřením odezev mechanického systému na buzení rázovým kladívkem za pomoci měřicí karty a programu Impact Test (DAQmx) získáme data potřebná pro vizualizaci modální analýzy v programu PULSE Reflex. Stisknutím tlačítka  Start spustíme samotné měření. Při úderu rázového kladívka do struktury se SW automaticky přepne do záložky *Triggered Signals*, kde je prostřednictvím dvou kontrolních diod signalizována správnost získávaných dat. Svítí-li zeleně, inkrementuje se hodnota *Averages*, data jsou zpracována. Naopak svítí-li červeně, znamená to, že některý ze signálů mohl překročit limity. To je viditelné i v grafech, kde křivky nad meze limitů jsou zobrazeny červeně. Při úderu kladívka se nesmí stát, že se struktury dotkneme více než jednou za velmi krátký časový interval, což se může přihodit například tehdy, odrazí-li se kladívko od struktury a opětovně dopadne. Úder musí být dostatečně silný, ale zároveň nesmí přesáhnout limitu. Strukturu budíme širokopásmovým, impulsním signálem (ráz). Pro zpřesnění měření je vhodné udělat několik průměrů pro jednu lokaci rázového kladívka.

Před měřením v dalším bodě struktury inkrementujeme *Location* rázového kladívka. To lze provést ovládacím prvkem ve stejné záložce, a to pomocí jemu příslušících tlačítek, či manuálním vložení hodnoty. Ovládací prvek sám kontroluje, zda nebyl uživatelsky překročen povolený rozsah hodnot ( $0001 \div X*Y$ ). Při manuálním vkládání hodnoty se však musí dát pozor, aby po přepisu nezůstal v poli aktivní kurzor. Proto je třeba po provedení změny kliknout kurzorem mimo oblast vkládání, jinak se lokace nezmění a měření bude probíhat stále na původní pozici. Že změna nebyla provedena, si můžeme všimnout na hodnotě průměrování, která si při úderu zvýší. Při měření v nově nastavené lokaci se čítač průměrů automaticky nuluje.

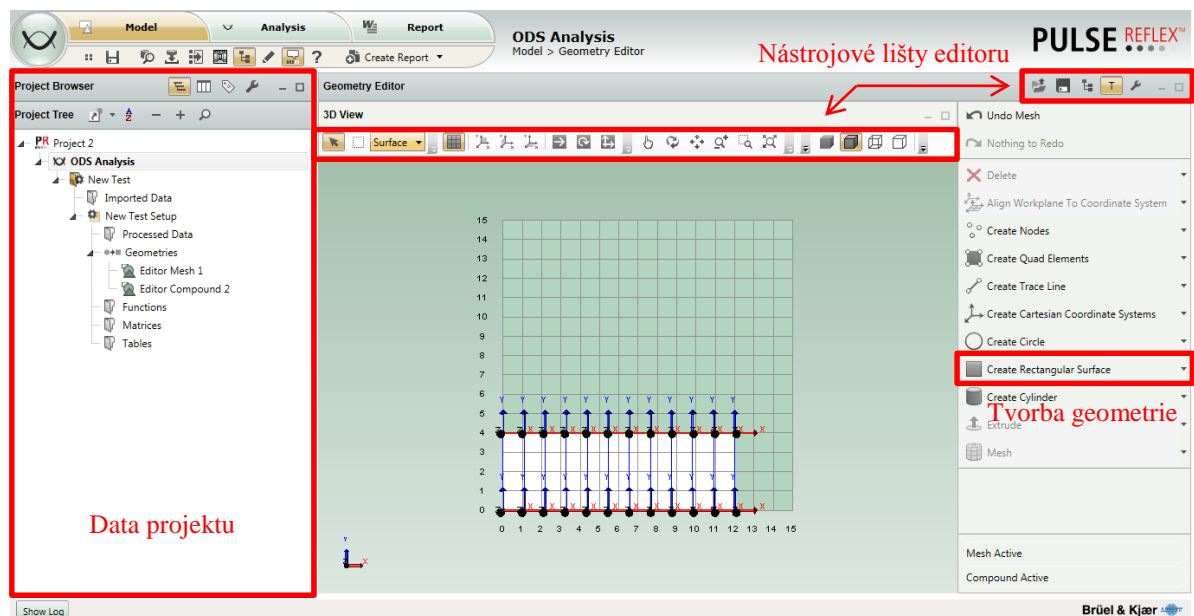
Po proměření celého nastaveného rozsahu bodů struktury stiskneme tlačítko  Stop pro ukončení záznamu. Jednotlivé signály je možné před uložením ještě zkontrolovat v záložkách *All Data* a *Frequency Responses*. Data se uloží tlačítkem *Save*.

## 4 PULSE REFLEX

Pro vizualizaci naměřených dat byl zvolen program PULSE Reflex od společnosti Brüel&Kjær, kde je možné navrhnout model struktury a na něm definovaným bodům přiřadit hodnoty měřených dat, čehož bylo využito v tomto projektu. Samozřejmě je i možnost importu modelu z externího SW ve formátu CAD.

### 4.1 Tvorba modelu

V programu PULSE Reflex vytvoříme nový projekt, a to *Structural Dynamics - ODS Analysis*. Projekt se automaticky uloží do vnitřní databáze programu. Pro export projektu, ať už z důvodu zálohy, či přenosu projektu na jinou výpočetní stanici, se musí kliknout na *Main Menu* - *Projekt - Export projekt*-zvolit projekt a následně definovat výstupní cestu adresáře.



Obr. 9.: Uživatelské prostředí programu PULSE REFLEX - Model

V záložce *Model*, v okně *Geometry Editor* vytvoříme model struktury. V horní liště editoru otevřeme nástroje pro tvorbu geometrie (*Tools for geometry creation*). Pomocí šipky rozvineme nabídku u *Create Circle Surface* a zvolíme *Create Rectangular Surface* a do čtvercové sítě nakreslíme tvar struktury (pro simulaci byl použit obdélník o rozměrech 11x4 v rovině Z+) a v nástrojích kreslení stiskneme potvrzení tvorby, případně je tu možnost dodatečného nastavení rozměrů modelu. Výslednou geometrii uložíme tlačítkem diskety v okně editoru a zároveň uložíme i celý projekt. Ukládání během práce v PULSE Reflexu se ukázalo jako nezbytné. Nesčetněkrát se stalo, že celý program spadl a veškerá tvorba v projektu byla nenávratně ztracena.

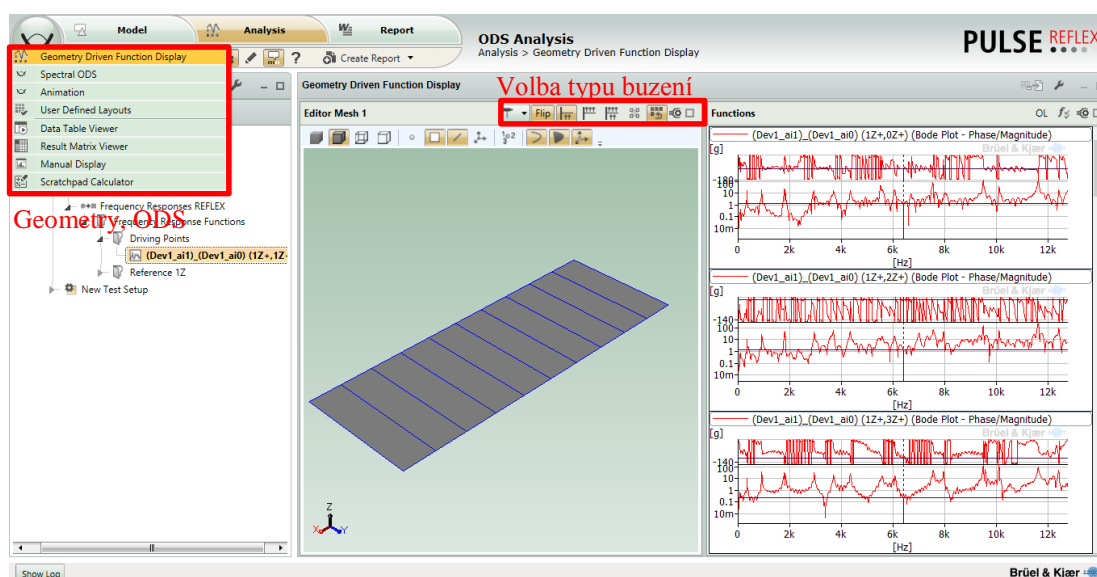
Pro vložení bodů do geometrie je třeba změnit typ výběru kurzoru. V horní liště okna *3D View* změním parametr *Node* na *Surface*. Klikem označíme geometrii a v nástrojích

tlačítkem *Mesh* vložíme body. V nástrojích *Mesh* v záložce *Element Distribution* nadefinujeme počet bodů na geometrii (měřeno 22 pozic => 22 bodů). Aby se 2D model pohyboval jako celek, přiřadí se geometrii 11x2 bodů podél nejdelších stran. Pro model obdélníku 11x4 je nastavení Length (Size :: 1.1; Elements :: 10), Width (Size :: 4.0; Elements :: 1). Následuje potvrzení a opětovné uložení geometrie (disketa - *Save all geometry*).

## 4.2 Import naměřených dat

V PULSE Reflexu v záložce *Model*, v horní liště okna *Project Browser* otevřeme *Project Tree* a rozvineme celý strom projektu. Na složku *Imported Data* klikneme pravým tlačítkem myši - *Import file - Convert* a přidáme do projektu soubor s koncovkou \*.uff (defaultní název *Frequency Responses REFLEX*). Po rozvinutí stromu *Imported Data* a *Frequency Responses REFLEX* bychom měli vidět dvě podsložky: *Driving Points* a *Reference 1Z* (v případě, že signál byl měřen ve směru Z+). Ve složce *Reference 1Z* jsou měřené signály seřazeny dle požadavků vizualizačního software (celkem 22 položek). *Driving Points* obsahuje 1 položku.




## 4.3 Tvorba vizualizace



Obr. 10.: Uživatelské prostředí programu PULSE REFLEX - Analysis

Kurzor posuneme na záložku *Analysis*, kde se v levé části tlačítka objeví rozevírací šipka. V ní nalezneme podsložku *Geometry Driven Function Display*. Po otevření se na obrazovce objeví 2 okna, a pokud byla geometrie řádně uložena, pak bude v jednom z oken zobrazena. Případně jí pomocí funkce „drag&drop“ kurzorem přetáhneme z okna *Projekt Browser* do *Geometry Driven Function Display*.

Nyní propojíme měřená data s geometrií. Opět využijeme funkce „drag&drop“ - v okně *Project Browser* kurzorem uchopíme složku *Imported Data* a přetáhneme ji do

*Geometry Driven Function Display*. V podokně *Editor Mesh* v horní liště změním typ buzení při měření na rázové kladívko  a tlačítkem *Flip* nastavíme umístění reference  a buzení  na geometrii (nad/pod geometrií).

Opět kurzorem najedeme na záložku *Analysis* a v seznamu vybereme *Spectral ODS*. V grafu klikneme na frekvenční charakteristiku v konkrétním místě, které chceme zobrazit a v horní liště podokna *Deflection Shape* z rozevřacího seznamu animaci spustíme. V průběhu animace je možné zobrazovanou hodnotu plynule měnit.

Pro export animace ve formátu \*.avi použijeme pravého tlačítka myši na modelu - *Save as video...* Doba trvání exportované animace je poměrně krátká, proto je vhodné nastavit při přehrávání nekonečnou smyčku. V záložce *Report* lze vytvořit reporty (Word, Exce, PowerPoint).

## 4.4 Operace s importovanými daty

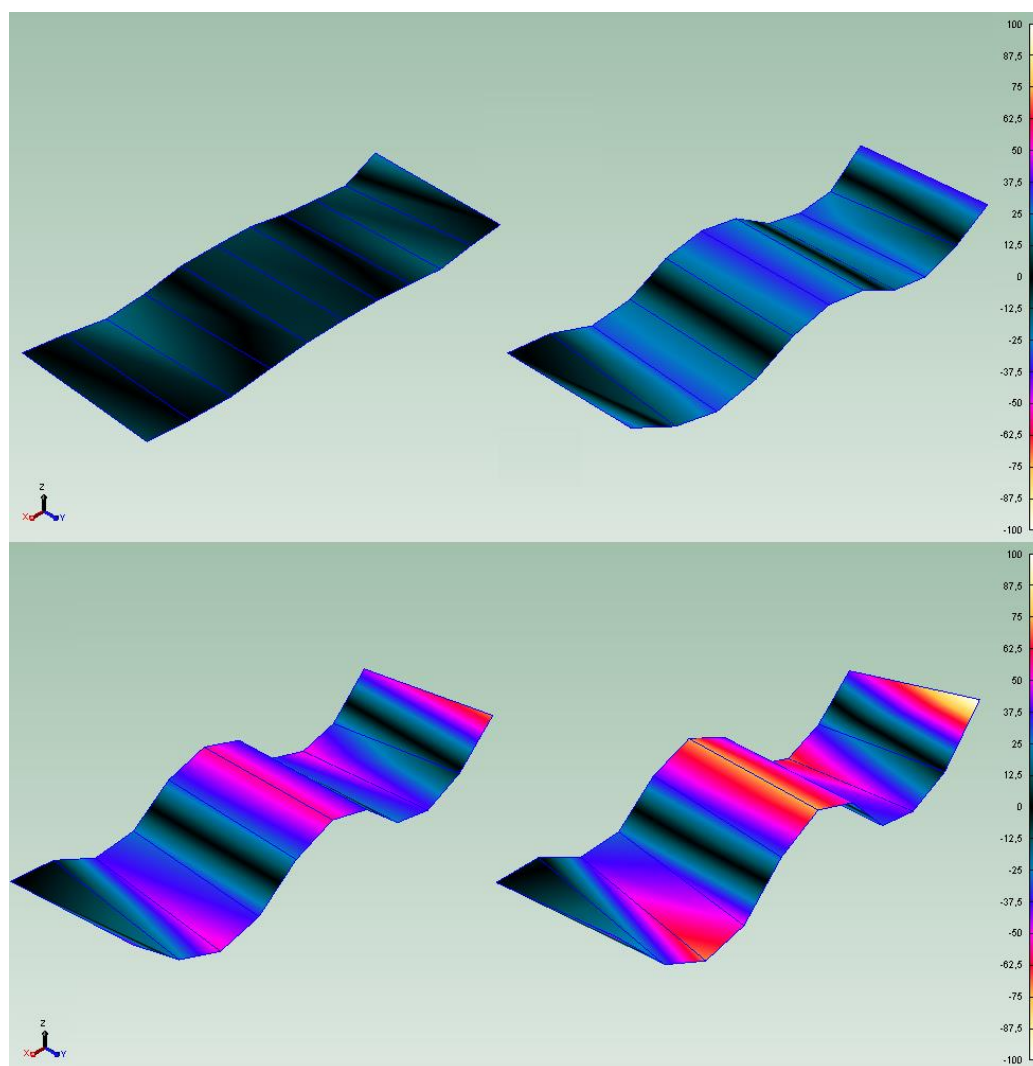
V záložce *Analysis* je položka *Scratchpad Calculator*, ta umožňuje provádět výpočty a manipulaci s daty v reálném čase. Kalkulátor obsahuje funkce: matematické (sčítání, odčítání, násobení, dělení), statistické (střední hodnota, směrodatná odchylka, minimum, maximum, suma), operátory (exp, ln, log, reciproční, atd.). Dále lze provést frekvenční vážení a interpolace, nebo změnu měřítka. Výsledky lze uložit do projektu a následně graficky zobrazit na modelu.



# 5 VÝSLEDEK MĚŘENÍ

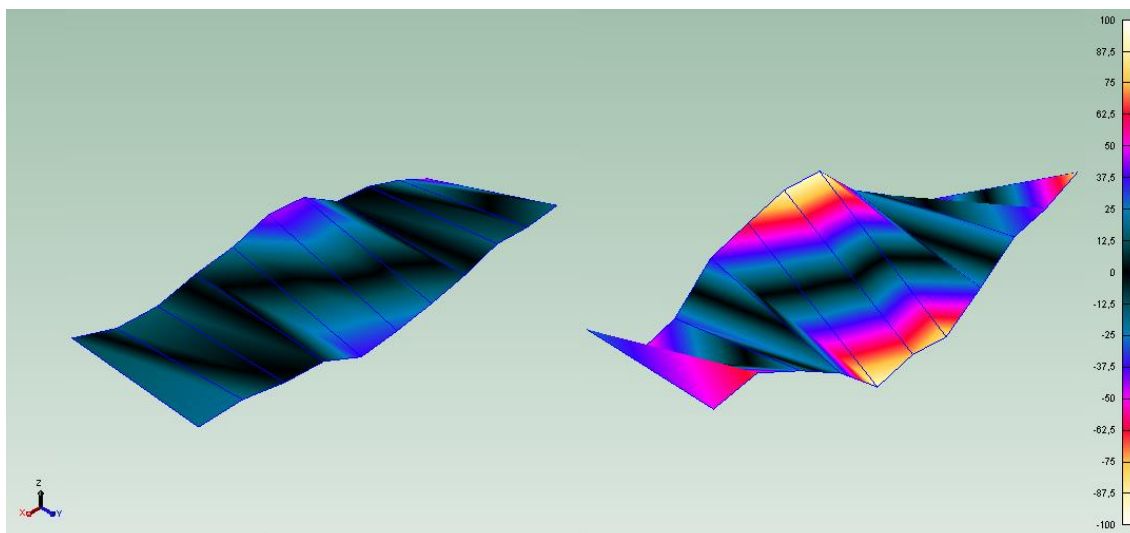
## 5.1 Grafické zobrazení dat

Po zpracování dat v programu PULSE Reflex jsem získal model pásoviny (nosníku) s vizualizací jednotlivých módů. Na přiloženém *Obr. 11* je průběh 3. módu (frekvence 1784,8 Hz, obsahuje tři kmitny), jehož zobrazení mělo relativně hladký průběh. U vyšších módů je vlivem chybějící interpolace dat neměřených bodů vidět silné zkreslení.



Obr. 11.: Průběh vizualizace 3. módu pásoviny

Kromě podélné vlny v celé délce nosníku je možné na určitých kmitočtech vidět i torzní kroucení (viz Obr. 12). Při kmitočtu 3,7 kHz model vykazoval pouze torzní kroucení, avšak u jiných kmitočtů bylo možné pozorovat kombinaci podélného i příčného vlnění.



Obr. 12.: Průběh vizualizace při 3700 Hz - torze

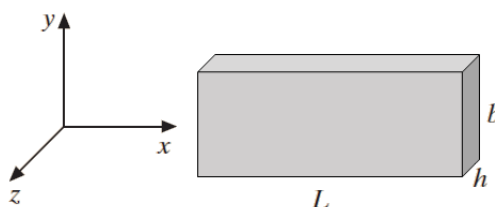
## 5.2 Vlastní frekvence

Frekvence jednotlivých módů nosníku lze určit nejen z měřených dat, ale i výpočtem. Vycházel jsem se ze vzorce pro volné uložení:<sup>28</sup>

$$f_n \approx \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \frac{\pi}{8L^2} [3.011^2, 5^2, 7^2, \dots, (2n + 1)^2] \quad (5.2.1)$$

$$I_z = I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.2.2)$$

kde  $n$  je pořadí módu a  $E$  je Youngův modul pružnosti (pro ocel 200÷220 GPa, při výpočtu použito 200 GPa). Průřez nosníku musí být kolmý na osu, podél které je nosník orientován.<sup>29</sup> Pokud je nosník orientován podél X-ové osy, potom na ní kolmý průřez  $S$  leží v rovině  $(y,z)$ , a tedy  $S=bh$ .



Obr. 13.: Geometrie nosníku

<sup>28</sup> ROSSING, Thomas D. 2007. Springer handbook of acoustics [19]

<sup>29</sup> ROSSING, Thomas D. 2007. Springer handbook of acoustics [19]

Měřený nosník má rozměry v metrech 0,38 x 0,039 x 0,01 (L x b x h) a hmotnost 1,2 kg bez přidané hmotnosti akcelerometru (1,8g) a pojivého vosku. Těmto hodnotám odpovídá hustota 8000 kg.m<sup>-3</sup> (hustota oceli 7850÷8000 kg.m<sup>-3</sup>). Moment setrvačnosti, vztážený k ose Z, se pro homogenní a izotropní nosník určí ze vztahu (5.2.2).

Příklad výpočtu pro 1. mód:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,039m \cdot (0,01m)^3}{12} = 3,25 \cdot 10^{-9}m^4$$

$$f_1 \approx \sqrt{\frac{EI}{\rho S 8L^2}} 3.011^2 =$$

$$= \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9 Pa \cdot 3,25 \cdot 10^{-9}m^4}{8000 kg \cdot m^{-3} \cdot 3,9 \cdot 10^{-4}m^2} \cdot \frac{\pi}{8 \cdot 0,1444m^2}} \cdot 3.011^2 \doteq \underline{\underline{355,9 Hz}}$$

Hodnoty v PULSE Reflexu je možné buď odečítat manuálně z frekvenčního spektra, nebo využít vestavěné automatické detekce módů. Pro automatickou detekci je však zapotřebí projekt zpracovávat v aplikaci Modal Analysis, která se do projektu vloží následovně: *Main Menu* → *Structural Dynamics* → *Modal Analysis*. Přepínat mezi aplikacemi lze v *Project Browser* pravým klikem myši na název aplikace a výběrem z nabídky aktivovat. Geometrii a data do aplikace přidáme kurzorem („drag&drop“). V záložce *Analysis* → *Measurement Validation* se opět nastaví vlastnosti přiřazení dat ke geometrii (viz *kap. 4.3*). Volba frekvenčního rozsahu, kde se provede detekce módů, se nastaví v *Analysis* → *Parametr Estimation Setup* (Data Consistency local/global solve). Samotné detekci je vyhrazena záložka *Analysis* → *Mode Selection* (tlačítko *auto*). V tabulce pod grafem jsou pak vypsané jednotlivé módy a jim příslušící frekvence. V mém případě jsem detekci prováděl na třikrát (frekvenční rozsah rozdělen na 3 stejně velké části), a to z důvodu zajištění větší rozlišovací schopnosti programu. Z detekovaných módů bylo ještě třeba odstranit ty módy, které obsahovaly torzní kroucení.

Měřené a teoretické hodnoty vlastních frekvencí nosníku v podélném směru jsou uvedeny v *Tab. 6*. V daném rozsahu bylo nalezeno celkem 8 módů. Z porovnání hodnot je patrné, že teoretické frekvence jsou v porovnání s měřenými, až na jednu výjimku, vyšší. Frekvence získané podle výše zmíněného vztahu jsou pouze přibližné, ale příčinou rozdílnosti frekvencí může být i nedokonalé volné uložení nosníku či vliv přidané hmotnosti akcelerometru. Přidaná hmotnost by se přepočítala na prodloužení nosníku o Δl, ale vzhledem k poměru jeho hmotnosti k rozměrům nosníku je Δl v tomto případě zanedbatelně malé.

**Tab. 6.:** Vlastní frekvence volně uloženého nosníku

Mód	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Teor. [Hz]	355,9	981,3	1923,4	3179,5	4749,6	6633,7	8831,9	11344,1
Měř. [Hz]	338,1	922,5	1784,8	2949,9	4351,9	6059,3	9505,2	10115,6

## 6 SNÍMÁNÍ 3D OBJEKTŮ

Jak již bylo řečeno, v současnosti program umožňuje měřit pouze struktury obdélníkového (resp. čtvercového) půdorysu. Není to ani tak problém měřicího programu jako spíš vizualizačního SW, který vyžaduje speciální indexování vstupních dat. Pro zajištění kompatibility obou programů by bylo možné doplnit Impact Test (DAQmx) o další funkce přeindexování, avšak tento způsob řešení problému je vhodný pouze pro základní tvary 2D struktur, neboť aplikování na obecné struktury by bylo z programátorského hlediska velmi komplikované, možná i nerealizovatelné.

Dalším možným řešením je nejprve navrhnout model (geometrii) se sítí automaticky rozmístěných bodů a následně měřit jednotlivé odezvy ve sledu udávaném PULSE Reflexem. Tato varianta je použitelná, ale není příliš efektivní – uživatel musí neustále sledovat mapu jednotlivých bodů struktury, v nichž má aktuálně probíhat měření. Navzdory výše zmíněnému negativu se zatím jedná asi o jediný možný způsob vizualizace měřených dat obecných struktur. Naměřená data nevyžadují další úpravy a vizualizace na modelu je ihned k dispozici.

Geometrii je možné vytvořit buď v PULSE Reflexu, nebo ji importovat z externího programu. Abych funkci importu ověřil, navrhl jsem model v programu SketchUp a uložil ho ve formátu \*.dxf (jeden z mnoha PULSEm podporovaných formátů). Načtení do PULSE nebylo nijak složité, ale po otevření editoru s modelem se místo kvádrů s plnými stěnami, zobrazila pouze kostra modelu. Automatická tvorba sítě bodů označila jen vrcholy kvádrů a vložení dalších bodů nebylo umožněno. Zároveň se často stávalo, že se v editoru při manipulaci s modelem program ukončil, a to z důvodu neočekávané výjimky. Je tedy otázkou, zda SketchUp není vhodným návrhářským softwarem pro tvorbu 3D modelů nebo zda PULSE nedokáže pracovat s importovanými modely tak, jak by uživatel od softwaru dané cenové kategorie očekával. Avšak PULSE dokáže rozlišit přerušovanou křivku, proto problém s generováním sítě bodů by určitě vyřešil nějaký profesionální program pro tvorbu CAD modelů, kde by si uživatel mohl pomocí parametrů nadefinovat rozdělení jednotlivých křivek modelu dle potřeby (jemnosti vizualizace). Po importu do PULSE by pak uživatel nemusel používat vestavěný editor a mohl by se tak vyhnout i častým pádům programu.

Před samotným zprovozněním měřicího řetězce pro obecné struktury je žádoucí nalézt vhodný program pro tvorbu geometrie zaručující kompatibilitu s PULSE Reflexem. Po vyřešení tohoto problému by pak nemělo nic bránit měření a vizualizaci dat ve více směrech.

## 7 ZÁVĚR

Při průzkumu trhu se mi podařilo nalézt pár významnějších vizualizačních softwarů. Jejich soupis a stručná charakteristika jsou uvedeny v *kap. 2*. V tabulkách *Tab. 3*, *Tab. 4* a *Tab. 5* je pak možné jednotlivý SW porovnat. Bohužel se mi nepodařilo získat některé důležité informace. Webové stránky distributorů a výrobců jsou v tomto ohledu poněkud skoupé a při pokusu o navázání elektronické komunikace jsem se nesetkal s valným úspěchem.

Většina SW je schopna zpracovávat naměřená data, konkrétně: ModalVIEW, Vibrant ME'scope VES, Comsol, PULSE Reflex, DATS a ARTEMIS Modal (-/STD/PRO). Programy SolidWorks nebo ANSYS modální kmity graficky zobrazují též, avšak pouze ze simulovaných, matematicky vypočítaných, dat. To je vhodné v předprodukční fázi produktu, nebo pokud nemůžeme z nějakého důvodu analyzovat modální vlastnosti fyzického modelu. Přehled samozřejmě není kompletní a do budoucna by se mohl určitě rozšířit například i o MSC Software, ParaVIEW a další.

V praxi jsem měl možnost otestovat pouze PULSE Reflex, u něhož byla výrobcem deklarována velká intuitivnost ovládání, ale skutečnost vypadala zcela jinak. Tento názor je subjektivní, neboť před samotným použitím programu jsem nebyl podroben žádnému instruktážnímu kurzu a výrobcem poskytované návody byly nedostačující. Avšak co by ani absolvování kurzů a sebelepší návod nezměnily, je stabilita a odezva programu, které byly někdy katastrofální. Software je vybaven řadou užitečných funkcí (např. možnost matematických operací se signály, filtry, atd.), ale jednu základní se mi nepodařilo zprovoznit, a to interpolaci pro nezměřené body. Dále jsem narazil na omezenost vestavěného nástroje pro tvorbu modelu. Ten uživateli povolí na jedné hraně modelu vložit maximálně 100 bodů, což v kombinaci s nefunkční interpolací znamená, že výsledná vizualizace nemá hladký průběh (viz vizualizace v *kap. 5.1*). S využitím vestavěné automatické detekce módů jsem z naměřených dat určil vlastní frekvence pásovin. Abych mohl posoudit správnost výsledku, určil jsem módy i početní metodou. Hodnoty jsou si relativně blízké, podrobnější porovnání teoretických a měřených hodnot uvádím v *kap. 5.2.*, kde je i odůvodnění jejich rozdílnosti.

Před samotným návrhem a naprogramováním měřicího systému bylo požadováno odzkoušení měřicího řetězce na již existujících prostředcích, a proto bylo použito obslužného SW Impact Test (DAQmx), získaného z NI šablon. Pokud pomínu počáteční problémy s ukládáním dat, tak měření proběhlo bez kolizí. Program data zaznamenal, automaticky zpracoval a exportoval. Získaná data se následně použila v PULSE Reflexu.

Původní program byl modifikován tak, aby uživateli usnadnil proces měření a následného transportu dat do vizualizačního softwaru. Předěláno bylo několik prvků na frontpanelu programu (přidán návod k měření, ovládací prvky změny lokace, atd.) a upraven byl i kód pro ukládání dat. Základním cílem budoucího vývoje projektu by mělo být určitě měření obecných struktur (kupříkladu modální analýza coriolisova průtokoměru).

# LITERATURA

- [1] **ABSignal.** [Online] ABSignal, Inc. [Citace: 30. 12 2013.]  
<http://absignal.com/product/index.php>.
- [2] **ANSYS.** [Online] [Citace: 1. 4 2014.] <http://www.ansys.com/>.
- [3] **BILOŠOVÁ, A. 2012.** Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky. [Online] 2012.  
<[http://www.337.vsb.cz/materialy/BilosovaAlena\\_EMAskripta.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/BilosovaAlena_EMAskripta.pdf)>.
- [4] Brüel & Kjær. [Online] [Citace: 5. 12 2013.]  
<http://www.bksv.com/products/analysis-software/vibration/structural-dynamics/classical-modal-analysis/advanced-modal-analysis-8720-8721>.
- [5] **COMSOL.** [Online] COMSOL, Inc. [Citace: 27. 11 2013.]  
<http://www.comsol.com/>.
- [6] **DALLY, J. W., RILEY, W. F., MCCONNELL, K. G. 1993.** *Instrumentation for Engineering Measurement.* New York, 1993. 0-471-55192-9.
- [7] **DANĚK, J.** Freeware. *Wikipedie.* [Online] [Citace: 1. 4 2014.]  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Freeware>.
- [8] Emailová korespondence s Herdis Nielsen. [Online] [Citace: 3. 1 2014.]  
[hn@svibs.com](mailto:hn@svibs.com).
- [9] Emailová korespondence s Ing. Stanislav Klusáček, Ph.D. [Online] [Citace: 8. 12 2013.] [klusacek@fec.vutbr.cz](mailto:klusacek@fec.vutbr.cz).
- [10] Emailová korespondence s Pavel Ludvík. [Online] [humusoft.cz](http://humusoft.cz). [Citace: 6. 3 2014.] [Ludvik@humusoft.cz](mailto:Ludvik@humusoft.cz).
- [11] firemní materiály Brüel&Kjaer.
- [12] **HÁJEK, Z. 2008.** Efektivní použití 3D CAD systémů v procesním inženýrství-III. [Online] 2008. 49 s. Vedoucí Bc práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D..  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5745](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5745).
- [13] **Humusoft.** [Online] [Citace: 10. 3 2014.]  
<http://www.humusoft.com/produkty/comsol/>.
- [14] **MELKES, F., ŘEZÁČ, M.** *Matematika 2.* místo neznámé : FEKT VUT v Brně, UAMT.
- [15] **ModerntechStore.** [Online] [Citace: 13. 5 2014.]  
<http://www.moderntechstore.com/design-software>.
- [16] National Instruments. [Online] [Citace: 25. 23 2014.]  
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/210054>.

- [17] **Polytec.** [Online] [Citace: 30. 12 2013.]  
[http://www.polytec.com/fileadmin/user\\_uploads/Applications/Automotive\\_Transportation/Images/MEScopeVES.pdf](http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Applications/Automotive_Transportation/Images/MEScopeVES.pdf).
- [18] **Prosig.** [Online] [Citace: 13. 5 2014.] <http://prosig.com/>.
- [19] **ROSSING, Thomas D. 2007.** *Springer handbook of acoustics*. New York, N.Y. : Springer, 2007. c2007, xxiv, str. 1182 p. ISBN 03-873-3633-8.
- [20] **SCHWARZ, B. J., RICHARDSON, M. H. 1999.** INTRODUCTION TO OPERATING DEFLECTION SHAPES. [Online] 1999.  
 <<http://systemplus.co.jp/support/data/techpaper/mescope/tech/29.pdf>>.
- [21] **Solidvision.** [Online] [Citace: 31. 12 2013.] <http://www.solidvision.cz/>.
- [22] Spectris Praha spol. s.r.o. [Online] [Citace: 8. 12 2013.] <http://spectris.cz/>.
- [23] **SVIBS.** Structural Vibration Solutions. [Online] [Citace: 1. 1 2014.]  
[http://www.svibs.com/download/brochures/ARTEMIS\\_modal\\_2013.pdf](http://www.svibs.com/download/brochures/ARTEMIS_modal_2013.pdf).
- [24] **SVSFEM.** [Online] [Citace: 7. 4 2014.] <http://www.svsfem.cz/>.
- [25] **ŠVAŇHAL, R. 2008.** Využití programu SolidWorks k přípravě modelů CFD. [Online] 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6156](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6156).
- [26] **Vibetech.** [Online] Vibrant Technology, Inc. [Citace: 31. 12 2013.]  
<http://vibetech.com/>.
- [27] **Weigl, M. 2011.** Měření vibrací. [Online] 2011. [Citace: 26. 2 2014.] 37 s. Vedoucí práce Ing. Martin Musil, Ph.D..  
<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6359/Martin%20Weigl%20-%20M%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20Vibrac%C3%AD.pdf?sequence=1>.
- [28] **Z., V.** Software. *Wikipedie*. [Online] [Citace: 1. 4 2014.]  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Shareware.\\_Q7397](http://cs.wikipedia.org/wiki/Shareware._Q7397).

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ODS	Operational Deflection Shapes - provozní tvary kmitů
FRF	Frequency Response Function - frekvenční odezвовá funkce
SW	Software
CAD	2D/3D počítačové projektování, počítačem podporované navrhování Model poskytuje detailní informace potřebné k výrobě předmětu
OS	Operační systém
Freeware <sup>30</sup>	Uzavřený software, který je distribuován bezplatně
Shareware <sup>31</sup>	Software chráněný autorským právem s možností volné distribuce, který lze po určité době zkoušet, avšak pokud jej uživatel chce nadále používat, je povinen se řídit dle autorovy licence a zpravidla zaplatit cenu programu nebo se jen registrovat
ACIS	Geometrické modelové jádro navržené Spatial Corporation
FEA	Finite Element Method - metoda konečných prvků
EMA	Experimental Modal Analysis - experimentální modální analýza
OMA	Operational Modal Analysis - provozní modální analýza
SSI	Stochastic subspace identification – stochastická identifikace subprostoru
NI	National Instruments
jazyk G	Graphic programming
VI	Virtual Instruments ~ program v jazyce G
subVI	podprogram
DSA	A/D modul pro signály s velkým dynamickým rozsahem (amplitud, frekvencí)
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation - počítačově založený měřicí a automatizační systém
MAC	Modal Assurance Criterion - zajištění modálního kritéria
DOF	Degrees of Freedom - stupně volnosti, neboli počet parametrů systému, které se mohou měnit nezávisle na sobě. Základní směry posunu a směry otáčení, kterými se bod (resp. těleso) může pohybovat a otáčet
MDOF	Multi Degree Of Freedom - několik stupňů volnosti
CFDD	curve-fit frequency domain decomposition
EFDD	enhanced frequency domain decomposition
E [MPa]	Youngův modul pružnosti, charakteristika materiálu
I [m <sup>4</sup> ]	moment setrvačnosti průřezu s ohledem na jeho neutrální stř. rovinu
f <sub>n</sub> [Hz]	vlastní frekvence, kde n je pořadí módu

---

<sup>30</sup> DANĚK, J. Freeware [7]

<sup>31</sup> Z., V. Shareware [28]



# SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy jsou na externím DVD

Elektronická verze práce  
SW Impact Test (DAQmx)  
Konfigurační soubor (\*.xml)  
Naměřená data (4 soubory)  
Projekt PULSE Reflex  
Návod k PULSE Reflex  
ModalAnalysis.avi  
Prospekty k vizualizačním SW  
Datasheet ENDEVCO  
Datasheet kd91