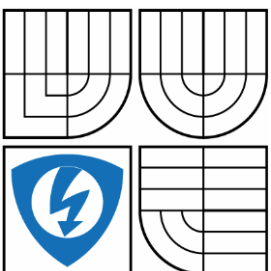


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

KALIBRACE RÁZOVÉHO KLDÍVKA

IMPACT HAMMER CALIBRATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

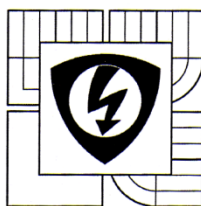
JAKUB ŠAFÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2015



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: Jakub Šafář
Ročník: 3

ID: 154883
Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

Kalibrace rázového kladívka

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace pracoviště pro kalibraci rázového kladívka.

1. Zpracujte rešerši týkající se problematiky rázových kladívek používaných pro modální analýzu, jejich principu, konstrukce, využití, kalibrace.
2. Navrhněte a prakticky realizujte kalibrační pracoviště.
3. Kalibrační postup prakticky ověřte, stanovte nejistoty měření.
4. Pro experimenty se předpokládá využití rázového kladívka Endevco, měřících karet firmy National Instruments nebo TiePie a vytvoření intuitivního obslužného sw v LabVIEW, umožňujícího celý proces kalibrace automatizovat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

DALLY, J.W., RILEY, W.F. - Instrumentation for Engineering Measurements. John Wiley and Sons, New York, 1993.

Termín zadání: 9. 2. 2015

Termín odevzdání: 25.5.2015

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

Cílem této práce je praktickým měřením a následným výpočtem ověřit, zda citlivost rázového kladívka ENDEVCO 2302-5 vyhovuje hodnotě, uváděné výrobcem, případně jak se skutečná hodnota od této hodnoty liší. Dále tato práce pojednává o možném ovlivnění experimentu různými negativními vlivy a skutečnostmi. Kalibrace kladívka byla prováděna pomocí tělesa známé hmotnosti na námi sestrojeném kalibračním pracovišti.

Klíčová slova

Kalibrace, piezoelektrický jev, rázové kladívko, modální analýza

Abstract

The aim of this thesis is verification of sensitivity of an impact hammer ENDEVCO 2302-5. The thesis also discusses the possible negative influences of the experiment. Calibration of an impact hammer was performed using known mass.

Keywords

Calibration, piezoelectric effects, impact hammer, modal analysis

Bibliografická citace:

ŠAFÁŘ, J. *Kalibrace rázového kladívka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 79 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Kalibrace rázového kladívka 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 jsem si 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.

V Brně dne: **18. května 2015**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a trpělivost, s jakou byly udíleny cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **18. května 2015**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teorie rázových kladívek	11
2.1	Význam a využití rázových kladívek	11
2.2	Konstrukce a princip rázového kladívka	12
2.3	Dynamika kladívka	13
2.3.1	Ráz tuhých těles	14
2.3.2	Frekvenční spektrum pulzu	19
2.3.3	Model rázového kladívka	22
2.4	Kalibrace rázového kladívka.....	24
2.4.1	Princip kalibrace.....	25
2.4.2	Teoretická úskalí kalibrační metody	26
3	Návrh a realizace kalibračního pracoviště.....	29
3.1	Kalibrační hmota a její uložení	29
3.2	Měřicí karta	32
3.3	Akcelerometr a nábojové převodníky	32
3.4	Mechanismus pro pouštění kladívka a vliv operátora	33
3.5	Obslužný software a jeho funkcionalita	35
3.5.1	Analýza signálů v časové oblasti	37
3.5.2	Analýza signálů ve frekvenční oblasti	40
4	Kalibrační měření	43
4.1	Možnosti posouzení výsledků kalibrace	44
4.2	Seznam přístrojů a přípravků	49
4.3	Atmosférické podmínky.....	49
4.4	Cíle měření	49
4.5	Testování vlivu úrovně dopadové síly	50
4.6	Testování vlivu nastavení nábojového zesilovače	54
4.7	Testování vlivu výměny hrotu	57
4.8	Testování vlivu kalibračního bloku.....	60
4.9	Testování vlivu akcelerometru	64
4.10	Testování vlivu operátora.....	66
4.11	Testování vlivu šikmého a nepřesného úderu	68
4.12	Souhrnná diskuze k provedeným zkouškám	71
4.13	Nejistoty měření	72

5	Závěr.....	75
	Literatura.....	77

Seznam symbolů

a_m	$[m \cdot s^{-2}]$	zrychlení měřené akcelerometrem
F_m	$[N]$	síla měřená snímačem síly
$G(f)$		Fourierovo spektrum
$H(j\omega)$		frekvenční odezvová funkce
M	$[-]$	hmotnostní poměr hmotných částí modelu rázového kladívka
m_b	$[kg]$	hmotnost těla kladívka
m_e	$[kg]$	efektivní hmotnost soustavy
m_h	$[kg]$	hmotnost hlavy kladívka
S_f	$[mV/N]$	efektivní napěťová citlivost snímače síly
\bar{S}_f	$[mV/N]$	statická napěťová citlivost
T_c	$[s]$	délka půl-sinusového pulzu
U_a	$[V]$	napěťový výstup akcelerometru
U_f	$[V]$	napěťový výstup snímače síly

1 ÚVOD

Modální zkouška je užitečná a důležitá analýza, která se využívá hned v několika odvětvích průmyslu. K prostředkům, které jsou k modální zkoušce určeny, neodmyslitelně patří právě rázové kladívko. Jeho používání ovšem má své meze a nedostatky. Tato omezení je však možné částečně eliminovat správnou kalibrací, a tou, stejně jako rázovým kladívkem samotným, se zabývá tato práce.

První část práce se věnuje rázovému kladívku obecně – výhodami jeho použití, principem, jeho jednoduchou konstrukcí a teoretickým popisem. Druhá část je zaměřena konkrétně na kalibraci kladívka a teoreticky rozebírá její princip, možnosti, metody a požadavky. Významnou oblast zájmu zde představuje hlavně zpracování výstupů ze snímačů. Zbývající dvě části se zabývají návrhem kalibračního pracoviště a vlastní praktickou kalibrací konkrétního rázového kladívka. Ke kalibraci bylo určeno rázové kladívko Endeveco, konkrétně model 2302-5, a částečně předpřipravené kalibrační pracoviště s nosným přípravkem.

2 TEORIE RÁZOVÝCH KLADÍVEK

2.1 Význam a využití rázových kladívek

Nedílnou součástí modální analýzy je modální zkouška. Lze se často setkat s dělením modální zkoušky podle dvou přístupů. První přístup je založen na analýze signálů vibračních odezev a zahrnuje měření zkoumané struktury za provozních podmínek. Přístup druhý je analogicky opačný, spoléhá na analýzu systémů a využívá rozkmitání známými budícími účinky. Oba ze jmenovaných přístupů mají své klady a zápory, avšak je možné předpokládat, že přesnějších výsledků je možné snáze dosáhnout při řízených podmínkách – tedy s umělým vybuzením systému.

Motivovat k modální analýze může hned několik důvodů. Modální zkouška umožňuje změřit různé modální parametry, které mohou posloužit třeba k vyšetření nadměrného kmitání, které bylo zjištěno při provozu stroje či jiné mechanické soustavy. Rovněž může naopak ověřit výsledky zjištěné metodami teoretickými (např. metodou konečných prvků) a případně je opravit nebo doplnit. Modální analýzu lze provádět po částech pro substruktury a její výsledky posléze zahrnout do modelu celého systému. Tuhle skutečnost je možné dobře využít pro předpovídání vlivů malých strukturních modifikací.¹

Způsoby, jak modální zkoušku prakticky provést – tedy hlavně jak měřenou strukturu vybudit, jsou opět dva²:

- buzení dynamickým budičem vibrací
 - harmonickým, náhodným nebo jiným typem signálu
- buzení impulzem
 - pomocí rázového kladívka
 - náhlým uvolněním z deformované pozice

Každý způsob vybuzení má praktické využití v odlišných oblastech, respektive poskytuje rozdílný komfort a rychlost měření, s čímž souvisí i přesnost měření. Velkou výhodou použití rázového kladívka je především výše zmíněná rychlost měření a snadná proveditelnost. Aby však mohlo být měření zároveň také dostatečně přesné, je třeba mimo jiné klást velké nároky na kalibraci.

Účel rázového kladívka v modální analýze je prostý – ve zkratce je možno jej shrnout požadavkem „vyvolat známý impulz“ (=náraz) působící na zkoumanou strukturu. Kýženou vlastností z hlediska analýzy je, aby síla nárazu (respektive její spektrum) měla konkrétní požadovanou podobu, lépe řečeno požadovaný frekvenční rozsah. Ideálním impulzem z hlediska analýzy je Diracův impulz, který rovnoměrně obsahuje všechny frekvence a je tedy teoreticky vhodný i pro širokospektrální analýzu. Doba

¹ BILOŠOVÁ, A. 2012., str.14 [1]

² BILOŠOVÁ, A. 2012., str.19 [1]

trvání Diracova impulzu je nulová a jeho intenzita (výška) je nekonečná, což jsou parametry, které není možné v praxi dokonale realizovat. Omezíme-li se při analýze na užší frekvenční rozsah, může jejím účelům dobře posloužit pulz obdélníkového průběhu realizovatelné výšky a doby trvání, jehož spojitě spektrum nabývá tvaru funkce sinc. Jelikož i takový impulz je mechanickou cestou obtížné vyvolat, využívá se prostého silového pulzu, kterým působí hrot rázového kladívka při dopadu na strukturu. Průběh síly při nárazu má přibližně tvar půl-sinusového pulzu, přičemž spektrum půl-sinusového pulzu lze rovněž popsat funkcí sinc.

2.2 Konstrukce a princip rázového kladívka

Typické rázové kladívko se skládá z rukojeti, hlavy, snímače síly a hrotu. Snímač síly je umístěn na přední části hlavy a je osazen a chráněn hrotem, který bývá zpravidla výměnný. Celý nástroj je tedy skutečně podobný běžnému dělnickému kladívku drženému v rukojeti, jeho typickou podobu a konstrukci zachycuje obrázek (1). Obrázek zachycuje také tzv. rázovadlo³, tedy jakési rázové kladívko bez rukojeti, které je ovládáno jinak než úchopem – například v podobě kyvadla. Je na místě zde poukázat na možné nejasnosti v oblasti popisu jednotlivých částí kladívka v rámci české a anglické terminologie. V česky psané literatuře se lze zejména setkat s popisem kladívka odpovídajícím obrázku (1). Část kladívka před snímačem síly, označovaná jako „hrot“ nebo také „nárazník“ může být v anglicky psané literatuře uvedena výrazem „tip“ ale v modelech také zjednodušeně „Impact Head“. Druhý anglický termín tak může evokovat české označení „hlava kladívka“, který však popisuje tuhou hmotnost za snímačem síly, tj. na opačné straně snímače vůči hrotu. Anglický pojem „Hammer body“, používaný zejména ve schématech a modelech kladívka, bývá popisován jako „hmotnost kladívka včetně hmotnosti snímače ale bez započtené seismické hmoty.“⁴ Zda může být toto označení zavádějící, budu rozebírat níže.

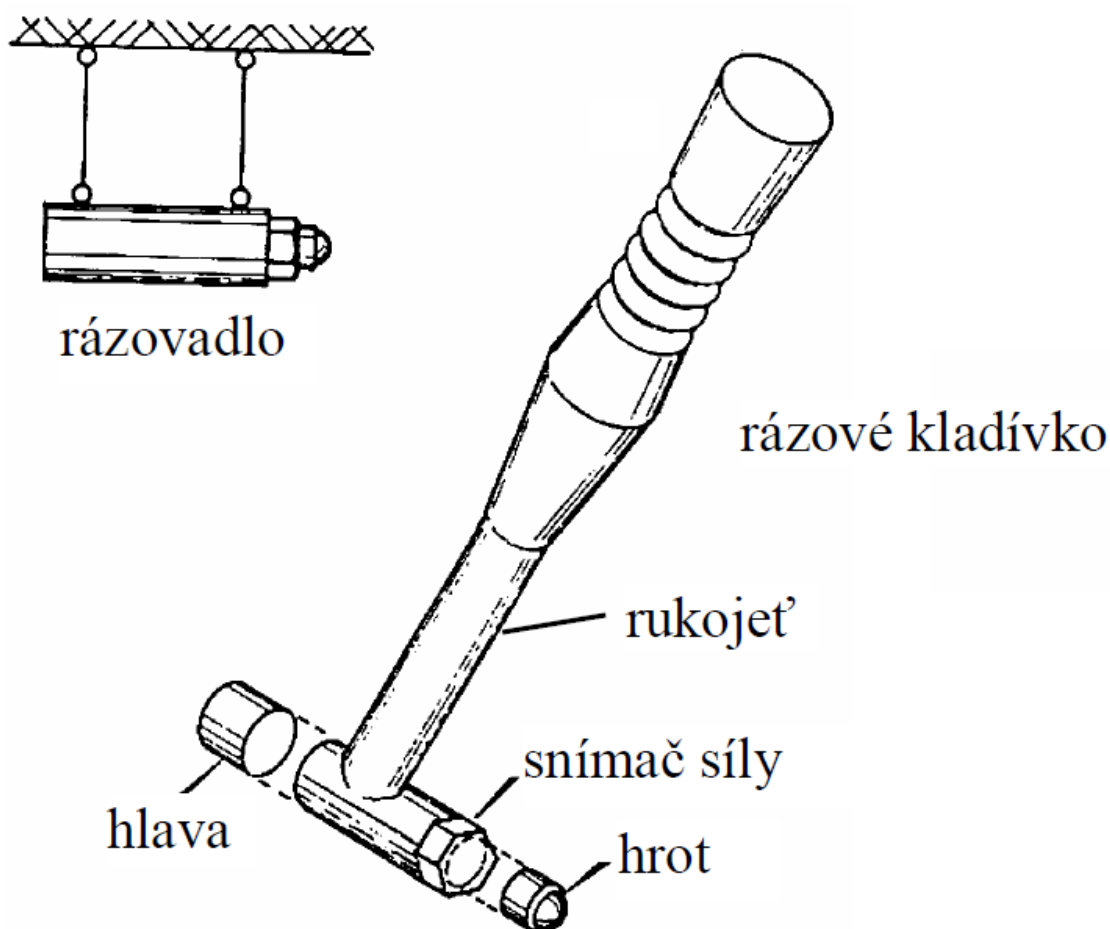
Jednotlivé části kladívka by měly mít určité typické vlastnosti. Nárazník bývá standardně výměnný a jeho jednotlivé varianty bývají tvořeny z materiálů různých tuhostí. To má při modální analýze vliv zejména na spektrální rozsah, jak bude rozvedeno v kapitole 2.3.3. Snímač síly v rázovém kladívku bývá standardě piezoelektrický, jeho výstup je tedy principiálně nábojový. Použití snímače v kladívku je nutné, protože při modální zkoušce je potřeba pracovat se silovým pulzem známých parametrů, respektive známého průběhu. Silový pulz vyvolaný dopadem kladívka má sice určitý typický tvar, avšak parametry popisující tento tvar jsou závislé na velikosti působící síly, kterou je z hlediska operátora téměř nemožné udržet při všech dopadech stejnou. Přesná podoba vyvolaného pulzu se tedy s každým úhodem kladívka během modální zkoušky mění a je třeba ji vždy měřit.

Důležitým prvkem kladívka je jeho hlava. Je tvořena homogenní tuhou hmotností a plní funkci setrvačné hmoty, která při nárazu kladívka „tlačí“ na snímač

³ BILOŠOVÁ, A., 2012. , str. 90 [1]

⁴ např. McCONNELL, K.G., HAN SANG-BO. 1986. [2]

síly. Často je hlava opatřena závitem, pomocí něhož je umožněno připevnit přidavnou tuhou hmotnost, čímž lze částečně řídit úroveň síly při dopadu. Velikost hmotnosti hlavy kladívka, jak bude ukázáno níže, má rovněž vliv na hodnotu efektivní napěťové citlivosti snímače síly. Zbývající částí rázového kladívka je rukojeť. Jelikož je fyzicky spojena s hlavou kladívka, teoreticky se spolu s hmotností hlavy podílí na efektivní citlivosti snímače síly. Ruka operátora je přes rukojeť s hlavou kladívka také spojena, a proto má i ona teoreticky vliv na efektivní citlivost snímače. Proto je vhodné technicky vyřešit rukojeť tak, aby byl tento vliv zanedbatelný. Vlivem paže na efektivní citlivost snímače síly bude rovněž rozebrána níže.



Obrázek 1: Konstrukce rázového kladívka (převzato z [1])

2.3 Dynamika kladívka

Jelikož je rázové kladívko určeno k vyvolání mechanického silového pulzu, jehož tvar a parametry hrají ve využití kladívka důležitou roli, je na místě zabývat se jeho dynamikou. Motivací k takovému rozboru by měly být poznatky, v nejlepším případě umožňující řízení parametrů výše zmíněného pulzu, nebo alespoň vedoucí k pochopení působení vlivů, které se na jeho parametrech podílí. Tato podkapitola bude pojednávat

jednak o nárazu rázového kladívka, zjednodušeného do podoby tuhého tělesa, dále o možných průbězích nárazu a také o vlastním modelu kladívka.

2.3.1 Ráz tuhých těles

Kalibrační metoda rázového kladívka pracuje s podobou pulzu, přičemž lze předpokládat, že zdroje nejistot a nepřesností se mohou projevovat více nebo méně zřejmou deformací tohoto pulzu. Abychom mohli efektivněji identifikovat, co je parazitní vliv způsobující deformaci a co je naopak projev mechanismu nárazu, je vhodné znát předpokládanou (teoretickou) podobu pulzu. Touto problematikou se zabývají teorie rázu těles. Před jejich studiem je však třeba si uvědomit, že ať už se jedná o dopad rázového kladívka na testovanou strukturu nebo kalibrační blok, vždy se jedná o náraz dvou těles, která jsou nedokonale pružná, nemají tvar ideálních geometrických těles a nejméně jedno z nich – kladívko – není ani homogenní. Teorie rázu těles navzdory tomu pracují s ideálními geometrickými tělesy (dokonalá koule, dokonale hladká rovná deska) a i přes jejich časté zjednodušující předpoklady zpravidla nejsou triviální záležitostí. Nejjednodušší z rázových teorií je rázová teorie Newtonova, která se ovšem nijak nezabývá silami v průběhu nárazu. Komplexnější teorie (například teorie Hertzova) zavádí vlastní modely rázu, které jsou postaveny na mnoha parametrech - materiálových i „nemateriálových“ konstantách – jejichž vyčíslení nemusí být vždy snadné či přesné, a stále se jedná pouze o jistou aproximaci plně nevystihující fyzikální podstatu. Výše uvedené je důvodem omezené použitelnosti rázových teorií z hlediska přesnějších výpočtů. Své využití však mají rozhodně tam, kde potřebujeme alespoň hrubší odhad, nebo využijeme kvalitativní popis nárazu.

2.3.1.1 Náraz padajícího tuhého tělesa

Srážka dvou těles se často řeší jako úloha pádu koule na poloprostor, případně jako srážka dvou koulí. Významným problémem⁵, se kterým by se teorie rázu měla vypořádat, je spojitost průběhu rychlostí. Kupříkladu Hertzova teorie se tomuto problému vyhýbá užíváním zakřivených těles, což znamená spojitý průběh velikosti dotykové plochy. V prvním okamžiku nárazu je dotyková plocha pouze jeden bod, načež se rozrůstá do okamžiku maximální deformace a následně se zmenšuje, dokud se tělesa od sebe neoddělí. Většina reálných těles (včetně hrotů kladívka) má v mikroskopickém měřítku zvrásněný povrch, takže i čelní srážka dvou rovných destiček se jeví jako tlumená. Protože se nejprve deformují „nejvyšší vrcholy povrchové nerovnosti“, lze uvažovat o spojitém nárůstu dotykové plochy a není třeba řešit situaci, kdy se v nekonečně krátkém okamžiku na počátku nárazu najednou dotýkají celé čelní plochy. Tato úvaha bude využita i v následujícím textu.

⁵ HÖSCHL, C. 1977., str. 19-20 [3]

Uvážíme-li tedy pouze kvazistatický průběh a pouze situace, kdy jsou síly působící při nárazu takové, že nedochází k trvalé deformaci, poskytuje jistý popis srážky sám výrobce kladívka kalibrovaného v rámci této práce. Kladívko lze například připodobnit tuhému tělesu, které padá volným pádem na horizontálně orientovanou tuhou plochu⁶. Pro naše účely snad postačí vlastní jednoduchá úvaha, založená na základech mechaniky a inspirovaná některými myšlenkami z teorií rázu. V rámci zjednodušení uvažujme těleso, které svým tvarem a povrchem koresponduje s úvahou o odstavec výše. Rychlost padajícího tělesa popisuje rovnice

$$v(t) = g \cdot t \quad 1$$

Pro vzdálenost, po kterou těleso padá, platí

$$s(t) = \frac{1}{2} g \cdot t^2 \quad 2$$

Z uvedených rovnic pak vyplývá okamžitá rychlost padajícího tělesa v čase těsně před dopadem jako

$$v_1 = -\sqrt{2g \cdot s_1} \quad 3$$

kde s_1 je výška pádu. Po dopadu se těleso od plochy odrazí do výšky s_2 rychlostí

$$v_2 = \sqrt{2g \cdot s_2} \quad 4$$

Zrychlení je definováno jako časová změna rychlosti, jak vyjadřuje následující vztah, pro náš případ oprostěný vektorové podoby

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad 5$$

Pokud by padajícím tělesem byl piezoelektrický akcelerometr, v době těsně před dopadem a těsně po odrazu by byl jeho výstup nulový vlivem neschopnosti tohoto akcelerometru měřit malá zrychlení (kvůli svodovému odporu piezokrystalu). Během krátké doby mezi nárazem a odrazem se musí těleso zastavit a obrátit směr pohybu, což je příčinou vysokého nárůstu jeho zrychlení. Dle vztahu (5) je zřejmé, že čím rychleji obrátí těleso svůj směr pohybu, tím vyšší bude maximální úroveň zrychlení při tomto ději.

Srovnajme dvě tělesa stejné tuhosti a rozměrů s odlišnou hmotností, která padají na tuhou rovinu ze stejné výšky. Jelikož rychlost pádu není závislá na hmotnosti tělesa, obě dopadnou stejnou rychlostí. Obě tělesa se musí ve svém dopředném pohybu

⁶ Převzato a upraveno dle pojednání - Acceleration levels of dropped objects , Endevco Meggitt Sensing Systems [4]

v určitém okamžiku zastavit, kdy jejich okamžitá rychlost i hybnost je nulová. Absolutní změna rychlosti obou padajících těles je tedy během nárazu stejná, změna hybnosti je větší pro hmotnější těleso, kvůli jeho větší hybnosti těsně před dopadem.

$$\Delta p = m \cdot \Delta v \quad 6$$

K zastavení tělesa, jehož v pohybu udržuje setrvačná a tíhová síla, je třeba zapůsobit impulzem síly, pro který platí

$$I = \Delta p = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt \quad 7$$

kde meze integrálu vyhraňují dobu od dotyku tělesa s dopadovou rovinou po dosažení nulové rychlosti. Hybnějšímu tělesu odpovídá větší impuls síly, kterým musí síla pružnosti těleso zastavit. Při dopadu dochází k pružné deformaci, což se projevuje silou pružnosti o velikosti

$$F_p = k \cdot x \quad 8$$

kde k představuje „tuhost pružnosti dopadu“ a x odpovídá „kompresní vzdálenosti“. Jelikož je tuhost obou srovnávaných těles stejná, má konstanta k v obou případech stejnou hodnotu. Popíšeme-li pohyb tělesa na základě Newtonova zákona síly s využitím vztahu (8), dostaneme

$$a = \frac{F}{m} = \frac{k \cdot x}{m} \quad 9$$

Rovnice (9) vede na diferenciální rovnici

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0 \quad 10$$

jejíž řešení má tvar

$$x(t) = v_1 \sqrt{\frac{m}{k}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \quad 11$$

průběh rychlosti a zrychlení tedy popisuje

$$v(t) = v_1 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \quad 12$$

$$a(t) = -v_1 \sqrt{\frac{k}{m}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \quad 13$$

pro počáteční podmínky: $x(0) = 0$, $v(0) = v_1$, $a(0) = 0$, uvažujeme-li nulový čas v okamžiku prvního dotyku tělesa s rovinou.

Rovnice (11) až (13) popisují průběh síly při nárazu jako dokonalý půl-sinus, což odpovídá zjednodušenému empirickému popisu. Při bližším pohledu je však zřejmé, že „půl-cosinový“ průběh rychlosti má (v absolutní hodnotě) před nárazem a po nárazu stejnou hodnotu, což by odpovídalo jednotkovému koeficientu restituce a odporovalo nejen pozorování. Teoretický ani reálný průběh síly při nárazu proto nikdy nebude půl-sinusový, vždy se jedná pouze o více či méně přesnou aproximaci. Z hlediska koeficientu restituce lze předpokládat, že tvar silového pulzu se bude lišit od půl-sinu tím více, čím víc se bude lišit hodnota koeficientu (vztážená k materiálu hrotu a kalibrační hmotě) od hodnoty jednotkové. To je vhodné brát na vědomí zejména při posuzování naměřených časových průběhů pro různě tuhé hroty.

Více empirický přístup, jak popsat průběh nárazu kladívka, může být založen právě na hodnotě koeficientu restituce, který nám umožňuje odhadnout rychlost kladívka bezprostředně po odrazu. Půl-sinusový tvar průběhu má jak síla, tak i zrychlení, jehož integrací dostáváme půl-cosinový průběh rychlosti. Integrační konstanta zde musí mít takovou hodnotu, aby rychlost odpovídala okrajovým podmínkám – tedy aby rychlost na počátku a konci nárazu byla v souladu se vztahy (3) a (4). Výsledný průběh má tvar „půl-cosinového pulzu“ a je zachycen na obrázku (2). Rovnice popisující tento průběh má tvar

$$v(t) = \left(\frac{v_1 - v_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) + \frac{v_1 + v_2}{2} \quad 14$$

První závorka vztahu (14) je záporná a vyjadřuje „amplitudu“ pulzu, zlomek na konci vztahu má hodnotu integrační konstanty a zajišťuje navázání průběhu na okrajové podmínky. Derivací vztahu (14) lze získat předpis pro průběh zrychlení

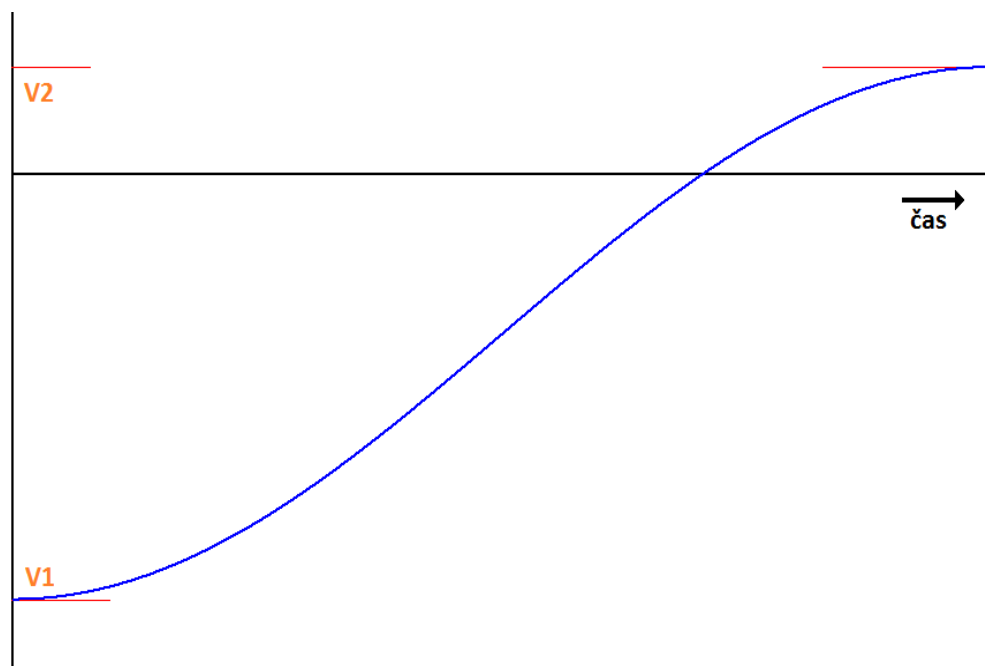
$$a(t) = \frac{d}{dt} v(t) = -\left(\frac{v_1 - v_2}{2}\right) \frac{\pi}{T} \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad 15$$

Dosažením do vztahu (15) lze zjistit hodnotu amplitudy pulzu a ověřit platnost okrajových podmínek

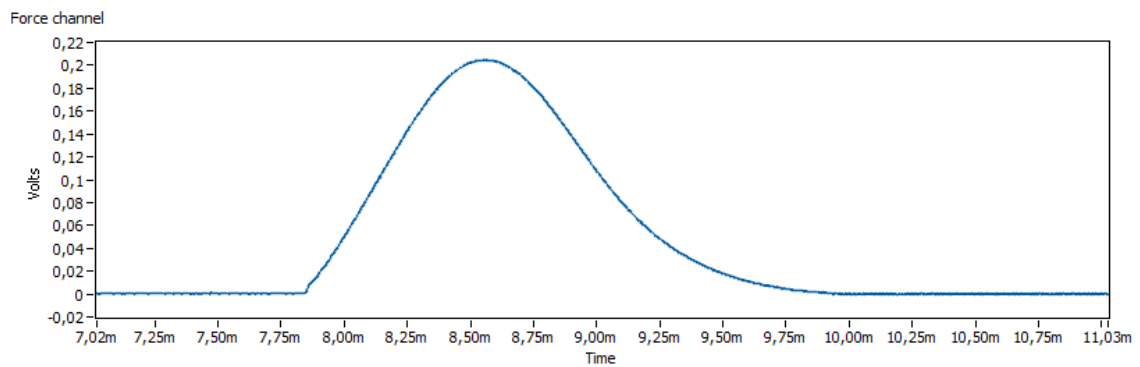
$$a(0) = -\left(\frac{v_1 - v_2}{2}\right)\frac{\pi}{T}\sin(0) = 0 \quad 16$$

$$a(T) = -\left(\frac{v_1 - v_2}{2}\right)\frac{\pi}{T}\sin(\pi) = 0 \quad 17$$

$$a\left(\frac{T}{2}\right) = \left(\frac{v_2 - v_1}{2}\right)\frac{\pi}{T} \quad 18$$



Obrázek 2: Půl-cosinový průběh popisující rychlosti při nárazu, převzato z [4]



Obrázek 3: Výstup ze snímače v rázovém kladívku při použití gumového hrotu a ocelové kalibrační hmoty

Ačkoliv se může zdát, že řešení v podobě úpravy integrační konstanty odstranilo problém s platností okrajových podmínek, po srovnání s tvarem silového pulzu výstupu rázového kladívka je zřejmé, že takovéto řešení naměřeným hodnotám příliš neodpovídá. Čím více se koeficient restituice odchyluje od jednotkové hodnoty, tím více se liší hodnota integrační konstanty od nuly. Tím se „opoždí“ pozice průchodu půl-cosinu nulou, což je okamžik změny směru pohybu, kdy se předpokládá maximální úroveň zrychlení. Pozice maxima derivace půl-cosinového pulzu se však změnou integrační konstanty nemění. Z pozorování naopak vyplývá, že méně tuhý hrot (jemuž odpovídá menší hodnota koeficientu restituice) se projevuje v rámci doby nárazu posunem maxima silového pulzu opačným směrem.

Výše uvedená odvození ukazují, že analytický popis pulzu v rámci triviálních řešení selhává a pokud by bylo třeba popsat pulz přesněji, bylo by nutné vyjít z některé komplexnější teorie rázu. Smysluplné se jeví zejména řízení délky pulzu, který má úzký vztah k frekvenčnímu spektru.

2.3.2 Frekvenční spektrum pulzu

Shrnutím předchozích podkapitol je skutečnost, že empirický popis pulzu vyvolaného nárazem se blíží tvaru jednoho půl-sinusového pulzu, jehož délka T_c představuje délku doby nárazu. Tento pulz je snímačem síly změřen a později analyzován. Provedeme-li výpočet Fourierovy transformace obecného půl-sinusového pulzu správné délky, můžeme zjistit teoretickou podobu spektra nárazového pulzu a odhadnout maximální frekvenci, kterou lze v rámci reálného pulzu očekávat.

Jak bylo poznamenáno výše, doba nárazu souvisí s hmotností kladívka, tuhostí a plochou povrchů, které do sebe naráží. Frekvenční rozsah, v jakém je schopno kladívko pracovat, je ovlivněn hodnotou rezonanční frekvence kladívka. Rezonanční frekvenci systému, nad kterou je obtížné dodat energii do zkoušené struktury je možno vyjádřit vztahem⁷

$$f_r = \sqrt{\frac{\textit{kontaktní tuhost}}{\textit{hmotnost kladívka}}} \quad 19$$

Výpočet hodnoty kontaktní tuhosti je ovšem v našem případě problematický. Museli bychom tuhosti kladívka a testovací struktury změřit nebo přesně znát. Můžeme si zde proto pomoci srovnáním s empiricky zjištěnými údaji uvedenými v literatuře. Hrotů podobných tuhostí, jako jsou uvedeny v tabulce (1) využívá také kalibrovaná rázové kladívko Endeveco 2302-5.

⁷ BILOŠOVÁ, A., 2012. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů, str. 90 [1]

Tabulka 1: Typické parametry pulzu vyvolaného nárazem hrotu rázového kladívka, převzato z [9]

hlavička	dosažitelná síla [N]	frekvenční rozsah [Hz]	trvání impulzu [ms]
Guma	500	~400	1.3-1.8
Plast	1500	~2000	0.3-0.5
Ocel	5000	~6000	0.1-0.2

Hrot s největší tuhostí je v případě kalibrovaného kladívka vyroben z hliníku a výrobce uvádí ve specifikacích modelu frekvenční rozsah 8 kHz. Dle hodnot uvedených v tabulce (1) je možné předpokládat délku pulzu pro takový hrot kolem 0,1ms.

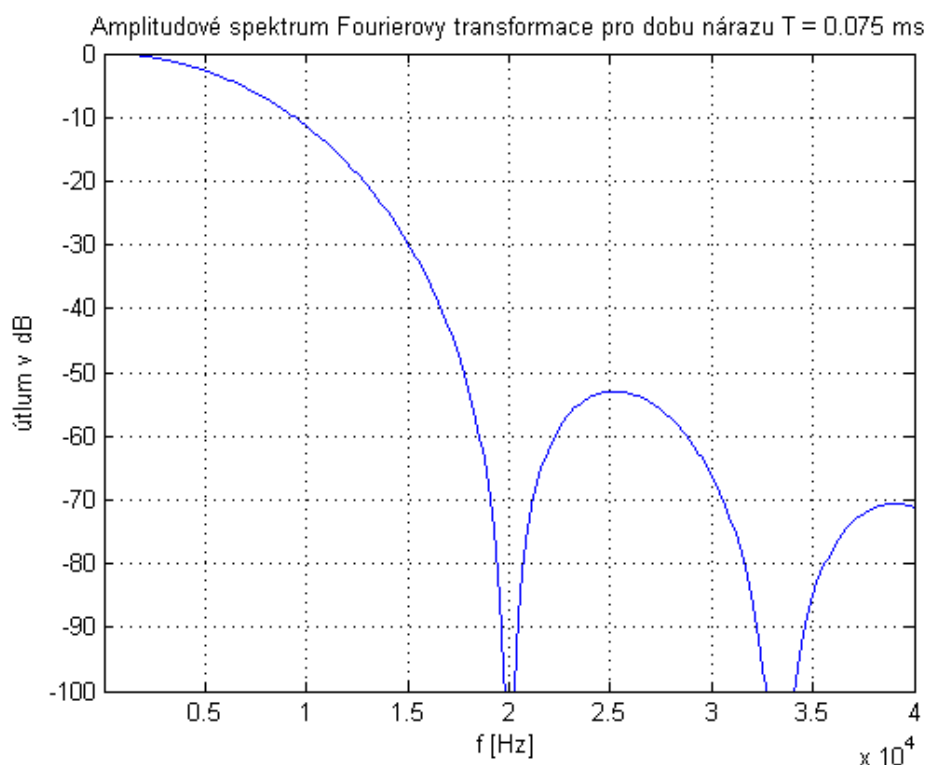
Je-li k dispozici alespoň hrubý odhad minimální délky půl-sinusového pulzu, lze na jeho základě provést odpovídající výpočet Fourierovy transformace. Fourierovo spektrum můžeme například vyjádřit s pomocí známějšího výrazu pro půl-cosinusový pulz posunutý o půl periody T_c , podle věty o obrazu posunutého signálu jako

$$G(f) = \frac{AT}{2} \left[\text{sinc} \left(fT - \frac{1}{2} \right) + \text{sinc} \left(fT + \frac{1}{2} \right) \right] e^{-j\pi fT} \quad 20$$

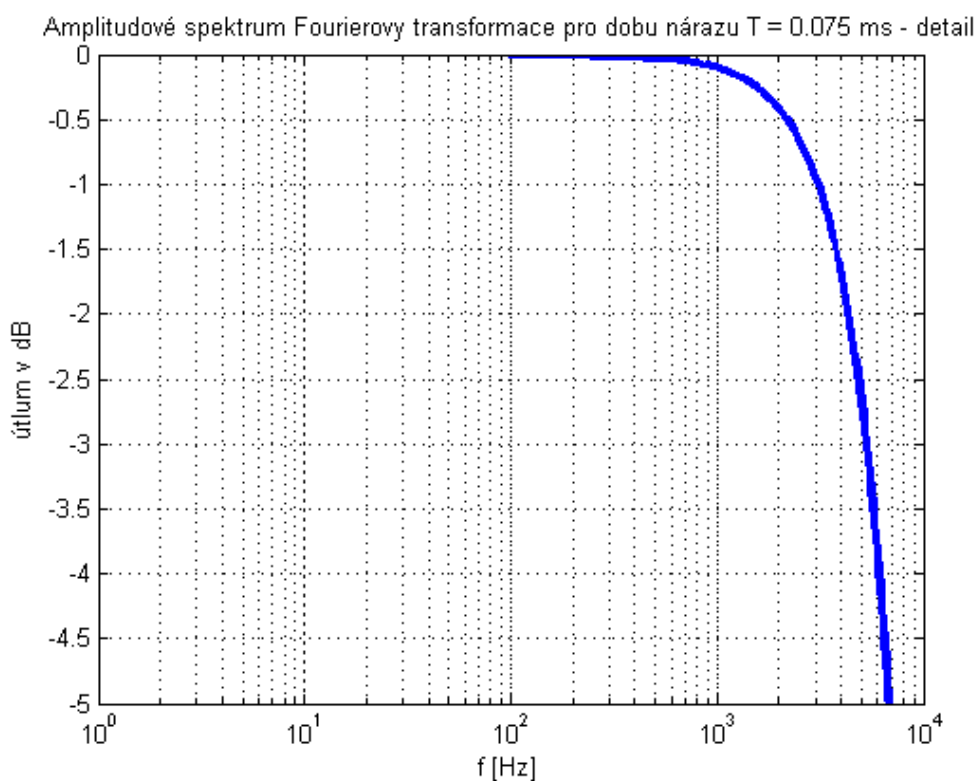
kde A je amplituda pulzu. Jelikož nás ale zajímá pouze amplitudové spektrum Fourierovy transformace, můžeme si vystačit se zjednodušeným výrazem

$$|G(f)| = \frac{AT}{2} \left[\text{sinc} \left(fT - \frac{1}{2} \right) + \text{sinc} \left(fT + \frac{1}{2} \right) \right] \quad 21$$

jehož průběh pro hodnotu $T = 0,075\text{ms}$ zachycují následující grafy

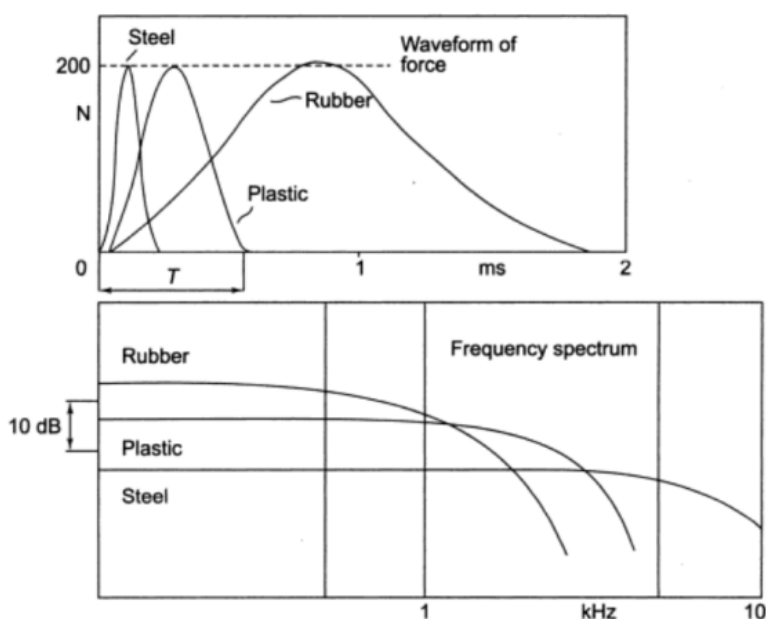


Obrázek 4: Spektrum půl-sinusového pulzu (vypočteno v programu Matlab)



Obrázek 5: Spektrum půl-sinusového pulzu (vypočteno v programu Matlab)

Budeme-li chápat šířku pásma v průběhu amplitudového spektra do poklesu o 3dB, lze z rovnice grafu např. pro $T = 0,075$ ms odečíst mezní hodnotu frekvenčního pásma přibližně 5,37 kHz. Typické průběhy spekter při použití různých hrotů prezentuje mnohá literatura. Jedno takové srovnání ukazuje obrázek (6).



Obrázek 6: Typické časové průběhy spektra pro různé použité hroty, převzato z [9]

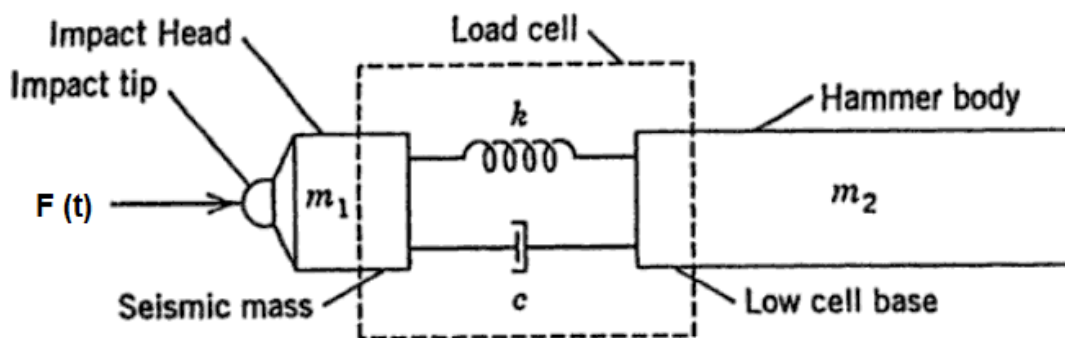
2.3.3 Model rázového kladívka

Popíšeme-li snímač síly jako systém zabudovaný v kladívku, zjistíme, že ačkoliv úroveň síly při dopadu kladívka má v rukou operátor, výstupní signál, který sílu a její spektrum reprezentuje, je určen a ovlivněn všemi částmi kladívka, jak to ukazuje obrázek (7). Pro exaktnější odhad chování rázového kladívka je vhodné sestavit jeho teoretický fyzikální model⁸. Obrázek (7) rozšíříme o dvě vztažné osy (souřadnice) x , y , každou pro popis pohybu jednoho konce snímače síly, orientované stejným směrem. Ke hmotnosti hlavy kladívka zahrneme seismickou hmotu snímače síly a hmotnost hrotu. Obdobně ke hmotnosti těla kladívka zahrneme vlastní hmotnost snímače síly bez seismické hmoty. Sestavíme-li diferenciální rovnice pro popis těchto hmotných částí, dostáváme následující vztahy:

$$m_b \ddot{x} = c(\dot{y} - \dot{x}) + k(y - x) \quad 22$$

$$m_h \ddot{y} = c(\dot{y} - \dot{x}) - k(y - x) - F(t) \quad 23$$

kde je: k konstanta pružnosti snímače síly, popisující sílu úměrnou poloze
 c konstanta tlumení snímače, popisující tlumení úměrné rychlosti
 m_b hmotnost těla kladívka dle obrázku (7)
 m_h hmotnost hlavy kladívka dle obrázku (7)



Obrázek 7: Teoretický model rázového kladívka, převzato z [5]

Na snímač působí relativní pohyb mezi soustavou hlavy kladívka a těla kladívka, který můžeme vyjádřit pomocí substituce

$$z = y - x \quad 24$$

⁸ Odvozeno na základě materiálu [2]

Dosadíme-li uvedenou substituci do vztahů (22) a (23), výsledné rovnice reorganizujeme, dostáváme

$$m_e \ddot{z} + c \dot{z} + kz = -\frac{1}{1+M} F(t) \quad 25$$

kde

$$m_e = \frac{m_b \cdot m_h}{m_b + m_h} \quad 26$$

je efektivní hmotnost soustavy

$$M = \frac{m_h}{m_b} \quad 27$$

je hmotnostní poměr hmotných částí modelu. Efektivní hmotnost můžeme dosadit do vztahu pro vlastní frekvenci oscilátoru, čímž získáme vlastní frekvenci snímače síly ω_n

$$\omega_n = \sqrt{k/m_e} = \sqrt{\frac{k}{m_h} (1+M)} \quad 28$$

Ze vztahu (28) je patrné, že vlastní frekvence snímače síly v kladívku se odvíjí od hmotnosti hlavy kladívka a rovněž od poměru této hmotnosti s hmotností těla. Tuto skutečnost je vhodné zohlednit, jsou-li při analýze zvláštní požadavky na rezonanční vlastnosti kladívka. Frekvenční odezovou funkci systému lze odvodit ze vztahu (25) jako

$$H(j\omega) = \frac{1}{k - m_e \omega^2 + jc\omega} = \frac{1}{k(1 - r^2 + j2\xi r)} \quad 29$$

kde je r bezrozměrný poměr frekvence a vlastní frekvence

$$r = \omega/\omega_n \quad 30$$

a ξ je bezrozměrný poměr tlumení

$$\xi = \frac{c}{2} \sqrt{k \cdot m_e} \quad 31$$

Napětový výstup snímače lze vyjádřit na základě rovnice (29) a (25) jako

$$U_f(\omega) = \left[\frac{S_z}{k} \cdot \left(\frac{1}{1+M} \right) \right] \cdot \frac{F(j\omega)}{(1 - r^2 + j2\xi r)} \quad 32$$

kde obsahu hranaté závorky odpovídá efektivní napěťová citlivost S_f . Pro frekvence výrazně nižší, než je vlastní frekvence ω_n (tzn. $r \ll 1$), je však napěťový výstup téměř úměrný relativnímu pohybu z , takže je možné jej vyjádřit bez závislosti na frekvenci jako

$$U_f = \frac{S_z}{k} \cdot \left(\frac{1}{1+M} \right) \cdot F(t) = \bar{S}_f \cdot \left(\frac{1}{1+M} \right) \cdot F(t) = S_f \cdot F(t) \quad 33$$

kde \bar{S}_f je statická napěťová citlivost

$$\bar{S}_f = \frac{S_z}{k} \quad 34$$

2.4 Kalibrace rázového kladívka

Kalibrací rázového kladívka se zejména rozumí experimentální ověření napěťové citlivosti snímače síly, který je v kladívku zabudován. Tento parametr je stěžejní pro správné zpracování dat odezvy, získaných při vlastní modální analýze a jeho přesnost zásadně ovlivňuje použitelnost výsledků celé modální zkoušky.

Velikost síly vyvolané dopadem rázového kladívka na strukturu a změřené snímačem síly z hlediska operátora ovlivňují fakticky dva parametry – rychlost a hmotnost kladívka. Při dopadu kladívko na strukturu totiž působí setrvačnou silou, jak bylo popsáno v kapitole 2.3.1.1, a rozhodující je tedy velikost hybnosti. Operátor provádějící nárazy kladívkem rovněž spíše ovlivňuje rychlost nežli velikost síly nárazu, takže vhodnou cestou jak regulovat úroveň síly může být i změna hmotnosti hlavy kladívka pomocí přídavné hmotnosti⁹. Dynamiku vlastního nárazu ovšem ovlivňuje i tuhost a plocha povrchů, které se sráží. Čím tužší jsou povrchy srážejících se těles, tím menší je úroveň pružné deformace v době nárazu a tím kratší dobu trvá návrat do stavu před nárazem.¹⁰ Obdobně klesá délka doby nárazu, když se nárazová plocha (rovného profilu) zvětšuje.¹¹ To je možné vysvětlit představou rozložení setrvačné síly na větší plochu. Úroveň deformace (kompresní vzdálenost) pak klesá na úkor rostoucí nárazové plochy. Důsledkem rozdílné doby nárazu je různá úroveň zrychlení v době nárazu a tomu, na základě Druhého Newtonova zákona, odpovídá různá úroveň vyvolané síly.

Norma ČSN ISO 7626-5 v oddílu 7.2 uvádí, že při každé změně efektivní hmotnosti je třeba provést kalibraci. Síla měřená snímačem síly je úměrná síle mezi konci snímače, jejichž vzájemný pohyb shrnuje substituce (24). Síla vyvíjená na kalibrační blok je ovšem jinou silou – mezi kalibračním blokem a hrotem. Poměr těchto sil závisí právě na efektivní hmotnosti impaktoru (těla kladívka) a hrotu.¹² Součástí

^{9,10} BILOŠOVÁ, A., 2012., str. 90 [1]

¹¹ Acceleration levels of dropped objects , Endevco Meggitt Sensing Systems [4]

¹² Uvedeno v sekci věnující se kalibraci snímače v [11]

efektivní hmotnosti zmiňované normou je tedy jak hmotnost těla kladívka, tak hmotnost hrotu. Matematicky situaci popisuje i výše uvedená rovnice (32), kde se změna hmotnostních poměrů kladívka projeví jako změna efektivní citlivosti. Ani hrot ovšem není dokonale tuhý prvek, lépe jej popisuje spíše hmotná pružina, takže lze mluvit také o efektivní hmotnosti hrotu, která závisí na jeho hmotnosti a materiálových charakteristikách¹³.

2.4.1 Princip kalibrace

Při kalibraci rázového kladívka se využívá jednoduché lineární struktury známé hmotnosti a platnosti Druhého Newtonova zákona ve tvaru

$$F = m \cdot a \text{ [N]} \quad 35$$

Úderem rázového kladívka vystavíme strukturu silovému impulzu, jehož odezvu měří akcelerometr umístěný na struktuře. Vychází se z předpokladu, že síla vyvolaná nárazem je úměrná naměřenému zrychlení pouze přes hmotnost kalibrační hmoty¹⁴. Úroveň síly během nárazu měřené snímačem síly v kladívku lze vyjádřit

$$F_m = \frac{U_f}{S_f} \text{ [N]} \quad 36$$

kde U_f [V] je výstup snímače síly a S_f [V/N] je napěťová citlivost tohoto snímače, obojí ve smyslu vztahu (33).

Podobně lze popsat také zrychlení měřené akcelerometrem na kalibrační hmotě

$$a_m = \frac{U_a}{S_a} \text{ [ms}^{-2}\text{]} \quad 37$$

kde U_a [V] je napěťový výstup akcelerometru a S_a [ms⁻²] je jeho napěťová citlivost. Jelikož jak akcelerometr, tak snímač síly, jsou zpravidla snímače piezoelektrické a jejich výstup je nábojový, je napěťovým výstupem myšlen výstupní signál z nábojového zesilovače, resp. převodníku.

Na základě Třetího Newtonova zákona můžeme konstatovat, že akční síla způsobená kladívkem vyvolává stejně velkou reakci u známé struktury. Dosadíme-li do vztahu Druhého Newtonova zákona uvedeného výše na levou stranu rovnice sílu měřenou snímačem síly a na pravou stranu rovnice zrychlení měřené akcelerometrem, dostáváme

$$\frac{U_f}{S_f} = m \cdot \frac{U_a}{S_a} \text{ [N]} \quad 38$$

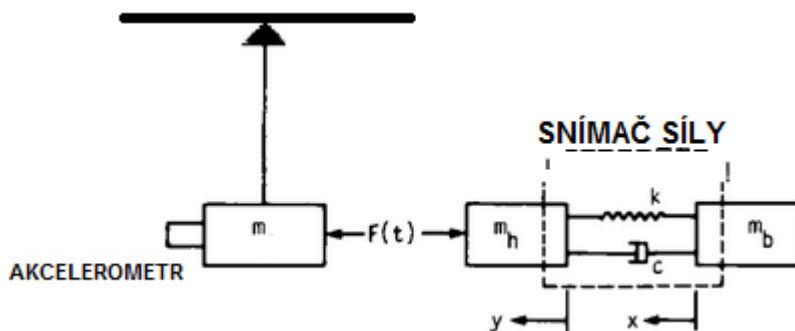
¹³ Uvedeno v sekci věnující se kalibraci snímače v [11]

¹⁴ Jedná se o interpretaci rovnic popisujících vztah zrychlení a síly na kalibrační hmotě, uvedeno mj. v [6]

kde m [kg] je hmotnost kalibrační hmoty, které kladívko nárazem uděluje zrychlení a na níž je připojen akcelerometr. Jednoduchou úpravou tohoto vztahu můžeme vyjádřit napěťovou citlivost snímače síly, jejíž hodnota je předmětem kalibrace.

$$S_f = \frac{S_a}{m} \cdot \frac{U_f}{U_a} [V/N] \quad 39$$

Jak je z posledního vztahu zřejmé, hodnotu napěťové citlivosti S_f můžeme určit při známé napěťové citlivosti akcelerometru, známé hmotnosti kalibrační hmoty a poměru napěťových výstupů obou snímačů. Jedinou neznámou je složkou ve vztahu je poměr napěťových výstupů a proto je jeho vyčíslení primárním bodem kalibrace.



Obrázek 8: Model rázového kladívka s kalibrační hmotou při kalibraci

2.4.2 Teoretická úskalí kalibrační metody

Ponecháme-li stranou praktickou stránku kalibrace spojenou s konkrétní realizací kalibračního pracoviště, můžeme narazit na mnohé teoretické předpoklady, které popisují vznik možných chyb. Základním problémem je vůbec přechod od Druhého Newtonova zákona ke vztahu (38). Přesněji – je síla měřená snímačem síly v kladívku silou, která působí na kalibrační hmotu? Jak se přenáší zrychlení z bodu dopadu hrotu kladívka k místu upevnění akcelerometru? Je zrychlení v bodě upevnění akcelerometru totéž zrychlení, které akcelerometr měří? To jsou otázky, které zanášejí do metody jisté pochybnosti.

Síla i zrychlení jsou veličiny vektorové. Využíváme-li skalárních hodnot, je třeba zajistit, že budou srovnávány odpovídající si složky. To je záležitostí uložení struktury, precisnosti nárazu a upevnění akcelerometru. Aby síla naměřená kladívkem mohla být dána do spojitosti s naměřenou odezvou, musí se pulz vyvolaný nárazem šířit přímo k akcelerometru – tzn. aby normála hrotu kladívka směřovala k místu ukotvení. Uložení kalibrační hmoty nesmí pohybu v tomto směru bránit a z daného důvodu se kalibrační hmota zavěšuje do tzv. volné polohy. Dokonale volného uložení by bylo velmi obtížné dosáhnout, proto se využívá zavěšení v podobě kyvadla s teoreticky jedním stupněm volnosti. Z výše uvedeného je zřejmé, že úder kladívka musí být veden právě a pouze ve směru tohoto stupně volnosti. Šikmý náraz hrotu na dopadovou rovinu kalibrační hmoty navíc může vyvolat atypický pulz, v krajním případě i plastickou deformaci (což bylo při měření pozorováno). Aby se minimalizovaly možnosti pohybu kalibrační hmoty v jiném stupni volnosti, je vhodné, aby se těžiště hmoty nacházelo uprostřed spojnice místa dopadu a místa uchycení akcelerometru, tedy aby místa dopadu a

uchycení byla situována na ose tělesa. Je zřejmé, že dopadová a úchytná plocha mají být vzájemně rovnoběžné.

Hrot kladívka při nárazu na kalibrační hmotu neurychluje pouze kalibrační hmotu samotnou, ale celou soustavu kalibrační hmoty – akcelerometr. Proto je při výpočtech napěťové citlivosti kladívka nutno zahrnout ke kalibrační hmotě také hmotnost použitého akcelerometru. Tím se zavádí systematická chyba, neboť výše uvedená soustava již není homogenní, nýbrž jde o systém nejméně dvou hmotných těles spojených imaginární pružinou s jistou tuhostí, která reprezentuje tuhost piezokrystalu akcelerometru. Řešením by mohlo být vytvoření teoretického modelu včetně zpracovaného akcelerometru. Hodnoty seismické hmoty akcelerometrů se však ve specifikacích běžně neuvádějí, takže pro výpočty by chyběly relevantní údaje. Problém se obchází použitím snímače s pokud možno nejmenší hmotností vůči kalibrační hmotě. Není-li to možné, nabízí se obdobně použití hmotnější kalibrační hmoty. Měla by být však dodržena podmínka uvedená v příslušné normě (ČSN ISO 7626-5, oddíl 7.2), tedy že hmotnost kalibračního bloku se musí zvolit tak, aby její pohyblivost reprezentovala pásmo pohyblivosti, které mají být změřeny. Navíc nárůst hmotnosti kalibračního bloku i výběr drobného akcelerometru je fakticky jistým kompromisem z hlediska odstupu šumu od signálu, neboť hmotný kalibrační blok příliš „tlumí“ úroveň odezvy a malé akcelerometry s malou seismickou hmotou nemusí mít příznivou citlivost. Hmotnost akcelerometru by měla být přesto alespoň 100x menší, než hmotnost kalibračního bloku.¹⁵ Přihlédnutí si vyžadují i způsoby připevnění akcelerometru ke kalibrační hmotě, které nejsou zcela rovnocenné. Možné způsoby (seřazené od nejvhodnějšího k nejméně vhodnému) jsou následující¹⁶

- šroub
- speciální lepidlo
- oboustranně lepící páska
- vosk
- magnet

Dalším zdrojem chyb při kalibraci může být frekvenční závislost parametrů ve vztahu (39). Rovnice (32) popisuje efektivní napěťovou citlivost jako frekvenčně nezávislou hodnotu, obdobně napěťové výstupy U_f a U_a nejsou konstantami, ale relativně velmi krátké pulzy, tedy časově proměnné hodnoty. Jelikož ve vztahu (39) figuruje poměr napěťových výstupů, je potřeba obě hodnoty odečíst stejným postupem. Standardně se provádí odečet z amplitud obou pulzů v časové oblasti, nebo se porovnávají amplitudová spektra na určité frekvenci. Oba způsoby mají své výhody a nevýhody, kterým bude věnována kapitola níže. Má-li být však rovnice (39) korektní, je vhodné ji doplnit o frekvenční závislosti parametrů.

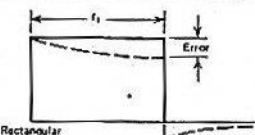
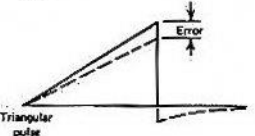
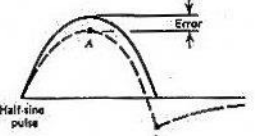
$$S_f(f) = \frac{S_a(f)}{m} \cdot \frac{U_f(f)}{U_a(f)} [V/N] \quad 40$$

Opomenuty by neměly zůstat chyby dynamického charakteru, které souvisí s principem funkce piezoelektrických snímačů a jejich obvodů. Piezoelektrický snímač nedokáže měřit stejnosměrnou složku, proto pulz, obsahující tuto složku je jistým způsobem zkreslen

¹⁵ Zmíněno v literatuře [7], ovšem bez odvození nebo náznaku, zda se jedná o výpočet, praktickou zkušenost nebo jinak zjištěnou hodnotu.

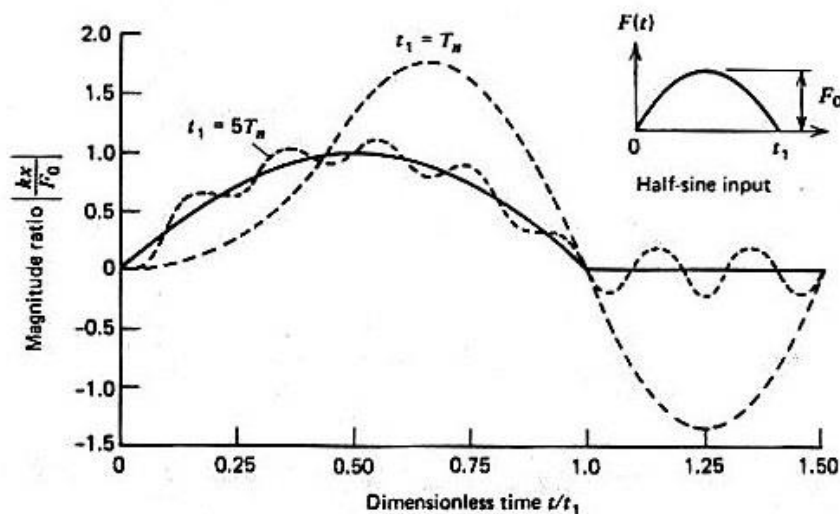
¹⁶ BILOŠOVÁ, A., 2012., str. 98 [1]

v závislosti na časových konstantách obsažený v obvodu. Srovnání a potřebné hodnoty časové konstanty $\tau = RC$ pro dosažení určité chyby tvaru pulzu ukazuje obrázek (9). Chyby tohoto charakteru má vliv zejména na odečet napěťových výstupů z amplitudy pulzu, při frekvenční analýze je nulová frekvence zpravidla nepodstatná.

Pulse Shape	Time Constant		
	2% Error	5% Error	10% Error
 Rectangular pulse	$50t_1$	$20t_1$	$10t_1$
 Triangular pulse	$25t_1$	$10t_1$	$5t_1$
 Half-sine pulse	A	$16t_1$	$6t_1$
	B	$31t_1$	$12t_1$

Obrázek 9: Chyba způsobená neschopností piezosnímače měřit stejnosměrnou složku, převzato z [6]

Jiná chyba dynamického charakteru, kterou zachycuje obrázek (10), může nastat při nedostatečném výběru akcelerometru, respektive vždy, nemá-li piezoelektrický snímač periodu vlastní frekvence podstatně kratší, než je perioda měřeného pulzu. Je-li použit hliníkový hrot kladívka, může délka pulzu klesnout i na 0,1ms. Vzhledem k tomu, že rezonanční frekvence piezoelektrických snímačů se často pohybují i v oblastech kolem 30kHz, nabývá tato chyba na významu – opět zejména při odečtu napěťového výstupu z amplitudy pulzu.



Obrázek 10: Chyba způsobená vlivem vlastní frekvence snímače na měřený průběh. T_n je vlastní perioda snímače. Převzato z [6].

3 NÁVRH A REALIZACE KALIBRAČNÍHO PRACVIŠTĚ

Základní sestava pro kalibraci rázového kladívka se skládá z pěti základních částí, fakticky obsažených při každé modální zkoušce:

kalibrované rázové kladívko

- měřicí karta
- snímač zrychlení pro měření odezvy
- převodníky z nábojového výstupu na napět'ový
- specificky uložená testovací struktura známých parametrů (součástí přípravku)
- (mechanismus pro pouštění kladívka)

3.1 Kalibrační hmota a její uložení

Aby bylo možno využít platnosti Druhého Newtonova zákona k sestavení rovnice (38), mělo by být technicky zajištěno, aby uložení kalibrační hmoty bylo volné právě (a pouze) v jednom směru, kterým bude veden úder kladívka, přičemž by měly být naplněny předpoklady uvedené v podkapitole 2.4.2. Volné uložení je takové uložení, kdy těleso nemá žádné vazby s okolím a je volně umístěno v prostoru¹⁷. V našem případě by neměly existovat žádné vazby pouze v daném směru. Kalibrační blok musí být považován za absolutně tuhý (ve smyslu „tuhého tělesa“), což klade určité nároky na vhodný materiál, ze kterého by měl být zhotoven. Dalším předpokladem pro následnou smysluplnou analýzu je lineárnost struktury, kterou ovšem není obtížné při zachování jednoduchých a jednodolitých geometrických tvarů dodržet. Ovšem i čistě lineární struktura může vykazovat nelineární chování, pokud úder na ni vedený přesáhne určitou míru, čili má vysoký činitel výkmitu (crest factor). Na skutečnost, že při nárazech občas nedochází jen k pružné deformaci, ale i k lokálnímu poškození struktury¹⁸, může poukazovat například povrch často užívaného hrotu, zřetelně místy deformovaný od nesprávně vedených nárazů, kterým se při ruční manipulaci lze jen těžko zcela vyhnout.

Pro práci bylo využito již částečně sestaveného přípravku, který sloužil podobným účelům v rámci jiné práce. Přípravek je tvořen stabilní nosnou konstrukcí se dvěma rameny, jejichž vzájemnou vzdálenost lze nastavit od 0cm. Ramena umožňují závěs kalibračního bloku pomocí čtyř vlasců stejné délky, rozmístěných symetricky (po 2 na každém ramenu), aby osa kalibračního bloku zaujímala vodorovnou polohu. Jako kalibrační hmota slouží (v rámci práce) tři různé ocelové válce – hmotností 520,71g, 4262g a 4230g (hmotnost nebyla u větších válců změřena se stejnou přesností jako u

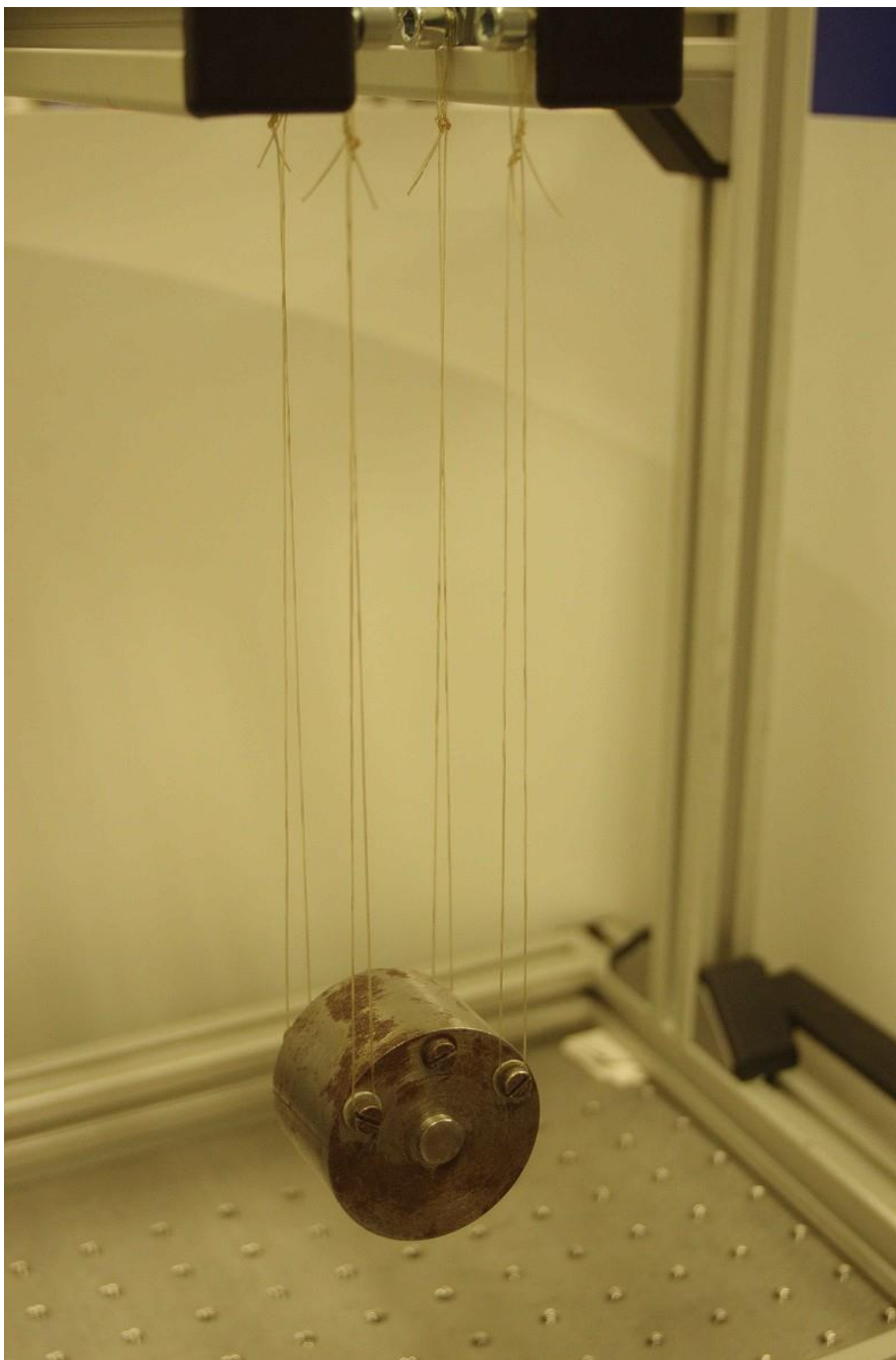
¹⁷ BILOŠOVÁ, A., 2012., str. 84 [1]

¹⁸ před tímto upozorňují i informativní materiály firmy Brüel & Kjær [8]

válce malého kvůli rozsahům použitých vah). Válce mají na každé podstavě poblíž obvodu vyhloubeny závity pro šrouby, za něž drží přes vlasce na nosných ramenech. Ve volném uložení zaujímají zavěšené válce pozici takovou, že hlavní osa (resp. výška) válce je vodorovná s horizontem. Správně zavěšený válec má tedy podstavy orientovány přesně kolmo k zemi, přičemž ve středu (na ose) jedné podstavy je vyhlouben závit pro uchycení akcelerometru. Na druhé podstavě je v místě osy vytvořen plochy kruhový výstupek určující místo úderu kladívka, které by mělo hrotem dopadat přesně na střed tohoto výstupku. Nejméně hmotný válec (pracovně označený M1) a válec hmotnosti 4230g (pracovně označený M3) jsou vyhotoveny z jednoho kusu oceli, zbylý válec (o hmotnosti 4262g – M2) má dopadový výstupek vlisován.

Šikmý a nepřesný úder jsou jevy, se kterými je třeba počítat při ruční obsluze rázového kladívka, jak v rámci kalibrace, tak v rámci modálních zkoušek. Použití mechanismu pro úder kladívkem sice může tento vliv minimalizovat, nicméně rázové kladívko v podobě kladívka kalibrovaného (tzn. mimo jiné vybavené pogumovanou rukojetí) je přímo určeno pro ruční manipulaci. Vymezení přesného vlivu nesprávně vedeného úderu je těžko proveditelné, vezmeme-li v úvahu, že chyba vznikající při nedbalém úderu, je mimo jiné záležitostí uložení struktury. Nesprávně vedený úder – a to jak šikmý, tak vedený mimo osu, vyvolá sílu, která nepůsobí ve směru stupně volnosti volného uložení a to vyvolá patřičnou reakci v závislosti na „robustnosti“ volného uložení. Robustností volného uložení je myšlena schopnost tohoto uložení udržet kalibrační blok v pohybu po správné ose a eliminovat síly, které ve směru osy volného pohybu nepůsobí. Vliv má samozřejmě také aktuálně použitá hmotnost kalibračního bloku, protože se setrvačná síla z principu „snaží“ udržovat přímočarý pohyb. Pokud by měla být vytvořena jakási „korekční křivka nedbalého úderu“ musela by mít pravděpodobně svou specifickou variantu pro kombinace zahrnující různé úhly šikmého dopadu, různé pozice nepřesného úderu, různé hmotnosti kalibračního bloku a různé síly dopadu. Je zřejmé, že takové výsledky by byly prakticky neaplikovatelné a proto je příhodné spíše se soustředit na otázku, zda je vhodné uzpůsobit volné uložení k maximální robustnosti.

Přenesme situaci záměrně do extrému a uvažujme stav, kdy hrot kladívka udeří do kalibračního bloku zcela kolmo vůči ose volného pohybu kyvadla. Snímač síly zaznamená abnormálně tuhý náraz, zatímco akcelerometr nezaznamená ve směru detekce žádný pohyb. Výsledkem takového počínu bude zcela zcestná kalibrovaná hodnota. Je-li výše popsáná situace limitním popisem nedbalého úderu, pak jakýkoliv šikmý náraz nutně znamená chybný údaj, bez ohledu na to, zda realizace volného uložení tlumí nebo netlumí síly (a momenty) působící mimo osu žádaného pohybu. Protože operátor si vůbec nemusí všimnout, zda úder byl veden dostatečně pečlivě, maskování projevů nepečlivého úderu může mít nepříznivé následky. Je tedy vhodné primárně sledovat při vedení kalibračního úderu směr pohybu kalibračního bloku bezprostředně po nárazu a při zřejmějším náznaku jeho pohybu mimo osu poslední hodnotu zahodit a úder opakovat.



Obrázek 11: Malý kalibrační blok (M1) a jeho uložení

3.2 Měřicí karta

Otázka výběru měřicí karty je spjata se zpracováním signálu. Karta musí zvládat sbírat data ze dvou signálů, klíčovými parametry jsou bitové rozlišení, vzorkovací frekvence a rozsah karty. Velikost vhodného rozlišení je svázána s měřicím rozsahem karty a hlavně s možnostmi zesílení použitých nábojových zesilovačů či převodníků. To platí zejména u karet, kde je neměnný rozsah A/D převodníku, zvláště, je-li nábojový zesilovač použit pouze pro jeden měřicí kanál (což je přesně případ měření v rámci této práce). Úroveň síly při dopadu a úroveň odpovídající odezvy se při kalibracích může značně měnit kupříkladu v závislosti na použitém hrotu. S hroty o malé tuhosti (gumový hrot) ani při velmi silném nárazu často nelze vyvolat takovou úroveň výstupního napětí, jakou vyvolá lehký náraz nejtěžších hrotů. Okamžik, kdy je s tuhým hrotem využít téměř celý měřicí rozsah karty, může vystřídat situace, kdy je využita i pouhá setina rozsahu, nemá-li některý z převodníků možnost zesilovat, nebo je stupnice zesílení příliš hrubá. Velikost kvantizační chyby tím pak fakticky 100x vzroste. Částečným řešením může být průměrování výsledků z více záznamů, protože velikost pulzu se vždy v drobné míře mění a pravděpodobnost, že nedostatečné rozlišení A/D převodníku zavede zápornou chybu je stejná, jako že bude zavedena stejně velká chyba kladná. V rámci práce byla použita karta s rozsahem $\pm 10\text{V}$ a 16bitovým rozlišením. Záporný rozsah je fakticky nevyužit, přičemž amplituda pulzu při použití gumového hrotu může bez zesílení (tedy při převodu 1mV/pC) dosáhnout hodnoty pouze $0,2\text{ V}$. Kvantizační chyba pak může při 16bitovém rozlišení způsobit chybu odečtu amplitudy asi $0,2\%$, což již není zcela zanedbatelná hodnota.

Aby pulz byl zachycen dostatečným počtem vzorků, musí mít karta dostatečnou vzorkovací frekvenci přepočtenou na jeden kanál. Pro deset vzorků na nejkratší vyvolatelný pulz (délky kolem $100\mu\text{s}$) je potřeba vzorkovací frekvence 100kHz . Desetivzorkový záznam pulzu může být však dosti nedostatečný v situacích, kdy je průběh zatížen rezonancemi, které se u takto krátkých pulzů vyskytují nejmohutněji. Při sto vzorcích, což odpovídá vzorkovací frekvenci 1MHz , jsou již možnosti zpracování (například fitování pulzu s rezonancí na pulz bez rezonance) mnohem širší, jak bude ukázáno v kapitole věnující se zpracování naměřených signálů.

Použitá karta firmy National Instruments NI 9223 disponuje maximální vzorkovací frekvencí právě 1MHz , respektive 1MS/s na kanál. Zahřívací doba karty je alespoň 10minut .¹⁹

3.3 Akcelerometr a nábojové převodníky

Podmínky pro použití akcelerometrů byly již popsány v podkapitole 2.4.2, kde byl primárně uvažován akcelerometr na piezoelektrickém principu. Jelikož hmotnost akcelerometru způsobuje systematickou chybu, nabízí se úvahy jak změřit zrychlení

¹⁹NI 9222/9223 Calibration Procedure, National Instruments [10]

kalibračního bloku bez této chyby. Alternativou by mohlo být použití interferometru. V rámci této práce byl vliv hmotnosti akcelerometru při výběru akceptován a pro měření s menším kalibračním blokem hmotnosti 520,7g využit snímač typu KD 91, jehož hmotnost udávají specifikace (umístěné v přílohách) jako 1,8g – což je vůči kalibračnímu bloku téměř 300x méně. V souvislosti s podmínkou pro poměr hmotností kalibračního bloku a akcelerometru uvedenou v podkapitole 2.4.2 bude v tomto případě tato systematická chyba brána za relativně zanedbatelnou. V též podkapitole bylo uvažováno také nad vlivem vlastní frekvence akcelerometru na půl-sinusový pulz dané délky, přičemž specifikace uvádějí rezonanční frekvenci akcelerometru typu KD 91 větší než 50kHz, obdobně jako v případě snímače síly v kladívku. Příslušné kalibrační listy ovšem uvádějí prudký nárůst citlivosti již za hodnotou 10kHz (kalibrační listy obsahují frekvence pouze do 20kHz). V podkapitole 2.3.2 jsou uvedeny výsledky výpočtu spektra teoretického půl-sinusového pulzu s nejkratší odhadovanou délkou, kde poklesu o 3dB vůči maximální hodnotě odpovídá frekvence přibližně 5kHz, na 25kHz je pokles asi o 50dB.

V kalibračních měřeních byl rovněž při sledování vlivu akcelerometru použit i akcelerometr typu KD 30, jehož hmotnost byla změřena na 20,30g, tedy zhruba desetinásobek hmotnosti snímače KD 91. Rezonanční frekvence tohoto typu akcelerometru uvedená ve specifikacích má hodnotu větší nebo rovnou 20kHz. Příslušný kalibrační list tohoto snímače prezentuje význačný nárůst citlivosti opět zhruba od 10kHz.

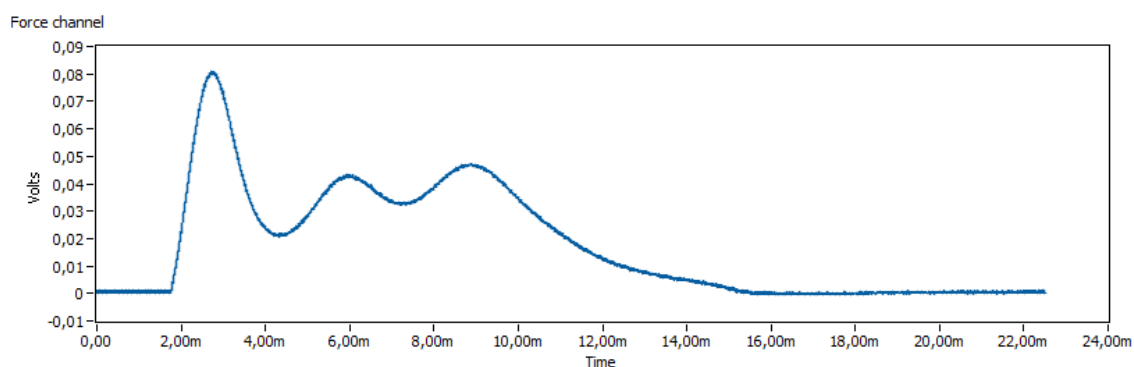
Klíčovou úlohu při kalibraci snímače síly plní převodníky mezi nábojovým a napětěovým výstupem. Příspěvek sebelepšího piezoelektrického akcelerometru pro snímání odezvy může být značně devalvován, má-li převodník výraznou převodní chybu. Při měření byly pro převod výstupu z akcelerometru použity nábojové zesilovače Aura C4.1 a MMF M68, z nichž byl po posouzení šumového profilu vybrán druhý zmíněný. Při měření je třeba navíc zohledňovat vliv časových konstant (zejména při přepínání zesílení) a nechat nábojový zesilovač patřičně ustálit. Zahřívací doba převodníku MMF M68 je dle specifikací 15 minut.

3.4 Mechanismus pro pouštění kladívka a vliv operátora

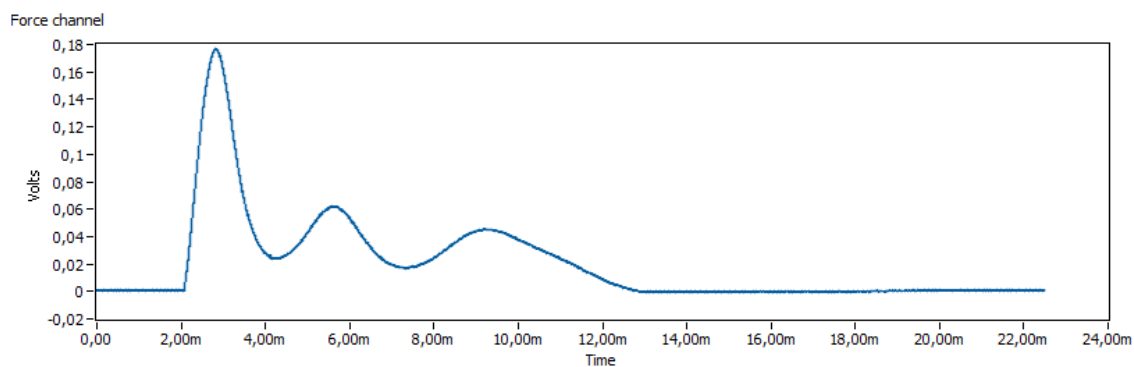
Netypickou součástí kalibračního pracoviště je mechanismus pro pouštění kladívka, který se při kalibracích standardně nepoužívá, protože kladívko – stejně jako při vlastní modální zkoušce – je běžně ovládáno ručně. K sestavení spouštěcího mechanismu vedla snaha při kalibracích maximálně omezit vliv zručnosti operátora a tím jej vyloučit z úvah o možných zdrojích nepřesností. Vliv zručnosti operátora je jen velmi těžko popsatelný a nemusí vykazovat žádnou rozumně postihnutelnou tendenci, což by mohlo být při testování jiných vlivů nesprávně interpretováno. Protože ani při použití mechanismu pro pouštění kladívka nemůže být zcela vyloučen vliv operátora (spouštěcí mechanismus musí být správně nastaven pro přesný dopad na požadované místo, chvění

a kývání zavěšeného kalibračního bloku musí být maximálně utlumeno, kladívko musí být řádně ukotveno ve spouštěcím mechanismu, ale může se během práce uvolňovat, apod.) byla snaha každou skupinu měření provést dvakrát, aby byla možnost porovnání odchylek výsledků získaných při teoreticky totožných podmínkách. Svě opodstatnění to má hlavně při posuzování opakovatelnosti měření a věrohodnosti naměřených dat.

Spouštěcí mechanismus sestává z nosného rámu, v němž je ukotvena vodorovná tyč, která přes ložisko nese padací rameno z hliníkového profilu. Ke hliníkovému profilu je pomocí pogumovaných instalatérských objímek připevněno kladívko tak, aby rovina hrotu při spuštění ramena byla v okamžiku dopadu co nejpřesněji rovnoběžná s dopadovou rovinou. Mechanismus je ještě doplněn o „spouštěcí věž“, která zajišťuje, aby rameno mohlo být opakovaně pouštěno z definované výšky a při pouštění na něj nebyly přeneseny vibrace (od ruky operátora). Ohledně připevnění (respektive vazby) kladívka a hliníkového profilu padacího ramena bylo třeba vyřešit problém, který vznikal při použití gumového hrotu, jehož tuhost je srovnatelná s tuhostí gumového madla kladívka. Soustava kladívko – padací rameno patrně vytvořila efektivní hmotnost se specifickým průběhem nárazu. Bylo možné pozorovat, že míra dotažení objímky – tedy tuhost vazby mezi kladívkem a padacím ramenem významně ovlivňuje tvar naměřeného pulzu, jak to ukazují obrázky (12) a (13).



Obrázek 12: Záznam z měření (kanál síly) se silně dotaženou objímkou



Obrázek 13: Záznam z měření (kanál síly) s méně dotaženou objímkou

Z obrázků je patrné, že kromě tvaru pulzu se mění s dotažením objímky i amplituda čelního pulzu, který lze přisoudit nárazovému ději mezi hrotem a kalibračním blokem. Jelikož při ručním držení kladívka k takovému efektu vůbec nedochází (a ani při použití spouštěcího mechanismu s jiným hrotem), lze předpokládat, že má deformovaný tvar pulzu souvislost právě s vazbou mezi rukojetí kladívka a mechanismem, který ji drží. V této oblasti se tedy dotýkáme i problematiky vlivu ruky (paže) operátora na kalibrovanou hodnotu. Rovnice (33) ukazuje vliv poměru hmotnosti části kladívka před snímačem a za ním. Můžeme-li považovat paži nebo rameno spouštěcího mechanismu za část hmotnosti za snímačem, bude mít tato hmotnost na kalibrovanou hodnotu vliv a krajní případ této situace zachycují právě obrázky (12) a (13). Řešením je mechanicky tyto hmotnosti oddělit od rukojeti kladívka, jejíž pogumování těmto účelům nedostačuje. Kladívko přirozeně nemůže levitovat, takže řešením bude muset být kompromis pevnosti a neměnnosti uchycení vůči tuhosti tlumícího prvku. Tuhost lidské dlaně je (zdá se) natolik malá, že funkci tlumícího prvku plní dostatečně a energie paže je absorbována. Tuto funkci jsem se pokusil u padacího ramena bezúspěšně napodobit vrstvou měkké gumy, která byla proložena mezi kladívkem a hliníkovým profilem. Výsledkem bylo sice částečné oddálení „parazitního“ pulzu v časovém záznamu, avšak nedostatečné. Po obdobně neúspěšném odzkoušení tlumícího obalového materiálu z drobných bublinek přinesla přijatelné výsledky až cca 2cm tlustá vrstva molitanu při velmi mírném dotažení. V souvislosti s tím vyvstává otázka, zda je ukotvení kladívka dostatečně pevné a zda nemůže při kalibracích docházet například ke změnám v natočení. Z tohoto důvodu bylo po každém kalibračním úderu kontrolováno, zda se kladívko neotočilo v ose upevnění a byla-li zaznamenána drobná změna, kladívko bylo srovnáno do výchozí polohy. Otázka vlivu paže resp. padacího ramena však stále zůstává otevřená. Popsat a kvantifikovat tyto vlivy bude ovšem možné, až se podaří dostat ostatní zdroje chyb pod kontrolu na takovou úroveň, že budou tyto nuance identifikovatelné.

3.5 Obslužný software a jeho funkcionalita

Součástí zadání práce bylo vytvoření obslužného sw v LabVIEW, umožňujícího celý proces kalibrace automatizovat. To, kromě vytvoření uživatelského prostředí a přenosu dat z karty do počítače obnáší hlavně implementaci zpracování naměřených signálů, které je poněkud komplexní a bude mu věnována celá kapitola níže.

Jádro uživatelského prostředí sestává z šesti podsekcí, z nichž každá obstarává část procesu kalibrace. Jelikož program pro tvorbu sw je v anglickém jazyce, bylo v anglickém jazyce ponecháno i uživatelské rozhraní a také komentáře ve vlastním blokovém diagramu programu. Podsekcce jsou následující:

Create measurement

Jedná se o úvodní obrazovku po spuštění programu. Umožňuje nastavení nebo zadání klíčových parametrů, od nichž se odvíjí kalibrovaná hodnota a nastavení parametrů

měřicí karty. Podsekcce nabízí tři způsoby načtení měření – vytvoření zcela nového souboru pro nové měření, přidání nové měřicí skupiny k již vytvořenému měření nebo načtení souboru s dříve naměřenými daty. Klíčovým pojmem je Measurement group („měřicí skupina“), kterým se má rozumět statistický soubor kalibrovaných hodnot pro jednu konkrétní kalibraci. Statistickým zpracováním údajů uložených v Measurement group pak vzejde konečná kalibrovaná hodnota. Naměřené průběhy jsou v nepozměněném stavu průběžně ukládány do přehledného TDMS souboru s unikátním názvem podle času založení měření. Pokud se uživatel později rozhodne zpracovat data jiným způsobem, než byly zpracovány (například použít jinou okenní transformaci pro Fourierovu analýzu), má vždy k dispozici původní neupravená data. Do jednoho souboru lze uložit neomezené množství Measurement group.

Trigger Settings

Jde o podsekcce s náhledovými okny, v nichž je zobrazen aktuální naměřený výstup ze snímačů. Účelem je vizuální kontrola offsetu a charakteru šumové úrovně, případně ustálenosti výstupu z převodníků. Podsekcce umožňuje nastavení délky záznamu, spouštěcí úrovně v kanálu síly (na základě šumového profilu aktuálního výstupu), případně hodnoty pretriggeru. Protože použitá karta NI 9223 nedisponuje možností vlastní synchronizace spouštění, bylo třeba vyřešit zachycení požadovaných dat softwarovou cestou. Jelikož se čtení požadovaných dat provádí za nepřetržitého měření měřicí karty, umožňuje program pro vykonávání této úlohy použít jakoukoliv jinou kartu bez zabudované funkce spouštění. Výběr mařicí karty lze zvolit v nabídce Create measurement.

Scan

Podsekcce určená pro vlastní sběr dat. Obsahuje tlačítko pro spuštění záznamu, náhledová okna pro kontrolu naměřených průběhů a tlačítka pro přidání respektive smazání právě naměřeného průběhu do aktuální Measurement group.

Overview

Obsahuje náhledová okna, kde je možno kdykoliv si prohlédnout všechny naměřené časové průběhy všech Measurement group uložených v rámci otevřeného souboru. Obsahuje tři režimy náhledu – srovnání dvou měření, náhled obou kanálů (síly a zrychlení) a největší náhled jednoho průběhu.

FFT Analysis

Jedná se o obdobu Overview sekce pro zobrazení záznamů ve frekvenční oblasti. Zobrazena je ke kontrole také frekvenční přenosová funkce (FRF), konkrétně „zdánlivá hmotnost“ tedy poměr síly a zrychlení. Hodnota „zdánlivé hmotnosti“ by měla odpovídat s přesností $\pm 5\%$ hmotnosti kalibračního bloku včetně připojeného akcelerometru (dle normy ČSN ISO 7626-5, oddíl 7.2). K výpočtu této FRF je použita konstanta napěťové citlivosti akcelerometru uvedená v zadaných parametrech měření a

vypočtená napěťová citlivost snímače síly pro příslušnou uvedenou frekvenci. Podsekcce Window Setting obsahuje režim úpravy zpracování ve frekvenční oblasti dle uživatelského nastavení. Nastavit lze typ a rozsahu okna použitého při výpočtu spektra s okamžitým náhledem vlivu. K dispozici je okno exponenciální, obdélníkové, s plochým vrchem, automatické nebo žádné. Není-li nastavení používání oken v tomto režimu upraveno, použije se defaultní nastavení.

Summary statistics

Podsekcce statistického zpracování všech Measurement group uložených v aktuálně otevřeném souboru. Má dva režimy zobrazení. Prvním režimem je tabulka, která obsahuje i veškeré informace o parametrech měření, vypočtené střední hodnoty a směrodatné odchylky jak pro odečet hodnoty z amplitudy, tak pro odečet hodnot z frekvenční oblasti na uživatelsky definované frekvenci. Statistické zpracování má implementovanou automatickou filtraci hrubých chyb dle pravidla 3σ . Druhý režim zobrazuje graf rozptýlení hodnot ve statistickém souboru (Measurement group) pro rychlé vizuální posouzení kompatibility kalibračních měření.

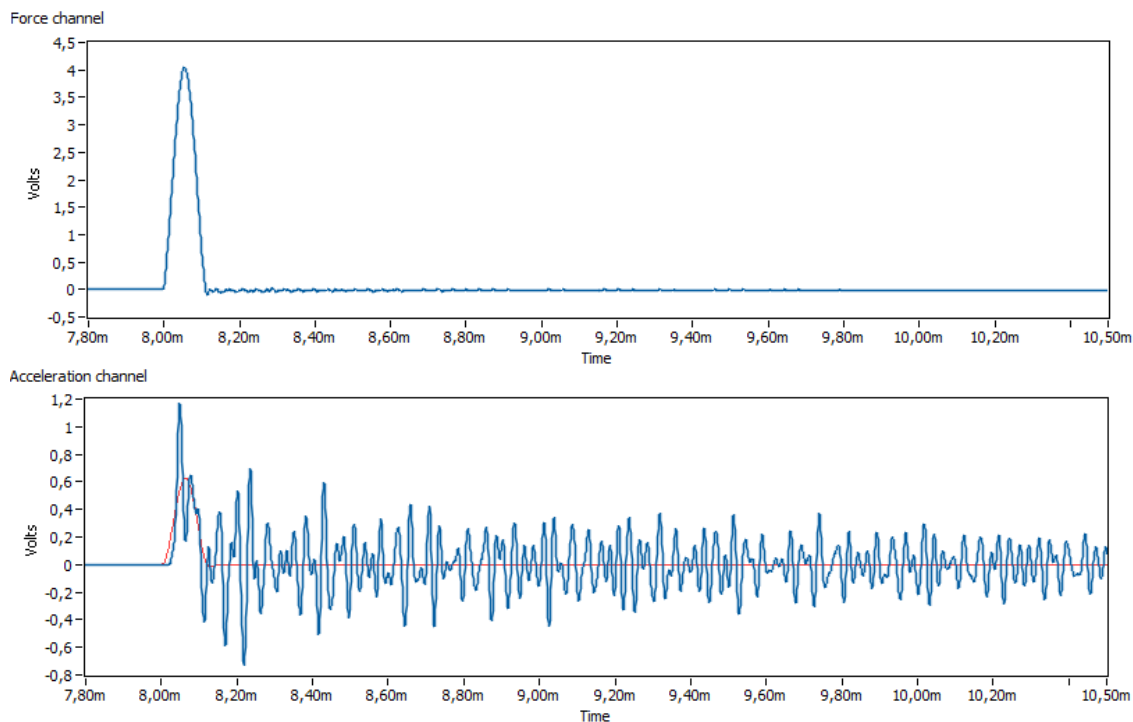
3.5.1 Analýza signálů v časové oblasti

Nedílnou součástí a stěžejním bodem kalibrace a tedy i obslužného sw je správná interpretace naměřených dat. Odečet amplitud pulzů pro účely dosazení hodnot do vztahu (39) není jednoznačná záležitost. Na pulzech je vždy superponovaná určitá úroveň šumu a často také kmity vlastní rezonanční frekvence snímače, případně jiné rezonance. Prosté odečtení maxima každého průběhu je proto ve většině případů hrubě nedostačující, obzvláště projevuje-li se na výstupech ze snímačů „plavající nula“. Samotnému odečtu maxima pulzu by mělo předcházet odstranění stejnosměrné složky a vhodná filtrace signálu. Abychom filtrací nedeformovali tvar pulzu, je důležité zjistit, jaké frekvence pulz obsahuje, případně vyzkoušet, pro jaké mezní frekvence filtru je vyhlazení pulzu dostatečné. Obslužný software využívá dolnopropustný filtr typu Butterworth s mezní frekvencí 25kHz, která byla odhadnuta experimentálně. Výstup z akcelerometru je rovněž filtrován filtrem vestavěným v nábojovém zesilovači MMF M68 s mezní frekvencí 50kHz. Offset je analyzován z části před spuštěním záznamu, konkrétně z prvních 20% délky záznamu. Aby tento úsek záznamu neobsahoval žádnou část pulzu, umožňuje software nastavit pretrigger maximálně na 30% délky pulzu. Poté, co je analyzovaná stejnosměrná složka odečtena od celého záznamu a záznam je vyfiltrován, provede se v kanále síly odečet maxima pulzu vůči nulové hodnotě. Kanál zrychlení byl při kalibracích standardně zatížen rezonancemi použitého akcelerometru a pro odečet amplitudy bylo využito fitování pomocí metody nejmenších čtverců.

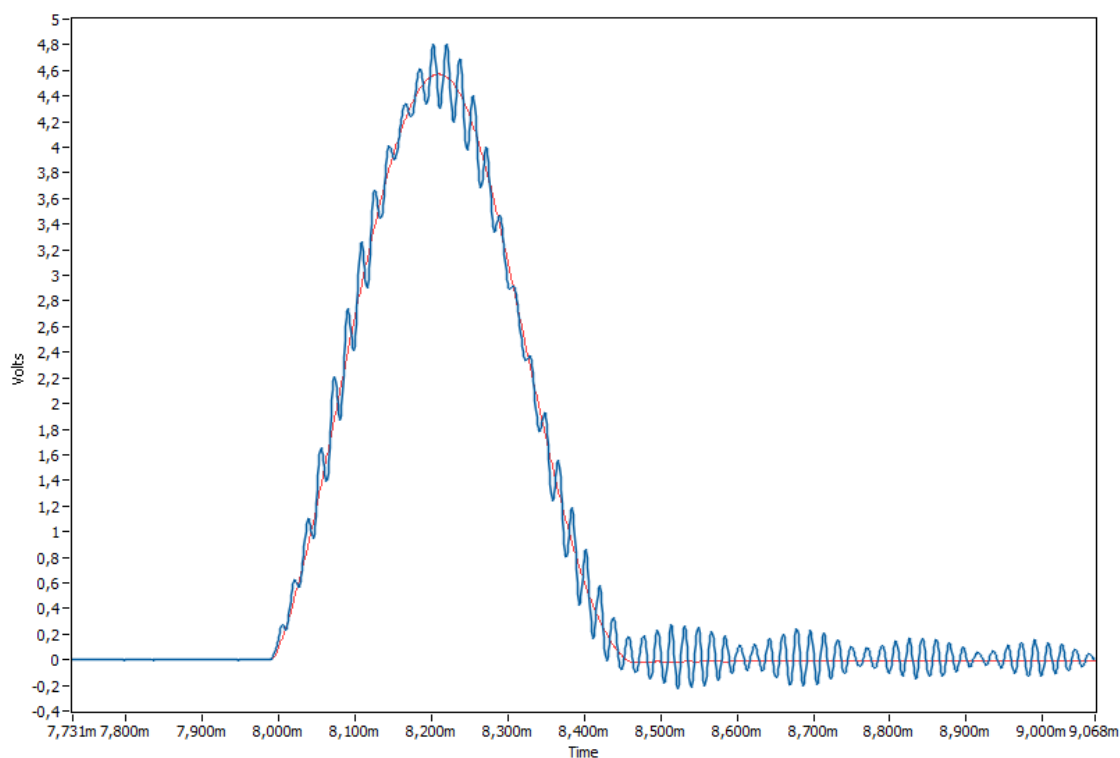
Protože se reálné průběhy od půl-sinusového pulzu mohou dosti lišit a přesnější analytický popis není k dispozici, bylo využito fitování kanálu zrychlení na kanál síly. Metoda vychází ze čtyř předpokladů: Prvním předpokladem je, že v kanále síly i kanále

zrychlení je obsažen tentýž tvar pulzu a veškeré rozdíly ve tvaru jsou dány pouze šumem nebo rezonancemi. Druhý předpoklad je založen na úvaze, že začátek i konec pulzu je v obou kanálech stejný, přestože amplituda je různá. Vycházejí-li navíc čela obou pulzů z nulové hodnoty, vynásobením jednoho z průběhů správnou konstantou oba průběhy splynou – respektive suma kvadrátů odchylek odpovídajících si vzorků nabude minima. Za amplitudu pulzu v kanále zrychlení je pak možno považovat hodnotu amplitudy z kanálu síly, vynásobenou touto příslušnou konstantou. Fázové zpoždění pulzů vlivem šíření kalibračním blokem nebylo při měřeních nikdy pozorováno. Fázové zpoždění vlivem aplikace filtru se po vizuálním srovnání jeví zanedbatelné jako – např. viz obrázek (14). Třetí předpoklad vzešel z praxe, kdy se ukázalo, že množství superponovaného šumu a rezonancí na pulzu v kanále síly je mnohem menší, než v případě kanálu zrychlení. Po vyfiltrování nabývá pulz síly téměř předpokládaného teoretického tvaru, s relativně plynulým přechodem v oblasti čela a konce pulzu. Čtvrtým předpokladem je, že střední hodnota rezonančních kmitů v záznamu je nulová a totéž platí i o střední hodnotě šumu. Obsahuje-li šum v záznamu stejnosměrnou složku, je předpokládáno, že je korigována při předzpracování signálu v rámci „srovnání“ offsetu. Praktický příklad úspěšného fitování pulzů je zachycen na obrázku (15).

Přesnost fitování se významně zvyšuje s tím, nakolik jsou výše uvedené předpoklady splněny. Algoritmus je implementován tak, že nejprve zbaví průběhy stejnosměrné složky (na základě části záznamu před spouštěcí úrovní), vyfiltruje signál síly a poté porovnává jeho průběh vynásobený konstantou k s průběhem v kanále zrychlení. Konstanta k se mění s proměnlivým krokem v rozmezí desetiny až dvojnásobku maxima nalezeného v kanále síly. Shodnost je počítána jako suma kvadrátů odchylek mezi porovnávanými vzorky, přičemž se vybírá násobek s nejmenší odchylkou. Část záznamu před spouštěcí úrovní do porovnávání zahrnuta není, aby se zamezilo zbytečnému porovnání šumu nebo „plavajících nul“. Vyskytuje-li se problém „plavající stejnosměrné složky“ v analyzované části (způsobený například neustálenými časovými konstantami nábojového zesílení), což může být efektivně maskováno průběhem a dozníváním pulzu, projeví se to na výsledném odečtu jako chyba.



Obrázek 14: Ukázka průběhů naměřených pomocí obslužného sw - silový pulz a jeho odezva se slabě tlumenými rezonančními kmity více frekvencí (červeně je vyznačen výsledek fitování). Použit hliníkový hrot, kalibrační blok hmotnosti 4230g a snímač KD 30.



Obrázek 15: Příklad rezonancí na pulzu zrychlení při úderu plastového hrotu (modře) a na něj fitovaného pulzu z kanálu síly, ze kterého je odečtena amplituda (červeně).

3.5.2 Analýza signálů ve frekvenční oblasti

Alternativou vůči odečtu hodnoty z amplitudy je odečet dvou příslušných složek ve frekvenční oblasti. Tento způsob nabývá na významu, zajímá-li nás hodnota napěťové citlivosti pro určitou specifickou frekvenci, nebo pokud jsou časové průběhy již natolik zatížené rezonancí či jinou chybou, že fitování nedává uspokojivé výsledky. Nutnost použití Fourierovy transformace ovšem oproti analýze v časové oblasti vnáší do měření další možné zdroje chyb. Diskrétní Fourierova analýza má totiž mnoho aspektů, které, pokud nejsou správně ošetřeny, mohou vést k chybným výsledkům²⁰. Značně komplikovaná je zejména problematika používání okenních transformací, jejich vlivu na signál a korekce tohoto vlivu.

Standardně se okenní transformace aplikují na signál periodický nebo takový, jehož délka je podstatně delší, než délka záznamu. Hlavním účelem bývá omezení vzniku neexistujících frekvencí, které se ve spektrech objevují při ořezání signálu a minimalizace chyby únikem. Užitečný signál v kanále síly, stejně jako signál v kanále zrychlení, je z principu aperiodický a až na výjimky je možné jej celý obsáhnout do jednoho záznamu. V takovém případě, je-li celý pulz obsažen a žádná jeho část není ořezána, nedochází ve spektru ke vzniku „neexistujících spektrálních čar“ a není třeba použít okna k úpravě signálu. Řešením je tedy použít délku záznamu takovou, aby v ní byl celý signál bezpečně obsažen.

Je-li délka záznamu řízena délkou odezvy, může nastat několik problémů. U krátkých záznamů může být nedostatečné frekvenční rozlišení spektra. Řešení situace je zde relativně jednoduché a spočívá v umělém prodloužení doby záznamu pomocí nulových hodnot. Větším problémem je situace opačná – pokud je záznam velmi dlouhý, například pokud rezonance doznívají poměrně dlouhou dobu, nebo pokud dlouhou dobu záznamu zvolíme cíleně kvůli požadovanému frekvenčnímu rozlišení. V takových případech může délka pulzu zaujímat pouze zlomek délky záznamu. Problémem, ke kterému zde dochází, je snižování odstupu signálu od šumu²¹. Při výpočtu spektra se předpokládá, že signál obsahující analyzovanou frekvenci je rozložen v celém záznamu (což je typičtější u signálů periodických) a že záznam obsahuje celočíselný násobek periody tohoto signálu. V případě příliš dlouhého záznamu není užitečný signál pulzu rozprostřen po celé délce, zatímco šumový signál postihuje záznam celý. V amplitudovém spektru je pak šumový signál vůči užitečnému znásoben tolikrát, kolikrát delší dobu v záznamu působí a odstup signálu od šumu se tak snižuje. Tento problém nelze odstranit průměrováním ve frekvenční oblasti, protože šum se zde ke spektru pouze přičítá²².

Aby se zamezilo hromadění vlivu šumu, je vhodné ty části záznamu, které již neobsahují signál síly (resp. zrychlení) vynulovat. To opět přináší možné potíže. Nejprve je nutné správně rozeznat, kde končí odezva a které části jsou již utvářeny

²⁰ BILOŠOVÁ, A., 2012., str. 34 [1]

²¹ ČSN ISO 7626-5, kap. 8.5.1

²² ČSN ISO 7626-5, kap. 8.5.1

pouze šumem. Protože přechod odezvy v šum bývá zpravidla plynulý, je třeba si zvolit určitý práh, pod kterým bude záznam považován za šum. Je-li tento práh vysoký, ořezáním na jeho kraji vznikne hrana, která bude ve frekvenční oblasti nesprávně interpretována. Bude-li nízký, záznam bude obsahovat zbytečně mnoho šumu. A konečně - obsahuje-li šum významnou složku periodického šumu, jeho náhlé ořezání se opět projeví ve frekvenční oblasti nesprávně a může zasáhnout poměrně široké frekvenční pásmo.²³ V obslužném sw je rozpoznávání šumové úrovně implementováno analýzou části záznamu před spuštěním. Tato část je rozdělena na dílčí části a v každé z nich je nalezeno maximum. Poté se maxima seřadí, několik největších hodnot se zahodí jako nahodilý abnormální šum a nejvyšší zbylá hodnota se použije jako horní mez šumu. Následně se ještě provede kontrola, zda detekovaná horní mez šumu není větší než 1% amplitudy pulzu. Pokud ano, jako horní mez šumu je použito právě 1% hodnoty amplitudy. Je-li totiž šum vyšší než 1% amplitudy, sw se jej pokusí utlumit použitím okna s plynulým přechodem.

Krajním případem je situace, kdy jsou rezonance tak výrazné, že se během doby záznamu rezonanční kmity neutlumí na přijatelnou úroveň a dojde k jejich ořezání, nebo je délka záznamu nad šumovou úrovní příliš rozsáhlá a nulování šum dostatečně nepotlačí. To je zpravidla případ kanálu zrychlení. Norma ČSN ISO 7626-5 a mnohá další literatura zde uvádí použití exponenciálního okna tak, aby byly kmity na konci záznamu tlumeny maximálně na úroveň 1% amplitudy pulzu. To má představovat kompromis mezi délkou záznamu (odstupem šumu) a chybou v důsledku ořezu odezvy. Slabě exponenciálně tlumené kmity jsou záležitostí modální analýzy. Při kalibraci kladívka ovšem může podobná situace nastat, jsou-li v soustavě (rázové kladívko – kalibrační blok – akcelerometr) zdroje významných rezonancí, například není-li použit vhodný akcelerometr. Rezonance se projeví zejména při použití hliníkového (resp. velmi tuhého) hrotu, který nejvíce budí nejširší pásmo a nárazová síla dosahuje nejvyšších úrovní.

Výchozí nastavení používání oken v obslužném sw se provádí ve dvou krocích. V prvním kroku je vynulováno čelo a konec záznamu od úseku, kde signál dosáhl šumové úrovně. Pokud je ořezán (vynulován) pouze šum, nezavádí se tím žádné zkreslení²⁴. Druhý krok se aktivuje na principu „použij, je-li to nezbytné“, přičemž za nepřijatelnou je považována situace, kdy signál na konci záznamu nepoklesl na 1% úrovně amplitudy. Při kalibracích v rámci této práce byl podstatně větší měrou zatížen rezonancemi kanál zrychlení, tudíž došlo-li k porušení této podmínky, byla porušena právě v kanále zrychlení, nebo v obou kanálech, přičemž v kanále zrychlení vždy větší měrou. K utlumení signálu je proto automaticky na kanál zrychlené aplikováno exponenciální okno a stejné okno je aplikováno také na příslušný kanál síly. Okno je použito na oba kanály z toho důvodu, aby nebylo třeba provádět korekci jeho vlivu. Délka záznamu kanálu zrychlení a příslušného záznamů kanálu síly je vždy stejná a opomineme-li šum a rezonance, vlastní pulz v obou záznamech obsažený je teoreticky

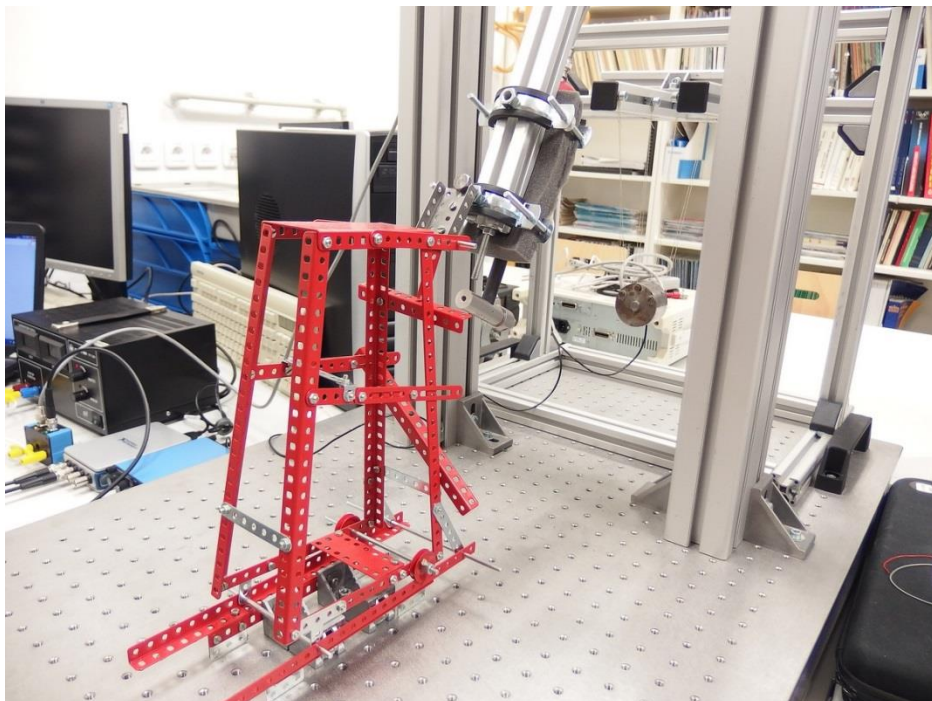
²³ ČSN ISO 7626-5, kap. 8.5.1

²⁴ ČSN ISO 7626-5, kap. 8.5.1

totožný.²⁵ Stejně exponenciální okno, aplikované na oba kanály, deformuje oba pulzy stejným způsobem a příslušné frekvence v obou pulzech obsažené jsou utlumeny stejnou měrou. Jelikož při výpočtu rozhoduje jejich poměr, vliv okna se tím vyruší. Začátek exponenciálního okna je vždy situován na čelo pulzu.

Podsekcce FFT Analysis obsahuje režim uživatelského nastavení oken Window Settigs, kde je možné používání oken pro kanály modifikovat. Klíčové je zde nastavení položky „Use acc. win for force“, která určuje, zda se okna použitá na kanál zrychlení použijí rovněž na kanál síly. Je-li tato položka vybrána, rozhraní nabízí přepínání mezi nastavením společného okna (pro oba kanály) a nastavením samostatného okna pro kanál síly. Není-li tato položka vybrána, přepínání je umožněno mezi nastavením samostatného okna pro kanál zrychlení a samostatného okna pro kanál síly.

V nastavení okna lze upravit programově nalezené meze pulzu, nebo je ručně zadat. Rovněž je možné upravit, jaká úroveň bude považována za práh šumu, s přihlédnutím k ručně zadané hodnotě, nebo hodnotě vztažené k amplitudě signálu. Náhledová okna s okamžitým náhledem pak zobrazují původní signál, upravený signál s vizualizací použitého okna a spektrum signálu před a po zavedení změny. Pokud je ručně vypnut příkaz, aby okno použité na kanál zrychlení bylo použito také na kanál síly, nebude použita žádná korekce a je pouze na uživateli, zda jeho změny v použití oken zavedou zkreslení. Speciální okno pro kanál síly má sloužit pouze k optimalizaci vyhlazení šumových částí záznamu, což, je-li provedeno správně a není úpravou postižen pulz, operace nevyžaduje korekci.



Obrázek 16: Kalibrační pracoviště

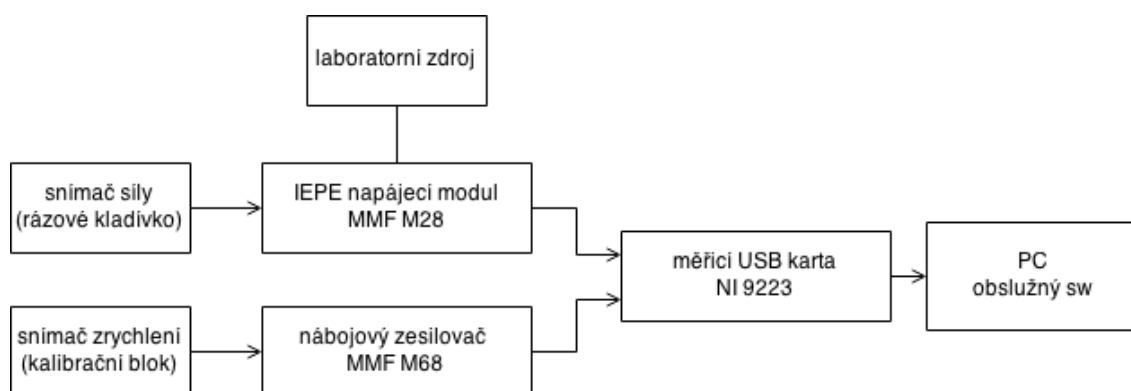
²⁵ vyjma předpokladů uvedených v podkapitole 2.4.2

4 KALIBRAČNÍ MĚŘENÍ

Záměrem kalibračního měření bylo v první řadě ověřit, zda je navržené kalibrační pracoviště způsobilé ke kalibračním zkouškám a vysledovat vlivy, které by mohly mít na přesnost kalibrace významný vliv, respektive které mohou zavádět do měření největší chybu. Je často obtížné, nepřesné a neefektivní analyticky popsat a odhadnout vliv některých nepříznivých aspektů měření (například vliv volného uložení kalibračního bloku), protože se jedná o poměrně komplexní záležitosti. Výsledkem by měla být ucelenější představa o největších zdrojích nepřesností, aby jejich ošetření mohla být při kalibracích věnována patřičná pozornost.

Veškerá měření níže uvedená byla provedena s využitím vlastního obslužného sw vytvořeného v prostředí LabVIEW a zpracována funkcionalitou, kterou tento program nabízí. Testován byl kromě vlivu hrotů také vliv zavěšení, vliv kalibračního bloku, vliv šikmého a nepřesného úderu, vliv síly nárazu, vliv operátora, vliv hmotnosti akcelerometru a vliv nastavení nábojového převodníku. Typické měření sestávalo z 25 úderů vedených při stejné konfiguraci pracoviště s maximálním přihlédnutím neměnnosti podmínek. Výsledných 25 úderů pak bylo zpracováno programem jako statistický soubor, jak metodou odečtu v časové, tak metodou odečtu ve frekvenční oblasti. Pro vyloučení vlivu filtru, vestavěného do nábojového zesilovače MMF M68, byla nastavena hodnota jeho mezní frekvence na nejvyšší dostupnou hodnotu - 50kHz. Většina měření byla provedena dvakrát za účelem prověření opakovatelnosti měření a pro získání představy, jak významně se mohou opakovatelná měření svými výsledky od sebe lišit.

Úvodní představou bylo zajistit definovanou míru dotažení akcelerometru ke kalibračnímu bloku a jednotnou míru dotažení hrotu, aby bylo zamezeno vlivu „nedorazů“, případně aby se tento jev projevoval vždy stejnou měrou. V případě akcelerometrů bylo provedeno dotažení pomocí momentového klíče s momentem 2Nm a ošetření místa upevnění akcelerometru olejem. Jednotné dotažení akcelerometru nemohlo být realizováno kvůli stavu závitů jednotlivých hrotů. Hroty jsou totiž vyhotoveny z poměrně měkkého hliníku a opatřeny závitem s mírnou stoupavostí. Rovněž specifikace rázového kladívka (umístěny v přílohách) přímo uvádějí, že dotažení hrotu nesmí být provedeno nadměrnou silou, aby nebyl poničen jejich závit. Není zde však uveden vhodný moment pro ani jiný postup pro jejich správné dotažení, byly proto dotahovány při testovacích kalibracích „odhadem“. Při častých výměnách hrotů však reálně hrozí postupné opotřebení závitů.



Obrázek 17: Blokové zapojení přístrojů při měření

4.1 Možnosti posouzení výsledků kalibrace

Obslužný sw poskytuje jak kalibrovanou hodnotu získanou odečtem z frekvenční oblasti, tak i hodnotu odečtenou z časového průběhu pomocí fitování. V obou případech je třeba do vztahu (40) dosadit hodnotu napěťové citlivosti akcelerometru. Tato hodnota je frekvenčně závislá a její charakteristika je uvedena v kalibračních listech použitých snímačů, které jsou umístěny v přílohách. Výchozí nabídka obslužného sw (Create measurement) umožňuje nahrát pouze jedinou hodnotu napěťové citlivosti akcelerometru, se kterou jsou prováděny veškeré výpočty. Přirozeně by měla být zadána taková hodnota napěťové citlivosti, která reprezentuje citlivost akcelerometru ve sledovaném pásmu, tedy na jaké frekvenci chceme kladívko kalibrovat. Metoda odečtu z amplitudy pulzu ovšem poskytuje pouze jednu hodnotu, která nepřísluší žádné konkrétní frekvenci. Je důležité proto určit, jaká je závislost napěťové citlivosti snímače síly na frekvenci. Bude-li kalibrovaná hodnota v pásmu vyvolaném hrotem (ve smyslu obrázku (6)) dostatečně neměnná a výsledky odečtem oběma způsoby budou v souladu, můžeme z tohoto hlediska považovat způsoby odečtu za ekvivalentní. Nebude-li kalibrovaná hodnota v podstatě konstantní, je třeba uvážit, pro jaký frekvenční rozsah je metoda odečtu z amplitudy použitelná, případně zda jsou odchylky v napěťové citlivosti pro různé frekvence vlastností, nebo chybou.

Česká státní norma ČSN ISO 7626-5 v kap. 8.5.1, která se věnuje kalibraci rázovadla, uvádí jako zevrubnou podmínku kontroly kalibračního procesu, aby naměřená frekvenční charakteristika kalibračního bloku ve sledovaném pásmu souhlasila s přesností $\pm 5\%$ s její známou hodnotou. Jako příklad uvádí hodnotu akcelerance $1/m$, kde m je hodnota hmotnosti kalibračního bloku včetně všech připojených snímačů. Tato kontrolní podmínka je fakticky v souladu s myšlenkou o stálosti hodnoty napěťové citlivosti kladívka, uvedené o odstavec výše. Obslužný software umožňuje v podsekcí FFT Analysis orientační náhled funkce frekvenční

odezvy inverzní k akceleranci, a totiž zdánlivé hmotnosti (apparent mass),²⁶ která je definována jako poměr spektra síly a spektra zrychlení. Její hodnota by měla s co největší přesností souhlasit s údajem o hmotnosti kalibračního bloku včetně aktuálně připevněného akcelerometru. Jelikož pro výpočet zdánlivé hmotnosti je třeba znát skutečné frekvenční závislosti napěťových citlivostí akcelerometru i snímače síly, je orientační průběh zdánlivé hmotnosti vypočítán dle upraveného vztahu (40)

$$\frac{F(f)}{A(f)} = \frac{S_a(f^*)}{S_f(f^{**})} \cdot \frac{U_f(f)}{U_a(f)} [N/m \cdot s^{-2}] \quad 41$$

kde $S_a(f^*)$ je napěťová citlivost akcelerometru zadaná při založení měření (vytvoření Measurement group) a $S_f(f^{**})$ je napěťová citlivost snímače síly vypočtená odečtem z frekvenční oblasti pro uživatelsky zadanou frekvenci f^{**} . Typické průběhy naměřených zdánlivých hmotností ukazuje obrázek (18). Obslužný sw v aktuálním náhledu rovněž zobrazuje meze pro 5% odchylku od zadané hmotnosti, jejíž úroveň je zobrazena zeleně. „Zubatost“ průběhů na nižších frekvencích je dána nedostatečně jemným frekvenčním rozlišením pro plynulé zobrazení s logaritmickou frekvenční osou. Z typických průběhů je patrná souvislost mezi šířkou spektra pulzu (například tak, jak jej zachycuje obrázek (6)) a délkou nárůstu napěťové citlivosti do oblasti prvního poklesu. Průběh na frekvencích převyšujících oblast prvního poklesu již nelze přímočaře vztáhnout k půl-sinusovému nárazovému pulzu a odpovídá tomu i jeho značně proměnlivý charakter. Část průběhu zdánlivé hmotnosti do prvního výraznějšího poklesu má pro všechny hroty a zkoušené kalibrační bloky charakter velmi podobný – lze jej popsat jako oblouk se zploštělým vrchem. Šírku pásma pulzu a parametry tohoto oblouku shrnuje tabulka (2). K pozvolnému nárůstu dochází i v grafech frekvenční závislosti naměřené napěťové citlivosti snímače síly, kterou jsou uvedeny k příslušným měřením níže. Nedochozí v nich však k následnému zřetelnému poklesu.

Jelikož způsob odečtu z amplitud v časové oblasti nereprezentuje žádnou konkrétní frekvenci spektra, ale spíše spektrum celé, lze předpokládat, že hodnota získaná odečtem z časové oblasti bude nejlépe souhlasit přibližně s průměrnou hodnotou pásma vyvolaného pulzem. Ačkoliv nárůst zdánlivé hmotnosti není lineární, budu při srovnání zjednodušeně uvažovat, že frekvence, nejlépe reprezentující svou citlivostí celé spektrum pulzu, se nachází v polovině tohoto spektra. Pro hliníkový hrot tomu odpovídá zhruba frekvence 3 kHz, pro plastový hrot 800 Hz a pro gumový hrot 200 Hz. Hodnoty získané odečtem z amplitudy v časové oblasti budou tedy v testech srovnávány s hodnotami odečtenými ve frekvenční oblasti právě na těchto frekvencích. Příslušnost hodnoty odečtené v časové oblasti k celému spektru rovněž znamená problém při výpočtu z hlediska správného dosazení hodnoty napěťové citlivosti akcelerometru. Základní hodnota uvedená v kalibračních listech akcelerometrů přísluší referenčnímu kmitočtu 100Hz, což může být považováno za hodnotu reprezentující

²⁶ BILOŠOVÁ, A., 2012, str. 17 [1]

pásmo pulzu pouze v rámci určité omezené přesnosti, v závislosti na konstantnosti charakteristiky snímače. Výsledky odečtené z amplitud, prezentované v rámci jednotlivých testů, jsou z tohoto důvodu vypočteny s použitím hodnoty napěťové citlivosti akcelerometru dle stejného pravidla, jaké bylo odvozeno pro srovnávací frekvence (hliníkový hrot 3 kHz, plastový hrot 800 Hz, gumový 200 Hz).

Tabulka 2: Srovnání šířky pásma, oblasti maxima a poklesu zdánlivé hmotnosti s odpovídajícím útlumem ve spektru pulzu pro všechny typy použitých hrotů. Vyhodnoceno z typických naměřených dat.

Hrot	útlum spektra o 3dB	zdánlivá hmotnost (max.)	zdánlivá hmotnost (konec poklesu)	útlum spektra v místě maxima zdán. hmot.
	[kHz]	[kHz]	[kHz]	[dB]
Hliník	6	cca 2 až 6	cca 12 až 14	0,3 až 3
Plast	1,6	cca 1,8 až 2,8	cca 3,8-4,2	0,3 až 0,6
Guma	0,4	cca 0,6 až 1,7	cca 1,2 až 1,3	6 až 36

Výchozí snahou kalibrací bylo ověřit hodnotu napěťové citlivosti kladívka uvedenou v jeho specifikacích. Specifikace uvádějí parametry primárně v imperiálních jednotkách a hodnota napěťové citlivosti je zde uvedena jako 5 mV/lbf, tedy v milivoltech na librovou sílu. V závorce za údajem je uvedena hodnota 1,14 mV/N. Jakkoli je nemetrologické srovnávat hodnoty prezentované odlišným počtem platných číslic, převod mezi librovou silou a N je dle vztahu²⁷

$$[N] = 4,448222 \cdot [lbf] \quad 42$$

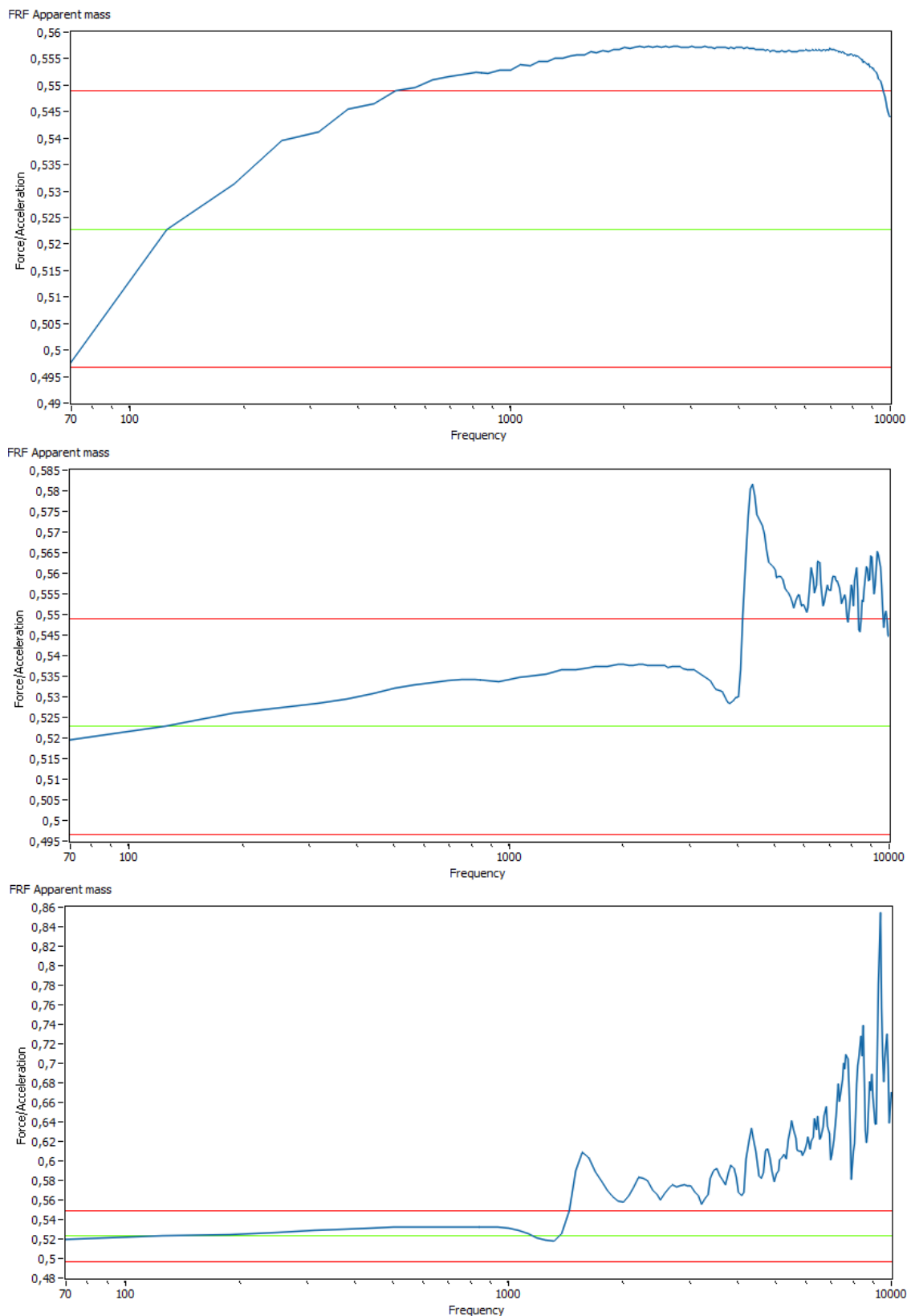
pokud lokální hodnota tíhového zrychlení odpovídá smluvnímu standardu²⁸, tedy

$$g_n = 9,80665 [m \cdot s^{-2}] \quad 43$$

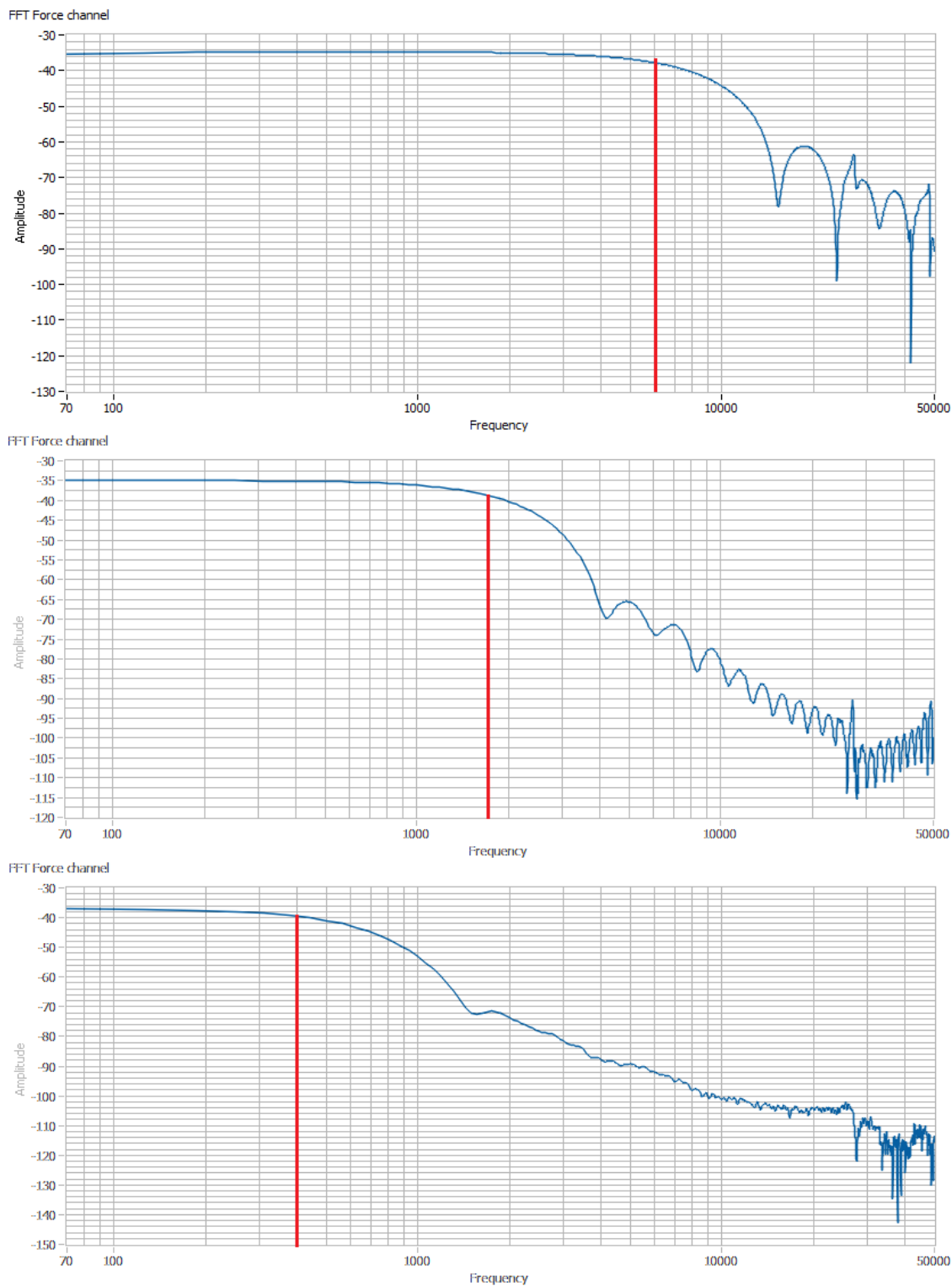
pak, hodnotě přesně 5mV/lbf odpovídá přibližně hodnota 1,1240... Již tento metrologický nesoulad poukazuje na sníženou důvěryhodnost uvedené napěťové citlivosti. Ve hlavičce specifikací je uvedeno, že hodnoty jsou vztaženy pro +24 °C, 4 mA a 100 kHz, přičemž hodnota napěťové citlivosti je uvedena jako „typická“, bez příslušnosti k určitému hrotu, na jehož tuhosti je z principu závislá. Jelikož ostatní údaje jsou uvedeny pro maximální parametry, lze odhadovat, že i tato hodnota přísluší kovovému hrotu. Uvažovat tedy tuto hodnotu při následujících kalibracích jako referenční je přinejmenším nedbalé.

²⁷ Odvozeno z tabulkových hodnot uvedených v [11]

²⁸ Uvedeno v poznámkách k převodním tabulkovým hodnotám v [11]



Obrázek 18: Srovnání průběhů zdánlivé hmotnosti pro hliníkový, plastový a gumový hrot (shora) s vyznačenými mezemi odchylky 5% (červeně). Použit byl snímač typu KD 91, kalibrační blok M1 a zadána napěťová citlivost akcelerometru pro 125 Hz. Hodnota na svislé ose je v základních jednotkách (N/ms^{-2}).



Obrázek 19: Naměřená frekvenční spektra pro hliníkový, plastový a gumový hrot (shora) s vyznačenou oblastí útlumu o 3dB. Tytéž průběhy použité pro výpočet zdánlivých hmotností na obrázku (18).

4.2 Seznam přístrojů a přípravků

- rázové kladívko Endevco 2302-5, v.č.: 2491
- akcelerometr MMF KD 91, v.č.: 0237
- akcelerometr MMF KD 91, v.č.: 0143
- akcelerometr MMF KD 30, v.č.: 5590
- IEPE napájecí modul MMF M28, v.č.: 081554
- nábojový zesilovač MMF M68, v.č.: 141520
- měřicí USB karta NI 9223, v.č.: 19FDC69
- notebook HP Pavilion g6-1370ec s LabVIEW v. 2013 (32-bit)
- nosný přípravek pro kalibrační blok a spouštěcí mechanismus se spouštěcí věží
- malý kalibrační blok (M1) hmotnosti 520,71g
- velký kalibrační blok (M2) hmotnosti 4262g
- velký kalibrační blok (M3) hmotnosti 4230g
- digitální váha HANA HS-7000C, v.č.: E17H1859-4 (pro velké kalibrační bloky)
- digitální laboratorní váha KERN PCB 2500-2, v.č.: WD140087829 (pro malý kalibrační blok)
- laboratorní zdroj Statron typ 2250, v.č.: 1101010

4.3 Atmosférické podmínky

7.5.2015:	teplota 23,5 °C	tlak 988 hPa	vlhkost 27%
11.5.2015:	teplota 23,1 °C	tlak 979 hPa	vlhkost 22%
12.5.2015:	teplota 22,7 °C	tlak 979 hPa	vlhkost 24%

4.4 Cíle měření

Kalibrační testy a testy vlivů při kalibraci mají několik samostatných částí:

- testování vlivu dopadové síly
- testování vlivu nastavení nábojového zesilovače
- testování vlivu použitého hrotu s kalibračním blokem M1
- testování vlivu použitého hrotu s kalibračním blokem M3
- testování vlivu akcelerometru
- testování vlivu šikmého úderu
- testování vlivu nepřesného kolmého úderu
- testování vlivu zručnosti operátora

4.5 Testování vlivu úrovně dopadové síly

Motivace: Jedná se o výchozí test. Úroveň síly při dopadu nemá mít teoreticky na kalibrovanou hodnotu vliv. Jelikož rozsah měřicí USB karty je neměnný a různé hroty vyvolávají různou úroveň výstupního napětí, nabízí se myšlenka úpravy síly nárazu změnou výšky pádu ramena tak, aby byl vždy optimálně využit rozsah A/D převodníku karty. S klesající spouštěcí výškou a klesající amplitudou výstupu se předpokládá pouze drobný nárůst vlivu kvantovací chyby A/D převodníku, která by měla být eliminována průměrováním při statistickém zpracování.

Konfigurace pracoviště: akcelerometr KD 91 v.č.: 0237, kalibrační blok M1, zesílení nábojového zesilovače 1x, 50kHz lowpass filtr na nábojovém zesilovači, použit hliníkový hrot, IEPE napájecí modul napájen 12V, měřeno 7.5. 2015

Postup: Při testování je vedeno 25 úderů kladívkem upevněným k padacímu ramenu z nejnižší spouštěcí výšky. Po naměření celého bloku dat je spouštěcí výška navýšena asi o 2 cm a měření se opakuje. Tímto způsobem jsou naměřeny bloky dat pro čtyři spouštěcí výšky. Jakákoliv jiná nastavení zůstávají stejná. Každé pořízení 25 hodnot je jednou opakováno (u prvního měření bylo v tomto případě výjimečně opakování vynecháno). Při zpracování dat odečtem z frekvenční oblasti byly pro jednotlivé frekvence v grafu použity příslušné hodnoty napěťových citlivostí použitého akcelerometru dle kalibračního listu.

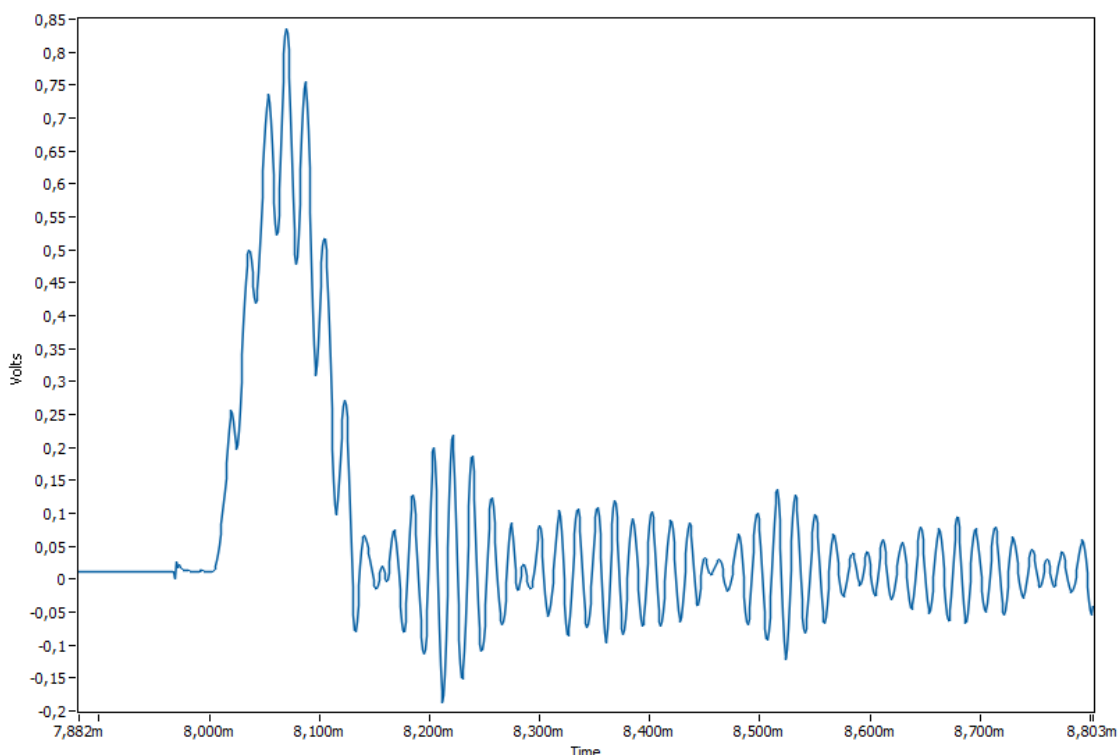
Výsledky měření:

Tabulka 3: Výsledky měření vlivu úrovně síly dopadu, odečet z frekvenční oblasti je proveden pro 3kHz.

Skupina	Výška	\bar{x} (frek.)	σ (frek.)	\bar{x} (amp.)	σ (amp.)
		[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]
Meas. group 1	nejnižší výška	1,2423	0,0120	1,2467	0,0012
Meas. group 2	druhá nejnižší výška (první měření)	1,2254	0,0167	1,2425	0,0014
Meas. group 3	druhá nejnižší výška (opak. měření)	1,2269	0,0158	1,2447	0,0016
Meas. group 4	druhá nejvyšší výška (první měření)	1,2133	0,0047	1,2377	0,0024
Meas. group 5	druhá nejvyšší výška (opak. měření)	1,2155	0,0040	1,2384	0,0014
Meas. group 6	nejvyšší výška (první měření)	1,1923	0,0030	1,2196	0,0027
Meas. group 7	nejvyšší výška (opak. měření)	1,1937	0,0021	1,2198	0,0018

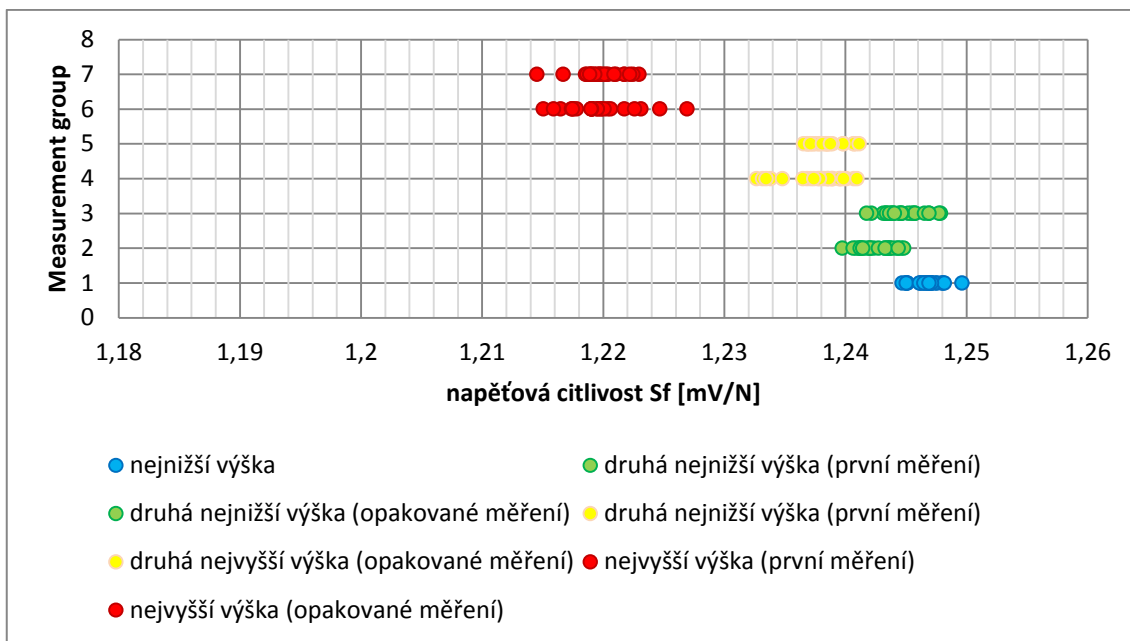
Komentář k naměřeným hodnotám: Navzdory výchozímu předpokladu, z naměřených dat vyplývá, že úroveň dopadové síly (přesněji spouštěcí výška ramene nosícího kladívko) ovlivňuje kalibrovanou hodnotu. Amplituda silového pulzu po pádu z nejnižší výšky dosáhla úrovně kolem 1,3V, po pádu z nejvyšší výšky pak zhruba 3,8 V, kde je kvantovací chyba velikosti zhruba 0,3 mV v obou případech zanedbatelná. Hodnoty odečtené z frekvenční oblasti i z časové oblasti avšak nejsou vzájemně

kompatibilní, třebaže vykazují stejný trend (citlivost s rostoucí spouštěcí výškou klesá a rozptyl hodnot se snižuje). Z grafů je rovněž patrné, že menšího rozptylu hodnot dosahuje metoda odečtu v časové oblasti a že měření jsou opakovatelná. Možné příčiny nesouladu mezi hodnotami odečtenými v časové a frekvenční oblasti jsou popsány v kapitole 4.1, na chybném odečtu z amplitudy se může podílet také výraznější rezonance snímače, která znesnadňuje fitování. Typický průběh odezvy zachycuje obrázek (20), záznamový děj lze ztotožnit s významnými složkami ve spektru na 54kHz a 61 kHz.

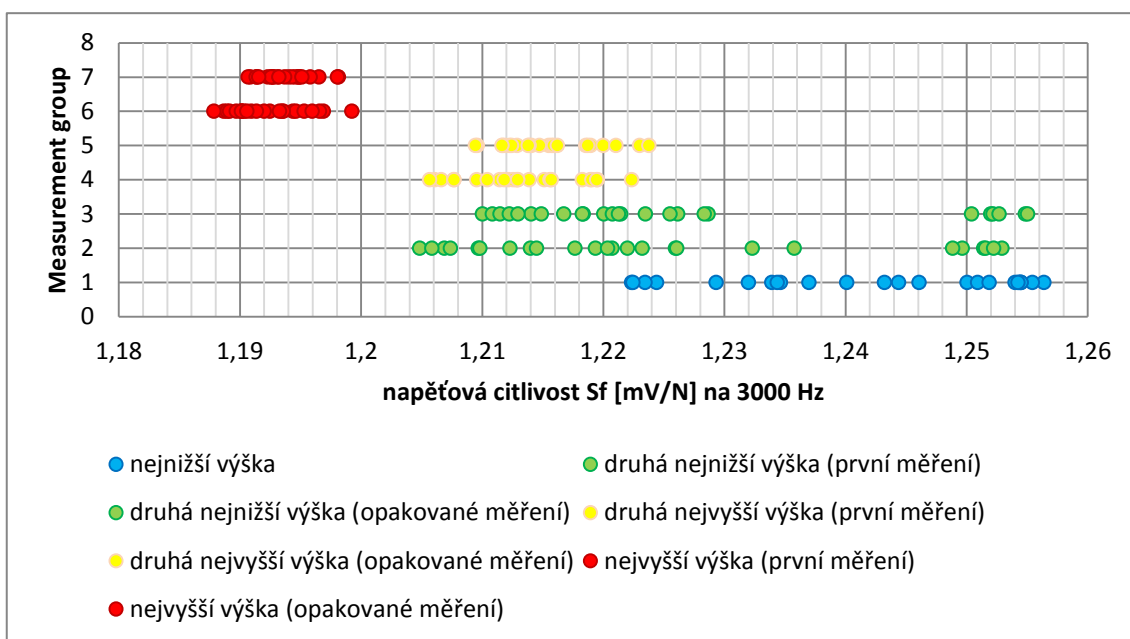


Obrázek 20: Typický naměřený průběh odezvy při testování vlivu výšky pádu. Rezonanční kmity odpovídají rezonanční frekvenci akcelerometru

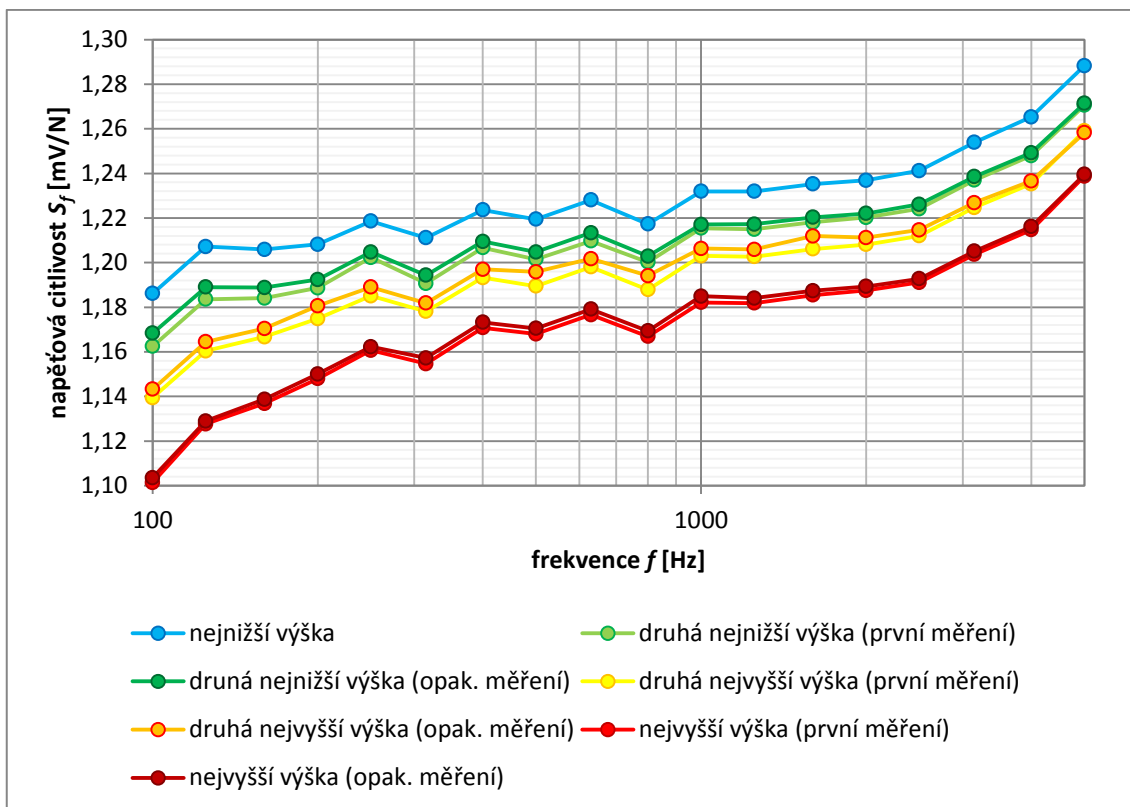
Co způsobuje závislost výsledků na spouštěcí výšce, není jasné. Trend nelze přisoudit vlivu různé kvantovací chyby, která je ve všech případech měření vzhledem ke vzájemným rozdílům zanedbatelná. Snižování rozptylu hodnot může být způsobeno nárůstem maximální úrovně signálu, čímž roste odstup od parazitních vlivů, výrazný posun střední hodnoty zůstává neobjasněn. Vzhledem k tomu je nutné při následných testech jiných vlivů alespoň zajistit, aby byla vždy výška pádu stejná a její vliv se nepromítl do interpretace výsledků.



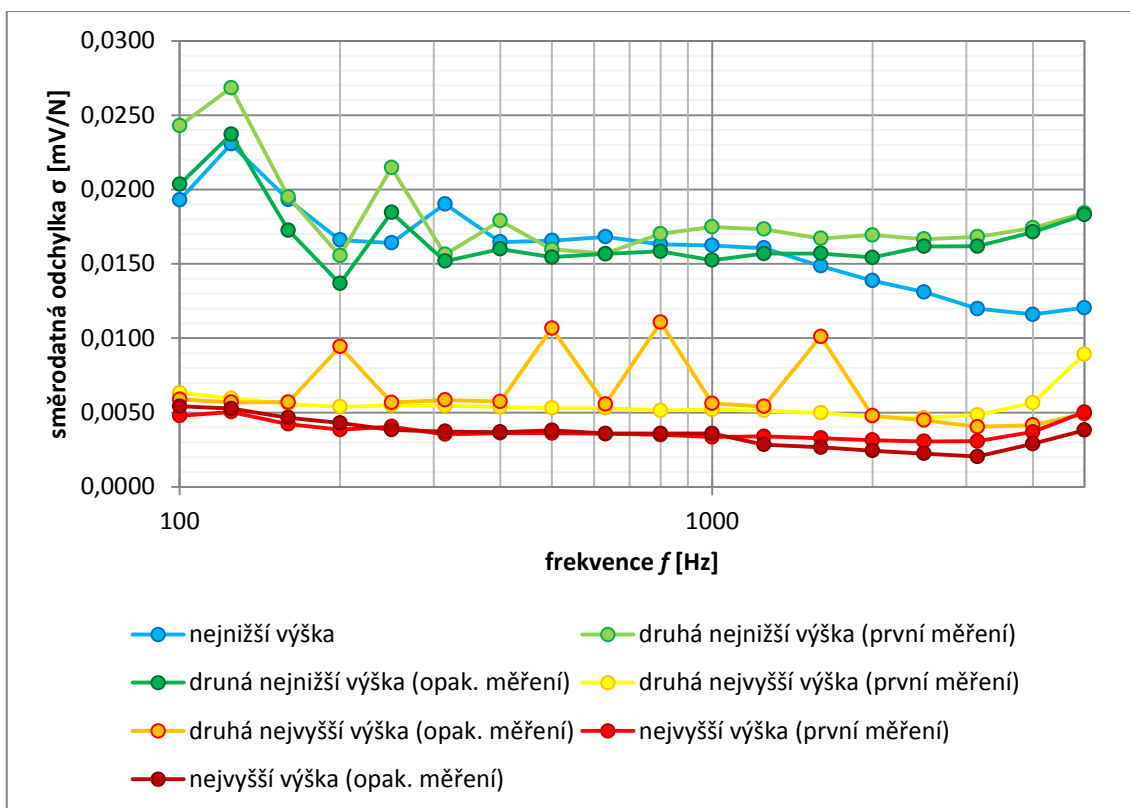
Obrázek 21: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z amplitudy pulzu, vliv úrovně dopadové síly



Obrázek 22: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z frekvenční oblasti, vliv úrovně dopadové síly



Obrázek 23: Průběhy napět'ové citlivosti stanovené z frekvenční roviny v závislosti na frekvenci odečtu (vliv dopadové síly)



Obrázek 24: Průběhy směrodatné odchylky bloku měření při odečtu z frekvenční roviny (vliv dopadové síly)

4.6 Testování vlivu nastavení nábojového zesilovače

Motivace: Odpadla-li možnost korigovat úroveň výstupního signálu snímačů různou intenzitou nárazu, nabízí se alespoň využití proměnného zesílení nábojového zesilovače MMF M68 pro kanál zrychlení. Jelikož není k dispozici kalibrační list nábojového zesilovače a specifikace uvádějí pouze maximální přesnost 2% z maximálního rozsahu, který činí $\pm 10V$, je vhodné ověřit, jaká je povaha chyby a zda nastavené zesílení neovlivňuje její velikost. Výsledky by měly poskytnout odpověď, zda je přínos v zesílení signálu větší než případný nárůst chyby vlivem zesílení. Využití zesílení přirozeně nalezne největší uplatnění při používání gumového hrotu, při jehož dopadu vznikají nejmenší síly. Při testu je využito i zesílení 0,1x pro porovnání vlivu šumu.

Konfigurace pracoviště: akcelerometr KD 91 v.č.: 0237, kalibrační blok M1, různá zesílení nábojového zesilovače, 50kHz lowpass filtr na nábojovém zesilovači, použit plastový hrot, IEPE napájecí modul napájen 12V, měřeno 11.5. 2015

Postup: Při testování je vedeno 25 úderů kladívkem upevněným k padacímu ramenu z nízké spouštěcí výšky při zesílení 0,1x (0,1 mV/pC). Po naměření celého bloku dat je zesílení navýšeno na následující dekádu a je vyčkáno na ustálení přechodových dějů. Tímto způsobem jsou naměřeny bloky dat pro zesílení 0,1x až 10x. Jakákoliv jiná nastavení zůstávají stejná. Každé pořízení 25 hodnot je jednou opakováno. Při zpracování dat odečet z frekvenční oblasti byly pro jednotlivé frekvence v grafu použity příslušné hodnoty napěťových citlivostí použitého akcelerometru dle kalibračního listu.

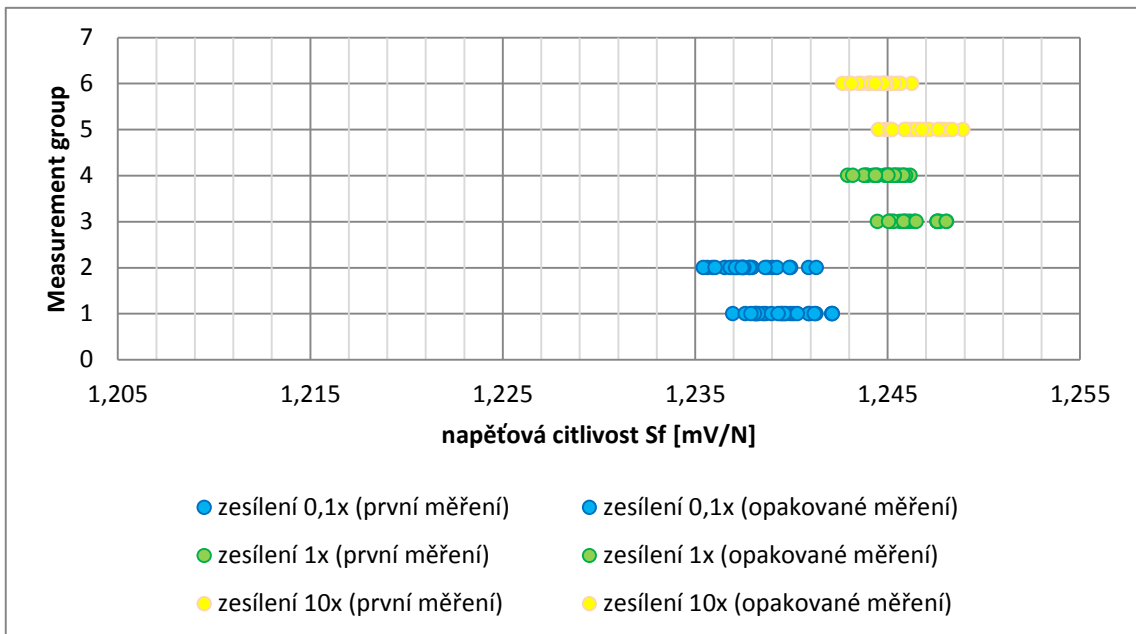
Výsledky měření:

Tabulka 4: Výsledky měření vlivu nastavení nábojového zesilovače, odečet z frekvenční oblasti je proveden pro 800 Hz.

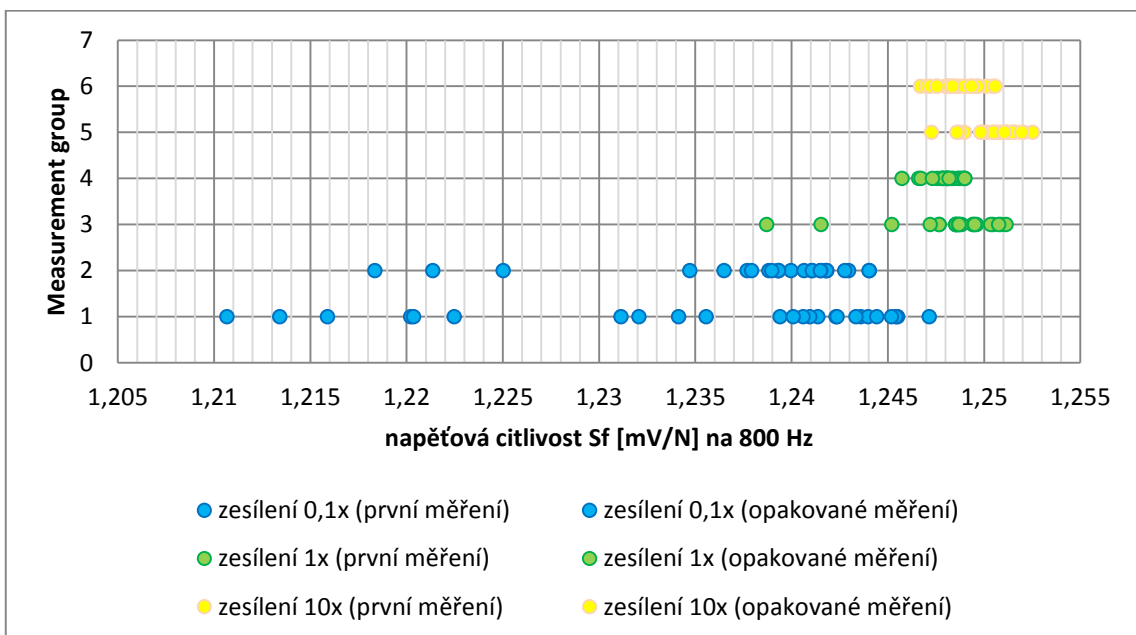
Skupina	Zesílení	\bar{x} (fрек.)	σ (fрек.)	\bar{x} (amp.)	σ (amp.)
		[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]
Meas. group 1	0,1x (první měření)	1,2353	0,0113	1,2396	0,0015
Meas. group 2	0,1x (opakované měření)	1,2381	0,0067	1,2378	0,0016
Meas. group 3	1x (první měření)	1,2482	0,0029	1,2463	0,0011
Meas. group 4	1x (opakované měření)	1,2480	0,0008	1,2448	0,0009
Meas. group 5	10x (první měření)	1,2506	0,0067	1,2467	0,0012
Meas. group 6	10x (opakované měření)	1,2487	0,0010	1,2445	0,0009

Komentář k naměřeným hodnotám: Naměřená data neukazují na žádný trend, který by měl výrazně znevýhodňovat zesílení 1x vůči 10x. Zesílení 0,1x není v praxi třeba používat a bylo do srovnání přidáno jen informačně, aby bylo možno porovnat, nakolik se projeví vliv šumu. Srovnáním časových průběhů bylo zjištěno, že hlavní složky šumu

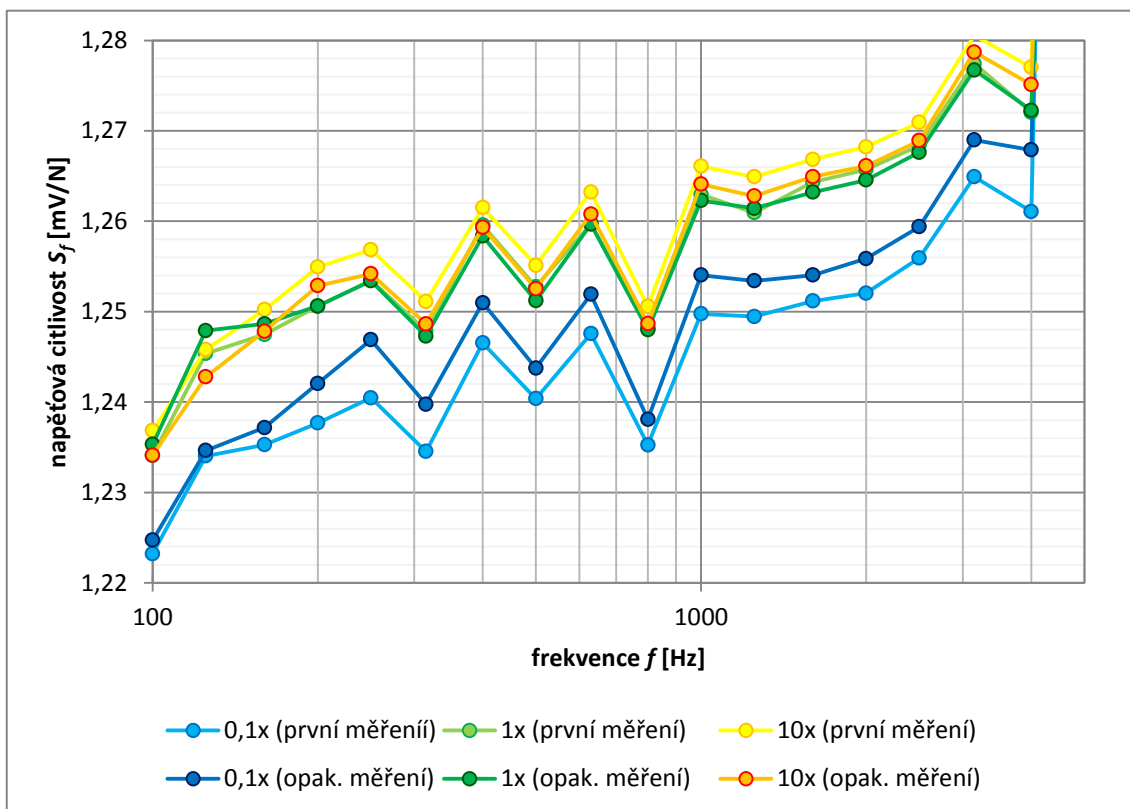
(zejména vliv sítě se složkami 50 Hz a 100 Hz) vstupují do měřicího řetězce až za nábojovým zesilovačem a nejsou jím tedy zesíleny. Zvýšeným zesílením proto lze účinně zvyšovat odstup signálu od šumu, který je při zesílení 0,1x již kritický a je možné jím interpretovat naměřenou odlišnost rozptýlu hodnot a střední hodnoty. Oproti odečtu z frekvenční oblasti, kde se šum ke spektru přičítá, průměrováním v časové oblasti je šum eliminován a metoda odečtu hodnot z amplitudy (rovněž díky fitování) poskytuje v takových případech více jednotné výsledky.



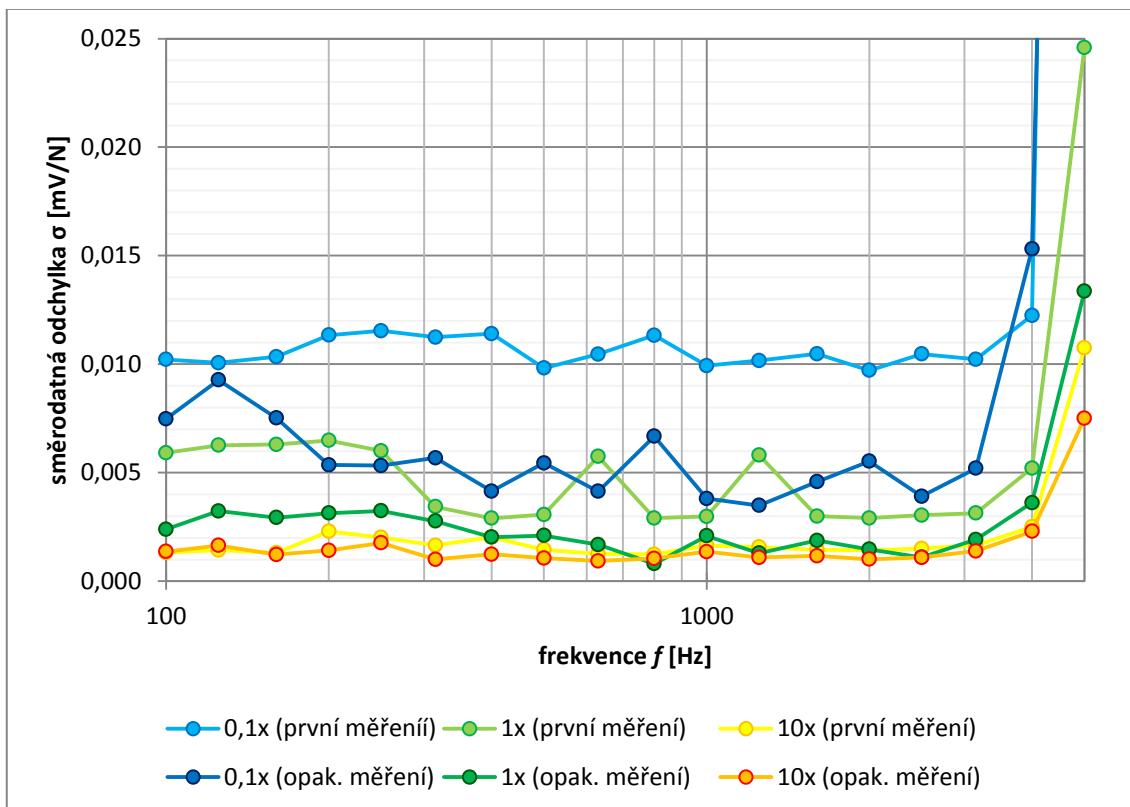
Obrázek 25: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z amplitudy pulzu, vliv nábojového zesilovače



Obrázek 26: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z frekvenční oblasti, vliv nábojového zesilovače



Obrázek 27: Průběhy napěťové citlivosti stanovené z frekvenční roviny v závislosti na frekvenci odečtu (vliv nastavení nábojového zesilovače)



Obrázek 28: Průběhy směrodatné odchylky bloku měření při odečtu z frekvenční roviny (vliv nábojového zesilovače)

4.7 Testování vlivu výměny hrotu

Motivace: Výměna hrotu je běžným úkonem v rámci modálních zkoušek a jedním z důvodů opakovaných kalibrací.²⁹

Konfigurace pracoviště: akcelerometr KD 91 v.č.: 0237, kalibrační blok M1, různá zesílení nábojového zesilovače, 50kHz lowpass filtr na nábojovém zesilovači, IEPE napájecí modul napájen 12V, měřeno 12.5. 2015

Postup: Při testování je vedeno 25 úderů kladívkem upevněným k padacímu ramenu ze střední spouštěcí výšky. Měření je stejným způsobem opakováno pro hliníkový, plastový a gumový hrot. Při zpracování dat odečtem z frekvenční oblasti byly pro jednotlivé frekvence v grafu použity příslušné hodnoty napěťových citlivostí použitého akcelerometru dle kalibračního listu.

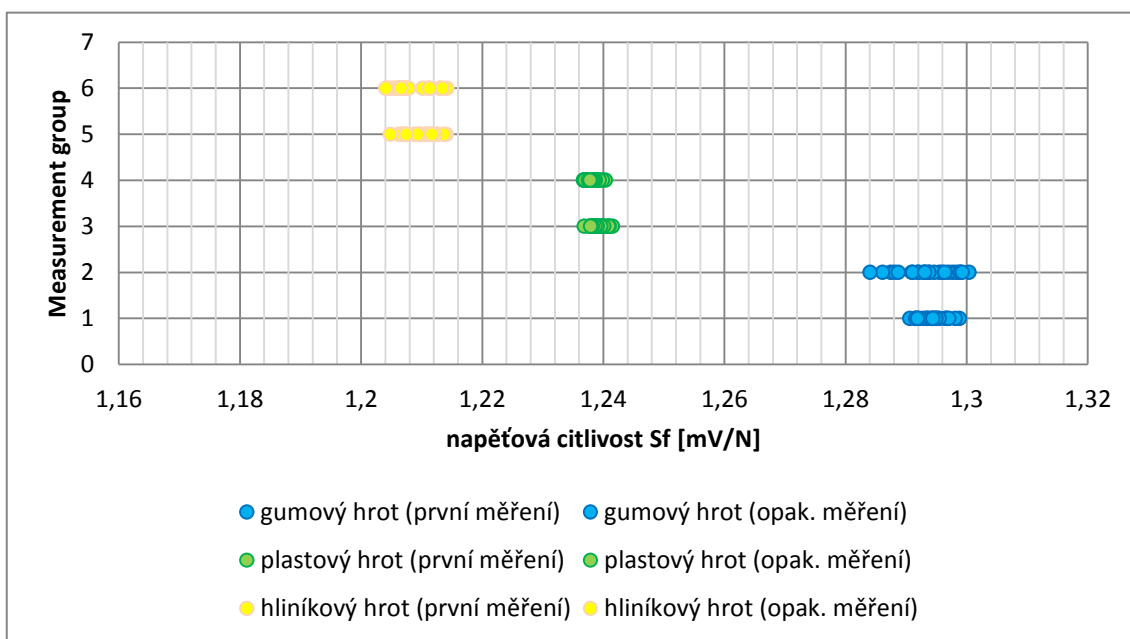
Výsledky měření:

Tabulka 5: Výsledky měření vlivu výměny hrotu

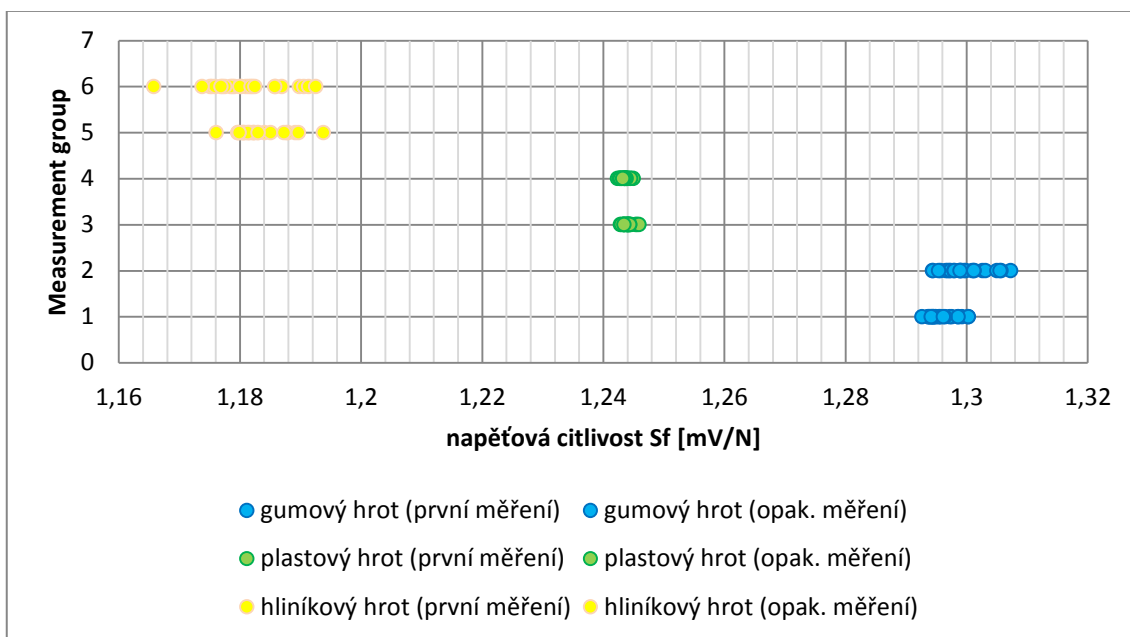
Skupina	kalibrační blok, hrot	\bar{x} (frek.)	σ (frek.)	\bar{x} (amp.)	σ (amp.)
		[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]
Meas. group 1	M1, gumový hrot (první měření)	1,2958	0,0022	1,2944	0,0021
Meas. group 2	M1, gumový hrot (opakované měření)	1,2997	0,0036	1,2936	0,0044
Meas. group 3	M1, plastový hrot (první měření)	1,2440	0,0008	1,2392	0,0012
Meas. group 4	M1, plastový hrot (opakované měření)	1,2435	0,0006	1,2381	0,0010
Meas. group 5	M1, hliníkový hrot (první měření)	1,1833	0,0041	1,2097	0,0025
Meas. group 6	M1, hliníkový hrot (opakované měření)	1,1810	0,0062	1,2080	0,0030

Komentář k naměřeným hodnotám: Ačkoliv oba grafy rozptýlení vykazují velmi podobný trend, měření s různou metodou odečtu hodnot jsou zejména pro hliníkový hrot na hraně kompatibility, a to vlivem posunu střední hodnoty. Ovšem jak bylo důsledně poznamenáno v podkapitole 4.1, metody odečtu nejsou ekvivalentní. Grafy (29) i (30) zřetelně prezentují, že výměna hrotu se skutečně zřetelně projevuje na změně efektivní napěťové citlivosti, jak to předpokládá teorie. V tomto konkrétním případě byla naměřená hodnota napěťové citlivosti pro gumový hrot o 10% větší vůči citlivosti naměřené s hrotem hliníkovým. Nejmenšího rozptylu hodnot však vždy bylo dosaženo s plastovým hrotem.

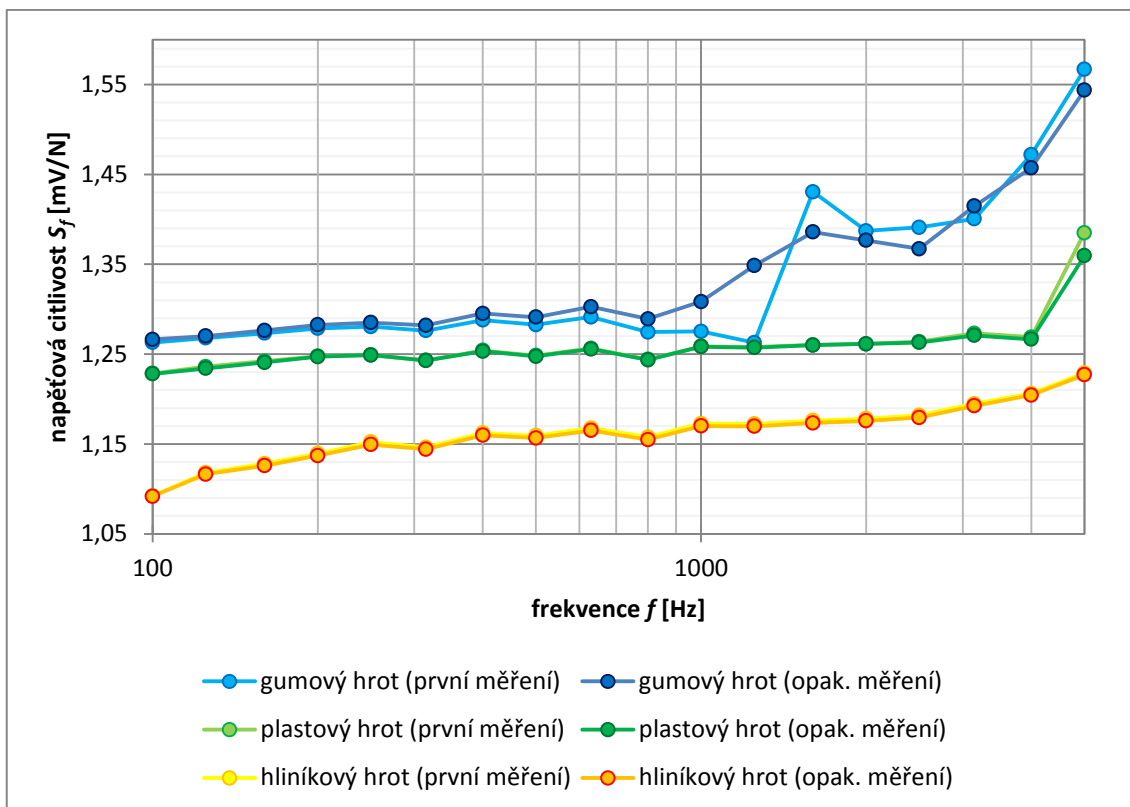
²⁹ ČSN ISO 7626-5, kap. 8.5.1



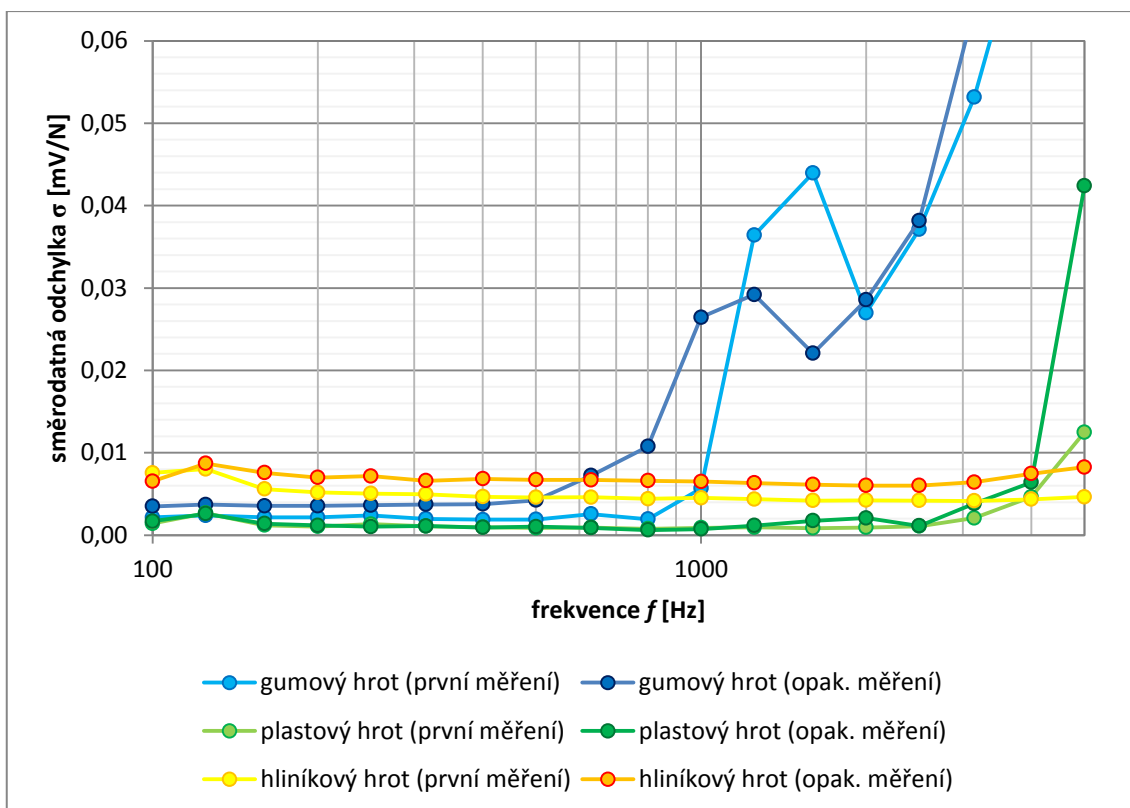
Obrázek 29: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z amplitudy pulzu, vliv výměny hrotu



Obrázek 30: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z frekvenční oblasti, vliv výměny hrotu



Obrázek 32: Průběhy napětové citlivosti stanovené z frekvenční roviny v závislosti na frekvenci odečtu (vliv výměny hrotu)



Obrázek 33: Průběhy směrodatné odchylky bloku měření při odečtu z frekvenční roviny (vliv výměny hrotu)

4.8 Testování vlivu kalibračního bloku

Motivace: Kalibrační blok s připojeným akcelerometrem lze jako dokonale tuhé těleso popsat pouze v rámci zjednodušení, jak bylo uvedeno v podkapitole 2.4.2. Vlastnosti kalibračního bloku mají také vliv na úroveň odezvy a určují, jak se bude šířit náraz. Aby mohl být vliv hmotnosti akcelerometru co nejspolehlivěji zanedbán, měla by ji hmotnost kalibračního bloku mnohonásobně převyšovat. Dále je třeba dodržet, jak bylo opět uvedeno výše, aby hmotnost kalibračního bloku odpovídala pásmu pohyblivosti, ve kterém má být měření provedeno. Jak se změna kalibračního bloku projeví na kalibrované hodnotě, je obsahem této zkoušky.

Konfigurace pracoviště: akcelerometr KD 91 v.č.: 0237 s kalibračním blokem M1 (použity údaje z testování vlivu hrotu), akcelerometr KD 91 v.č. 0143 a KD 30 v.č. 5590 s kalibračním blokem M3, různá zesílení nábojového zesilovače, 50kHz lowpass filtr na nábojovém zesilovači, IEPE napájecí modul napájen 12V, měřeno 12.5. 2015

Postup: Při testování je vedeno 25 úderů kladívkem upevněným k padacímu ramenu ze střední spouštěcí výšky. Měření je stejným způsobem opakováno pro hliníkový, plastový a gumový hrot. Naměřené hodnoty s kalibračním blokem M1 jsou převzaty z předchozí zkoušky (vliv hrotu).

Výsledky měření:

Tabulka 6: Výsledky měření vlivu kalibračního bloku

Skupina	kalibrační blok, hrot	\bar{x} (frek.)	σ (frek.)	\bar{x} (amp.)	σ (amp.)
		[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]
Meas. group 1	M1, gumový hrot (první měření)	1,2958	0,0022	1,2944	0,0021
Meas. group 2	M1, gumový hrot (opakované měření)	1,2997	0,0036	1,2936	0,0044
Meas. group 3	M3, gumový hrot (první měření)	1,2256	0,0026	1,2200	0,0025
Meas. group 4	M3, gumový hrot (opakované měření)	1,2261	0,0021	1,2194	0,0022
Meas. group 5	M1, plastový hrot (první měření)	1,2440	0,0008	1,2392	0,0012
Meas. group 6	M1, plastový hrot (opakované měření)	1,2435	0,0006	1,2381	0,0010
Meas. group 7	M3, plastový hrot (první měření)	1,2166	0,0017	1,2060	0,0016
Meas. group 8	M3, plastový hrot (opakované měření)	1,2170	0,0021	1,2061	0,0018
Meas. group 9	M1, hliníkový hrot (první měření)	1,1833	0,0041	1,2097	0,0025
Meas. group 10	M1, hliníkový hrot (opakované měření)	1,1810	0,0062	1,2080	0,0030
Meas. group 11	M3, hliníkový hrot (první měření)	1,1517	0,0031	0,8057	0,0731
Meas. group 12	M3, hliníkový hrot (opakované měření)	1,1488	0,0015	0,7304	0,0499

Komentář k naměřeným hodnotám: Hodnoty naměřené s oběma kalibračními bloky vykazují podobný trend (citlivost klesá s rostoucí tuhostí hrotu), avšak odlišují se výrazným posunem střední hodnoty. Klíčový problém, který zasáhl do výsledků měření, jsou rezonanční kmity, které se objevily při měření s kalibračním blokem M3.

Významné rezonanční kmity se vyskytovaly hned na několika frekvencích, z nichž nejvýznamnější a nejstálější se pohybovaly na frekvenci přibližně 25,8 kHz, dále pak také 38,5 kHz, 52,6 kHz, 55,2 kHz, 63,2 kHz a 70,4 kHz. Rezonanční frekvence nejnižší z výše zmíněných se vyskytuje při použití všech typů hrotů a často bývá z rezonancí nejsilnější. Zdaleka nejintenzivněji se projevuje se hrotem hliníkovým, který vyšší frekvence nejvíce budí. Zda se jedná o rezonanční frekvenci použitého akcelerometru KD 91, bylo vyloučeno po zopakování měření s akcelerometrem KD 30. V jeho spektru se sice navíc ještě objevila významná rezonance na frekvenci 21,3 kHz, nicméně složka na 25,8 kHz nezmizela. Protože při použití menšího kalibračního bloku M1 k vybuzení tak významných rezonancí na totožných nebo podobných kmitočtech nedochází, lze předpokládat, že zdroj těchto kmitů souvisí s kalibračním blokem. Dotážení akcelerometru v závitu bylo zkontrolováno a pokusně také provedeno pár kalibračních úderů s různou úrovní dotážení. Ke změnám ovšem nedošlo.

Jako možný zdroj se nabízí opakovaně odrážející se nárazová vlna, vytvářející stojaté vlny. Kalibrační blok M3 je vyroben z oceli typu 11375, známé také pod označením 1.0038. Pro rychlost podélných vln v pružné tyči platí

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} [m \cdot s^{-1}] \quad 44$$

kde je E modul pružnosti v tahu
 ρ hustota materiálu

Výše jmenovaná ocel má parametry³⁰ $E = 190$ až 210 a $\rho = 7,7$ až $8,03 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Použijeme-li průměrné hodnoty, obdržíme rychlost vlny v této oceli

$$v_v = \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9}{7,865 \cdot 10^3}} \doteq 5043 [m \cdot s^{-1}] \quad 45$$

Výška válce představuje polovinu délky vlny, celková délka vlny tedy činí přibližně

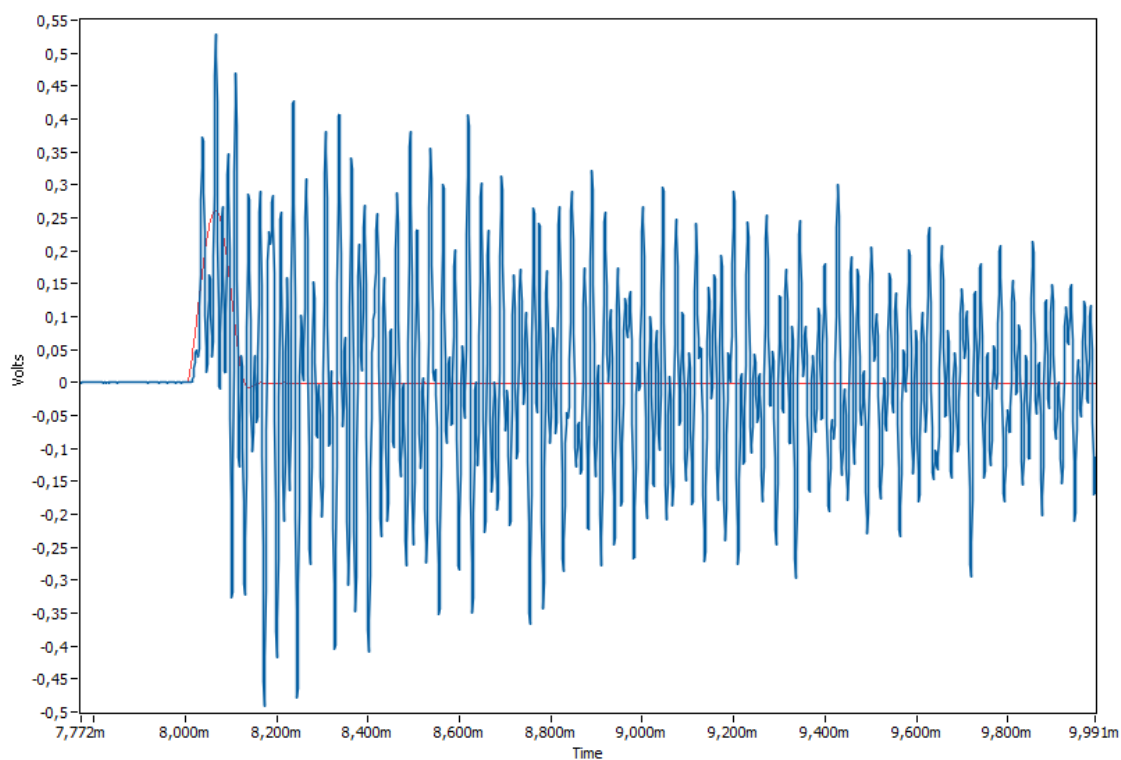
$$l = 2 \cdot a = 2 \cdot 0,098 [m] \quad 46$$

kde a je výška válce (kalibračního bloku) a zároveň vzdálenost bodu nárazu od akcelerometru. Frekvence vlny pak činí

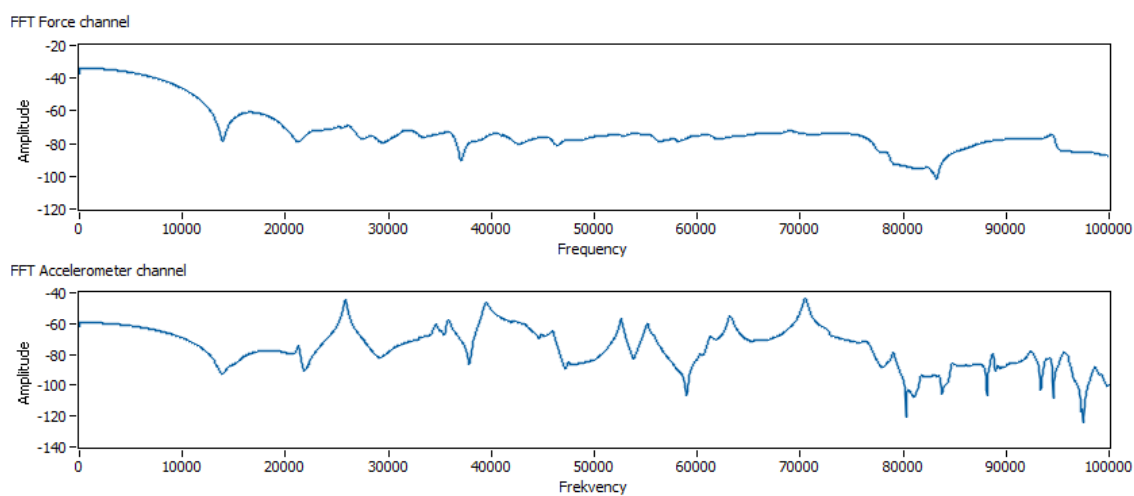
$$f_{rez} = \frac{1}{T_{rez}} = \frac{1}{l/v_v} \doteq \frac{1}{0,196/5043} \doteq 25,7 [kHz] \quad 47$$

³⁰ Dle zdroje [13]

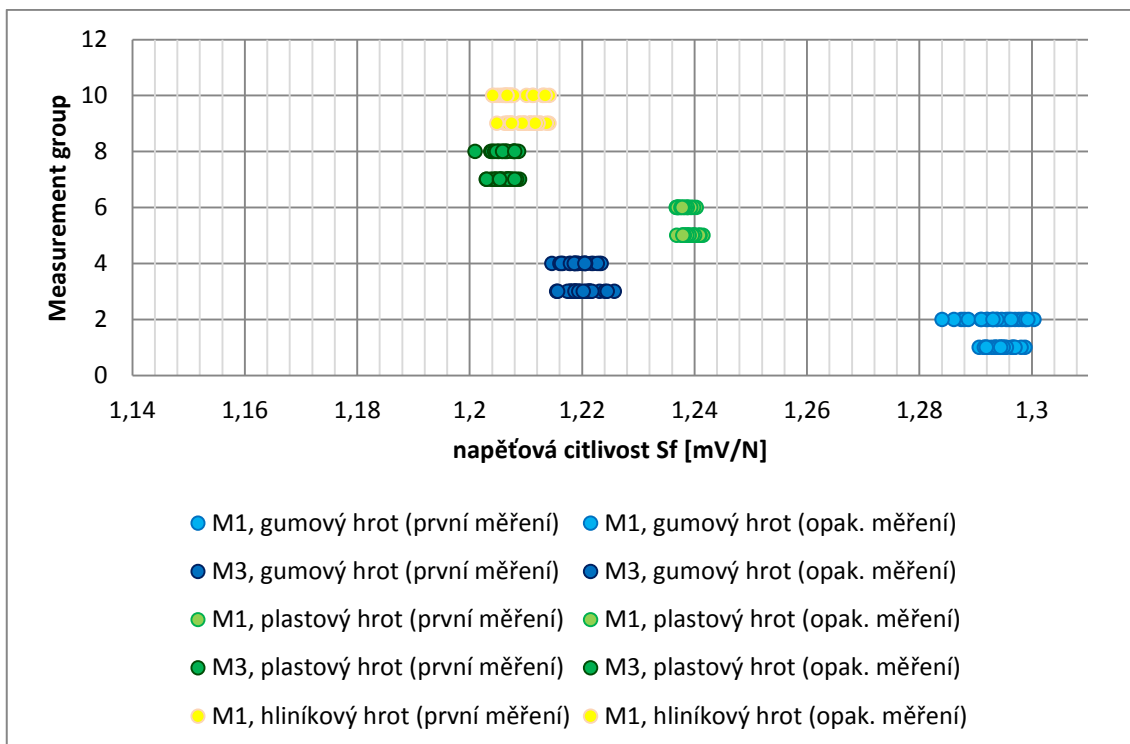
Jsou-li uvedené výpočty dostatečně přesné, lze konstatovat, že nejvýraznější z pozorovaných rezonančních frekvencí je dána šířením a odrazem nárazové vlny. Při pohledu na složitý rezonanční děj na obrázku (M3) je však zřejmé, že jej skutečně utváří složek více. Otázkou však zůstává, proč jsou tyto rezonance tak intenzivní a tak výrazně přehlušují vlastní pulz, neboť při použití kalibračního bloku M1 k tak výrazným rezoncím zdaleka nedochází..



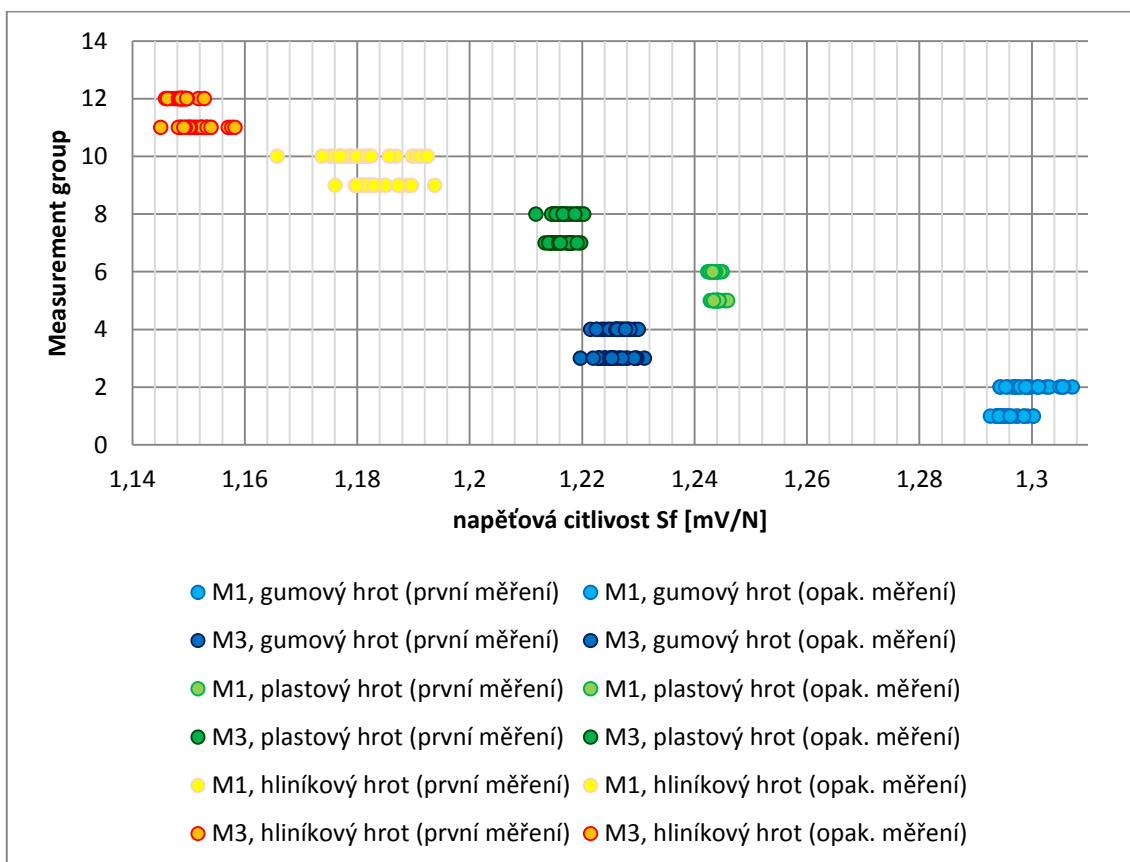
Obrázek 34: Velmi silné rezonance vyvolané nárazem hliníkového hrotu na kalibrační blok M3



Obrázek 35: Spektrum pulzu v kanále síly a v kanále zrychlení pro záznam z obrázku (32)



Obrázek 36: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z amplitudy pulzu, vliv kalibračního bloku



Obrázek 37: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z frekvenční oblasti, vliv kalibračního bloku

4.9 Testování vlivu akcelerometru

Motivace: Ačkoliv výsledky zkoušky vlivu kalibrační hmoty jsou zatíženy chybou, kterou vnáší značné rezonance, odečet hodnot z frekvenční oblasti je mimo tyto rezonance, a proto by takto odečtená hodnota příliš ovlivněna být neměla. Nelze tedy přehlédnout výrazné rozdíly mezi kalibračními hodnotami pořízenými s blokem M1 a blokem M3 a je třeba vyšetřit, zda je skutečně hmotnost akcelerometru vůči kalibračnímu bloku dostatečně zanedbatelná. Jednou z možností, jak prověřit, jaký poměr hmotnosti kalibračního bloku a snímače se začíná výrazně projevovat, je upravovat hmotnost bloku za opakované kalibrace s využitím jednoho snímače. To by mohlo být poněkud zdlouhavé, a proto byl zvolen postup opačný – bylo provedeno kalibrační měření s blokem M3 a akcelerometrem KD 30, jehož hmotnost činí 20,3g, tedy asi 200x méně, než je hmotnost bloku M3. Nebudou-li rozdíly zanedbatelné, je třeba snížit hmotnost použitých akcelerometrů.

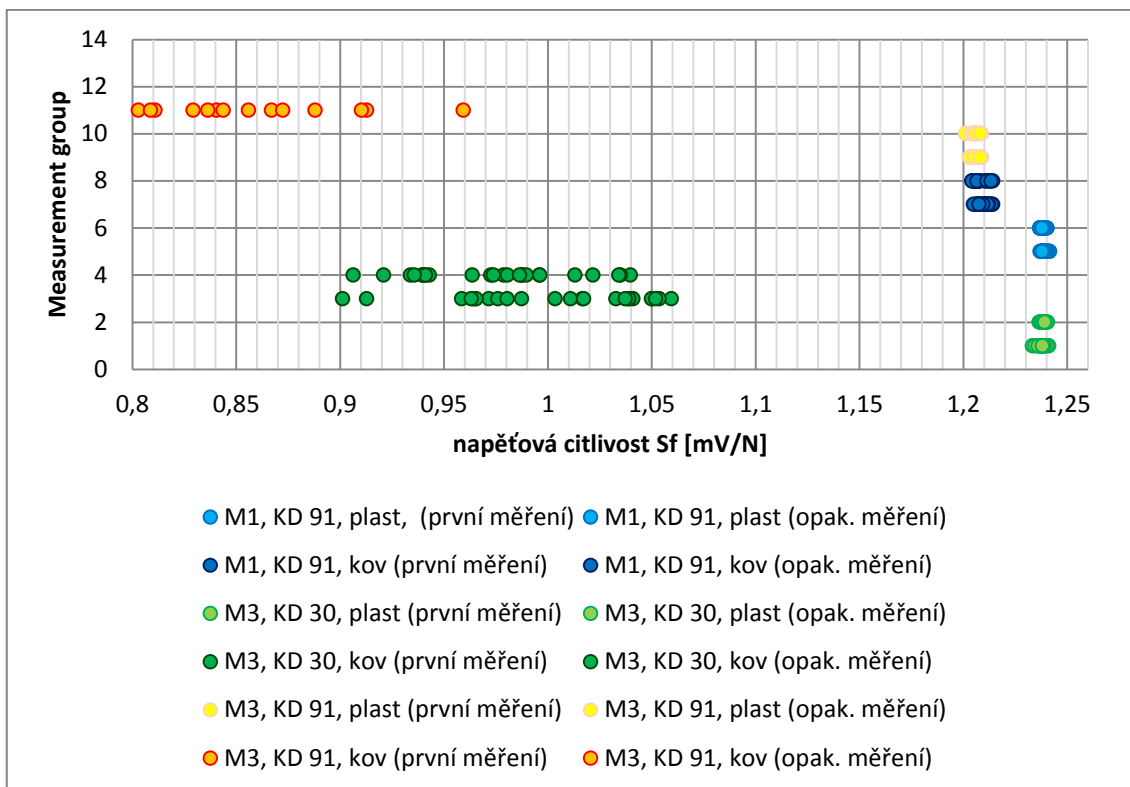
Konfigurace pracoviště: akcelerometr KD 91 v.č.: 0143 a s kalibračním blokem M1 a M3 (použity údaje z testování vlivu kalibračního bloku), akcelerometr KD 30 v.č. 5590, různá zesílení nábojového zesilovače, 50kHz lowpass filtr na nábojovém zesilovači, IEPE napájecí modul napájen 12V, měřeno 12.5. 2015

Postup: Při testování je vedeno 25 úderů kladívkem upevněným k padacímu ramenu ze střední spouštěcí výšky. Měření je stejným způsobem opakováno pro hliníkový a plastový hrot. Při zpracování dat odečtem z frekvenční oblasti byly použity příslušné hodnoty napěťových citlivostí použitého akcelerometru dle kalibračního listu.

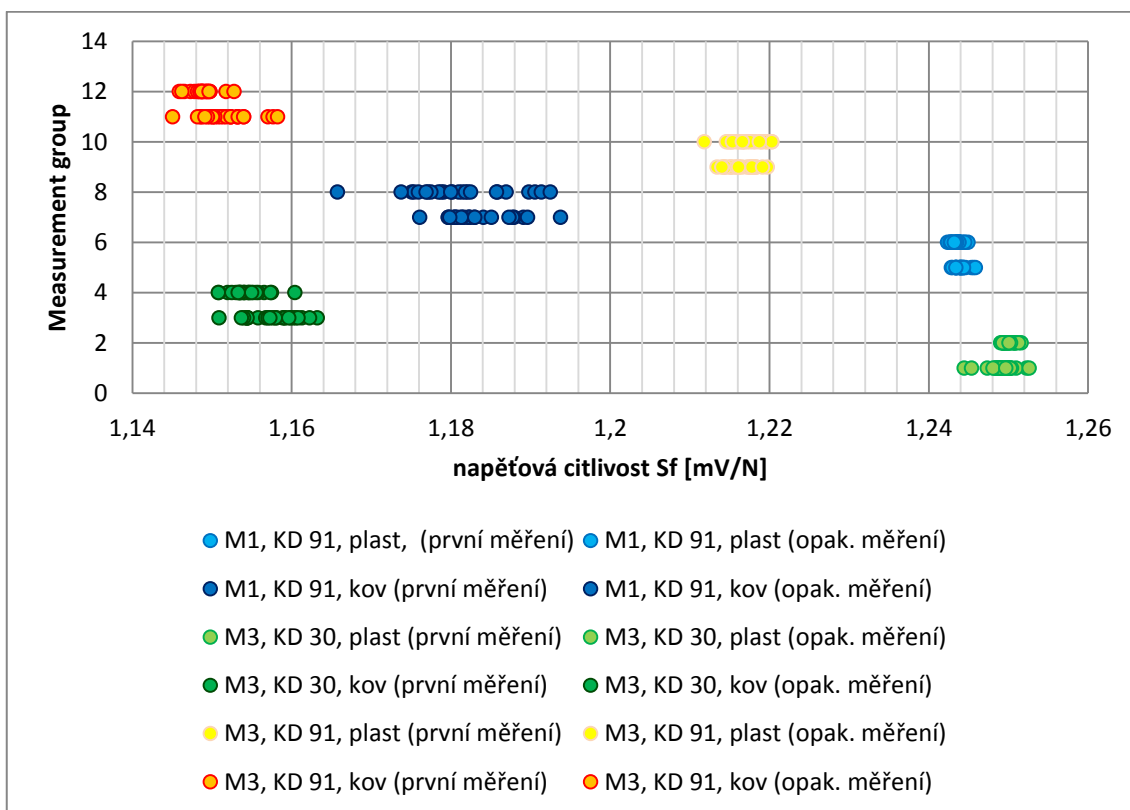
Výsledky měření:

Tabulka 7: Výsledky testování vlivu hmotnosti akcelerometru

Skupina	Kalibrační blok, akcelerometr, hrot, hmotnostní poměr	\bar{x} (frek.)	σ (frek.)	\bar{x} (amp.)	σ (amp.)
		[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]
Meas. group 1	M3, KD 30, plast, 1:208 (první měření)	1,2492	0,0018	1,2377	0,0017
Meas. group 2	M3, KD 30, plast, 1:208 (opak. měření)	1,2500	0,0007	1,2385	0,0009
Meas. group 3	M3, KD 30, kov, 1:208 (první měření)	1,1577	0,0031	1,0019	0,0447
Meas. group 4	M3, KD 30, kov, 1:208 (opak. měření)	1,1544	0,0023	0,9743	0,0373
Meas. group 1	M1, KD 91, plast, 1:289 (první měření)	1,2440	0,0008	1,2392	0,0012
Meas. group 2	M1, KD 91 plast, 1:289 (opak. měření)	1,2435	0,0006	1,2381	0,0010
Meas. group 3	M1, KD 91 kov, 1:289 (první měření)	1,1833	0,0041	1,2097	0,0025
Meas. group 4	M1, KD 91, kov, 1:289 (opak. měření)	1,1810	0,0062	1,2080	0,0030
Meas. group 1	M3, KD 91, plast, 1:2350 (prv. měření)	1,2166	0,0017	1,2060	0,0016
Meas. group 2	M3, KD 91, plast, 1:2350 (o. měření)	1,2170	0,0021	1,2061	0,0018
Meas. group 3	M3, KD 91, kov, 1:2350 (první měření)	1,1517	0,0031	0,8057	0,0731
Meas. group 4	M3, KD 91, kov, 1:2350 (opak. měření)	1,1488	0,0015	0,7304	0,0499



Obrázek 38: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z amplitudy pulzu, vliv hmotnosti akcelerometru



Obrázek 39: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z frekvenční oblasti, vliv hmotnosti akcelerometru

Komentář k naměřeným hodnotám: Z grafů je patrné jejich rozdělení na levou a pravou část a v každé z nich převažují hodnoty jednoho typu hrotu. Hodnoty odečtené z amplitudy pulzu pro hliníkový hrot výrazně vybočují z trendu, což je dáno chybným odečtem kvůli výrazným rezonancím. Nakolik se rezonance podílí na hodnotách s plastovým hrotem je otázkou, ovšem obecně lze přesnost odečtu z časové oblasti při tomto měření považovat za sníženou. Z dat odečtených z frekvenční oblasti vyplývá trend, který byl před započítáním měření předpokládán, tedy že napěťová citlivost roste se snižujícím se hmotnostním poměrem kalibračního bloku a akcelerometru. Jsou-li závěry tohoto testu správné, lze konstatovat, že ani drobný akcelerometr typu KD 91 nemá dostatečně zanedbatelnou hmotnost vůči kalibračnímu bloku M1.

4.10 Testování vlivu operátora

Motivace: Součástí každého kalibračního měření je vždy operátor ručně drženého kladívka, který přímo ovlivňuje pečlivost a přesnost každého úderu. Protože předchozí testy ukázaly významný vliv nedbalého úderu, je vhodné učinit srovnání mezi mechanickým a manuálním vedením úderu. Srovnávací hodnoty jsou převzaty z testování vlivu hrotu.

Konfigurace pracoviště: akcelerometr KD 91 v.č. 0237 s kalibračním blokem, ruční manipulace s kladívkem, plastový hrot, 50kHz lowpass filtr na nábojovém zesilovači, IEPE napájecí modul napájen 12V, měřeno 12.5. 2015

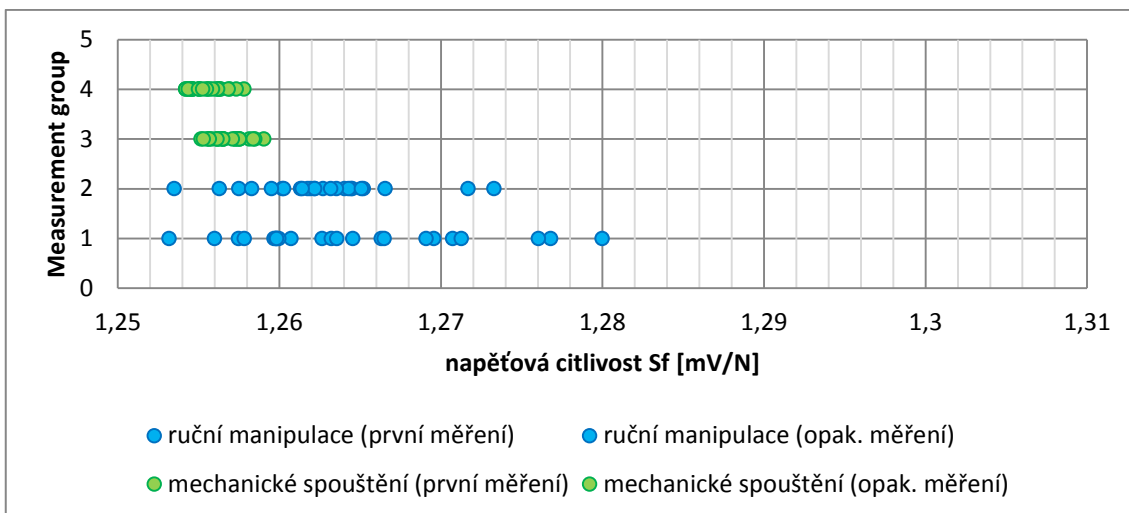
Postup: Při testování je vedeno 25 úderů ručně drženým kladívkem.

Výsledky měření:

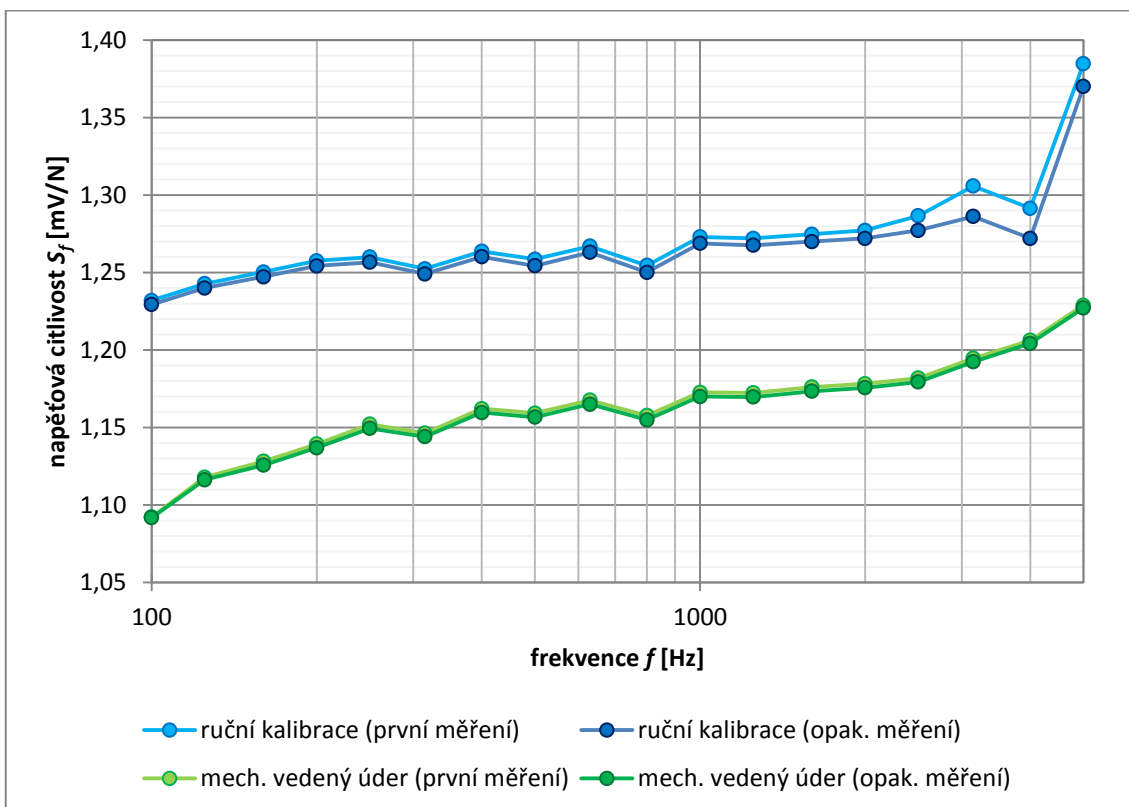
Tabulka 8: Srovnávací tabulka naměřených hodnot při ruční manipulaci a mechanickém pouštění kladívka

Skupina	manipulace	\bar{x} (frek.)	σ (frek.)	\bar{x} (amp.)	σ (amp.)
		[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]
Meas. group 1	ruční manipulace (první měření)	1,2722	0,0111	1,2645	0,0070
Meas. group 2	ruční manipulace (opakované měření)	1,2677	0,0049	1,2626	0,0042
Meas. group 3	mech. spouštění (první měření)	1,2616	0,0008	1,2566	0,0012
Meas. group 4	mech. spouštění (opakované měření)	1,2610	0,0006	1,2555	0,0010

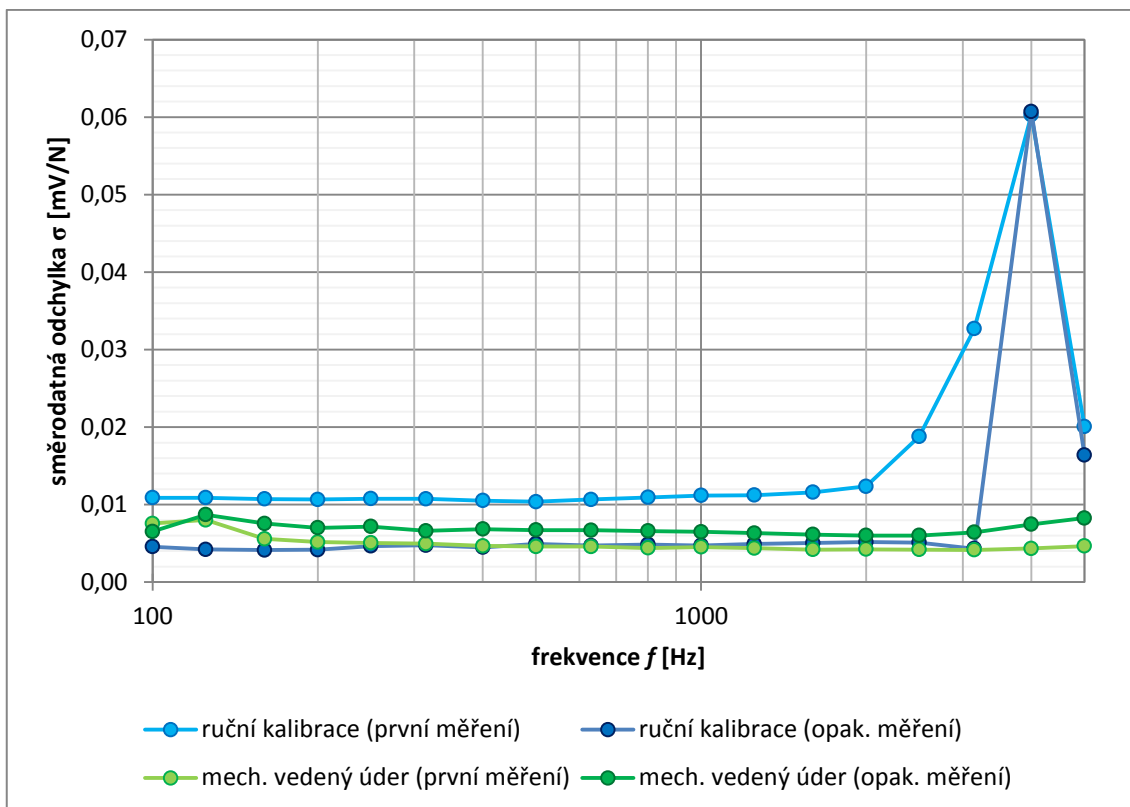
Komentář k naměřeným hodnotám: Přínos mechanického řešení spouštění kladívka pro účely ověřování kalibračních vlivů je zjevný zejména ve zřetelném omezení rozptylu hodnot. Měření s mechanickým a manuálním řešením vedení úderu je možno považovat za kompatibilní.



Obrázek 40: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z amplitudy pulzu, srov. operátora a mech. vedeného úderu.



Obrázek 41: Průběhy napěťové citlivosti stanovené z frekvenční roviny v závislosti na frekvenci odečtu (srovnání operátora a mechanicky vedeného úderu)



Obrázek 42: Průběhy směrodatné odchylny bloku měření při odečtu z frekvenční roviny (srovnání operátora a mechanicky vedeného úderu)

4.11 Testování vlivu šikmého a nepřesného úderu

Motivace: Vzhledem k úvaze uvedené v podkapitole 3.1 bylo testování vlivu nedbalého úderu provedeno jen povrchně a orientačně. Naměřené hodnoty mají sloužit jako příklad jednoho z možných výsledků, který lze po nedbalém úderu obdržet.

Konfigurace pracoviště: akcelerometr KD 91 v.č. 0237, kalibrační blok M1, zesílení nábojového zesilovače 10x, použit plastový hrot, 50kHz lowpass filtr na nábojovém zesilovači, IEPE napájecí modul napájen 12V, měřeno 11.5. 2015.

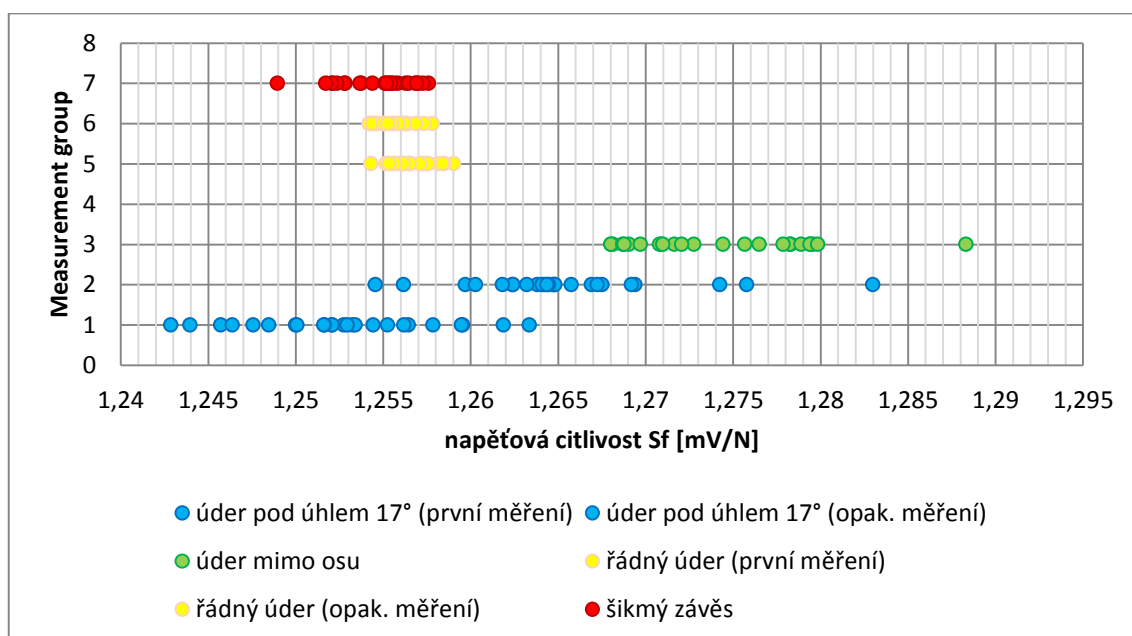
Postup: Při testování je vedeno 25 úderů kladívkem upevněným k padacímu ramenu ze střední spouštěcí výšky. Nosná struktura nesoucí kalibrační blok je umístěna dál a pozice kladívka na padacím rameni je upravena tak, aby při srážce kladívka s kalibračním blokem svíraly nárazové roviny nenulový úhel. Rameno v okamžiku nárazu nyní není situováno kolmo k rovině země, ale svírá úhel 17° od kolmice. Stejný úhel vymezují nárazové plochy v okamžiku nárazu. Pro náraz mimo osu jsou kladívko a nosná struktura uvedeny do původního (používaného při jiných testech) sestavení, pouze nosná struktura je vychýlena o asi 0,5cm vpravo z pohledu padajícího kladívka. Pro měření se šikmým závěsem je použito uchycení vlasců s dvojnásobným rozpětím nosným ramen, než jaké by odpovídalo kolmému směru vlasců.

Výsledky měření:

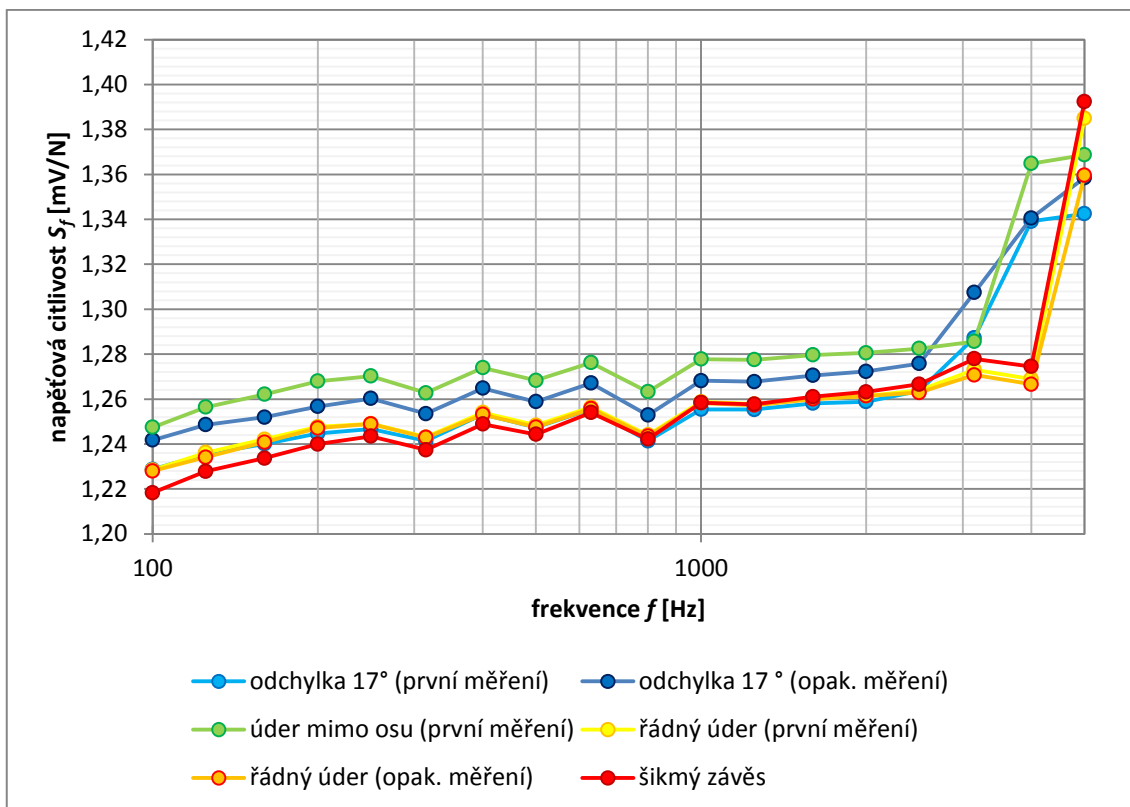
Tabulka 9: Výsledek při měření vlivu nedbalého úderu a nesprávného uložení

Skupina	Poznámka	\bar{x} (frek.) [mV/N]	σ (frek.) [mV/N]	\bar{x} (amp.) [mV/N]	σ (amp.) [mV/N]
Meas. group 1	náraz pod úhlem 17° (první měření)	1,2589	0,0049	1,2528	0,0053
Meas. group 2	náraz pod úhlem 17° (opak. měření)	1,2705	0,0048	1,2654	0,0059
Meas. group 3	náraz 0,5 cm mimo osu (první měření)	1,2810	0,0058	1,2742	0,0052
Meas. group 5	řádný náraz (první měření)	1,2616	0,0008	1,2566	0,0012
Meas. group 6	řádný náraz (opak. měření)	1,2610	0,0006	1,2555	0,0010
Meas. group 7	šikmý závěs	1,2596	0,0018	1,2546	0,0022

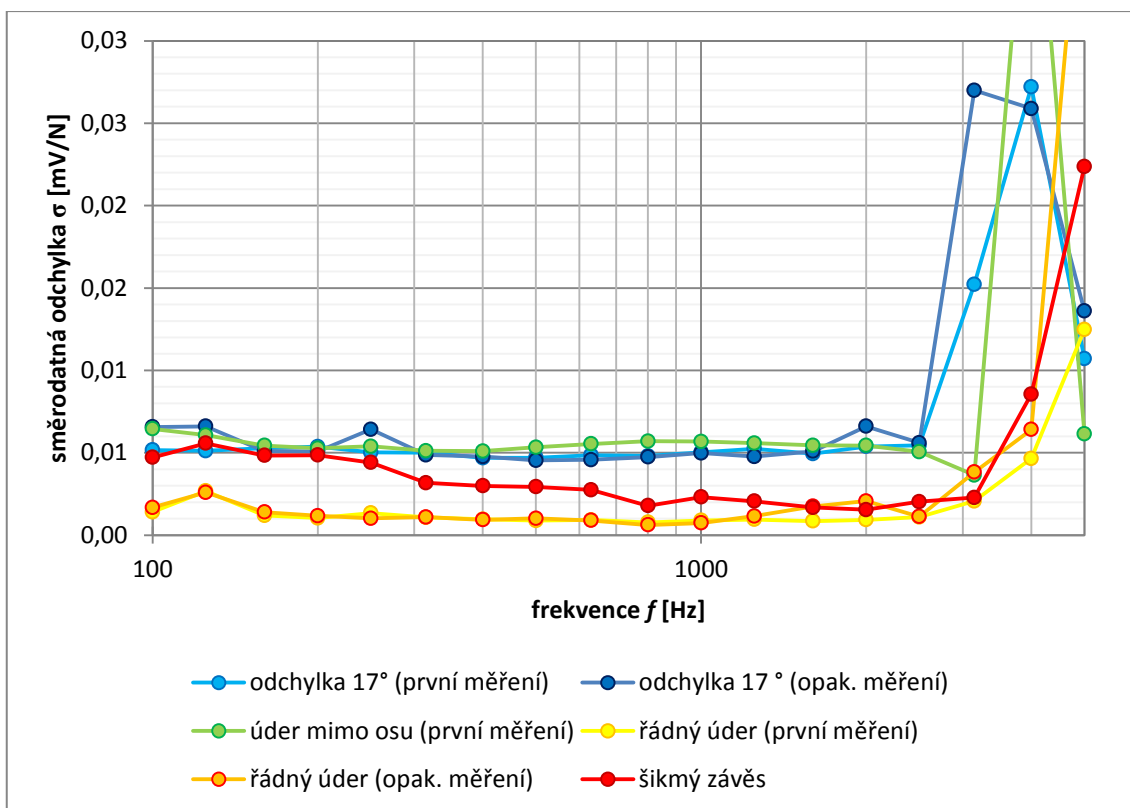
Komentář k naměřeným hodnotám: Z naměřených hodnot je patrné, že nedbalé úderu, tak jak byly při testování vedeny, mohou vnést do měření významnou chybu. Srovnání časových průběhů v rámci jednoho bloku 25 úderů ukazuje, že amplituda síly byla pro jednotlivé nárazy poměrně proměnlivá, přičemž změny amplitudy příslušných záznamů zrychlení tomu příliš neodpovídají. Kupříkladu při měření úderů mimo osu se amplituda v kanále síly měnila v rozmezí zhruba 0,6V až 1V. I to se projevilo značným nárůstem rozptylu výsledných hodnot, což odpovídá vizuálnímu pozorování pohybu válce bezprostředně po nárazu. V případě šikmých úderů i úderu mimo osu byla trajektorie tohoto pohybu velmi odchýlená od směru osy volného pohybu kyvadla a kalibrační blok vykazoval náznak torzních kmitů. Nesprávně zavěšený blok sice vyvolal podobné chování, nicméně trajektorie pohybu po nárazu se mnohem více shodovala s požadovaným směrem.



Obrázek 43: Graf rozptýlení hodnot při odečtu z amplitudy pulzu, vliv nedbalého úderu a uložení struktury



Obrázek 44: Průběhy napět'ové citlivosti stanovené z frekvenční roviny v závislosti na frekvenci odečtu (vliv nedbalého úderu)



Obrázek 45: Průběhy směrodatné odchylky bloku měření při odečtu z frekvenční roviny (vliv nedbalého úderu)

4.12 Souhrnná diskuze k provedeným zkouškám

Během testů se dospělo hned k několika podstatným zjištěním. Byl potvrzen vliv nárazové síly (respektive výšky spouštění ramena s kladívkem) na kalibrovanou hodnotu, což je v rozporu s teoretickými předpoklady. Spojitost mezi kalibrovanou hodnotou a úrovní výstupu je však možné vidět při zpracování nejistot, neboť stejnosměrná chyba A/D převodníku je vtažena k také k jeho plnému rozsahu. Důsledkem pro další testování byla snaha používat vždy jednotnou spouštění výšku.

Naopak v souladu s teorií se ukázal vliv výměny hrotu, což vytváří až 10% rozdíl v napěťových citlivostech. Rozptyl kalibračních hodnot při použití různých hrotů ovšem není jednotný a zpravidla je nejmenší u hrotu plastového. Velkých odchylek dosahuje kalibrační metoda zejména v případě hliníkového hrotu, který navíc budí různé rezonanční kmitočty. Ačkoliv pro minimalizaci vlivu rezonancí a šumu na odečet poměru napětí z amplitud pulzů v časové oblasti bylo maximálně využíváno fitování pomocí metody nejmenších čtverců, stabilnější výsledky poskytuje metoda odečtu z frekvenční oblasti. Rezonanční kmitočty znamenají výrazný problém zejména při použití velkého kalibračního bloku, v němž je po nárazu vybuzeno hned několik velmi výrazných rezonancí. To zvyšuje potřebu využívat pro dodatečné utlumení odezvy speciálních váhových oken. Původ všech významných rezonancí, vyskytujících se při použití kalibračního bloku M3, nebyl objasněn. Bylo však nastíněno, že jedna z nejvýraznějších rezonancí pravděpodobně vzniká odrazem nárazové vlny.

Posouzení věrohodnosti naměřených dat však významně komplikují výsledky posledního testu, které naznačují, že ani akcelerometr typu KD 91 s hmotností přibližně 1,8g není dostatečně zanedbatelné hmotnosti vůči půlkilovému kalibračnímu bloku. Poměr hmotností tento akcelerometr patrně splňuje až s velkým kalibračním blokem (pracovně označeným M3), v případě kterého však dochází k výše jmenovaným intenzivním rezonancím. Nabízí se otázka, zda by situaci nevyřešilo použitá akcelerometru na jiném principu (například využití interferometru). Jsou-li však rezonance ve velkém kalibračním bloku dány opakovaným odrazem nárazové vlny, použití interferometru tento problém nevyřeší. Řešení by to však mohlo spolehlivě poskytnout pro kalibrační struktury menší velikosti, kde výrazné rezonance nevznikají, a hmotnost akcelerometru je zároveň zanedbatelným problémem. Protože však výběr hmotnosti kalibračního bloku podléhá dalším požadavkům, bylo by vhodné dalšími testy objasnit vznik ostatních rezonancí a, bude-li to možné, jejich vzniku zamezit, aby mohly být větší kalibrační bloky používány s uspokojivými výsledky.

Vliv správného zavěšení a nedbalého úderu se ukázal být rovněž velmi vlivným aspektem, který může zcela znehodnotit výsledky zkoušky. Protože se kupříkladu šikmý úder velmi obtížně detekuje, navržené řešení spočívá v neustálé vizuální kontrole pohybu kalibračního bloku bezprostředně po úderu kladívkem. Je-li trajektorie jeho pohybu dostatečně v souladu se směrem stupně volnosti zavěšení, úder byl pravděpodobně veden správně. V opačném případě je třeba výsledky zahodit a úder opakovat.

4.13 Nejistoty měření

Na základě testů provedených v rámci této práce lze konstatovat, že vlivů, vnášejících do měření nepřesnosti, je mnoho, jsou často těžko popsatelné a přitom mohou být dosti významné. Mnohé z chyb jsou závislé například na použitém hrotu, způsobu odečtu dat z výstupních napětí převodníků či frekvenci, pro kterou potřebujeme napěťovou citlivost snímače síly stanovit. Obdobně tedy i nejistota měření je funkcí konfigurace pracoviště, a pokud bychom měli být důslední, musela by být stanovena zvlášť pro všechny hroty, jednotlivé kalibrační bloky a jejich platnost rozdělena na určitá frekvenční pásma.

Pro regulérní výpočet nejistoty měření je třeba sestavit pravděpodobnostní model, který zahrnuje všechny známé zdroje chyb a parazitní vlivy. Žádný model měření přirozeně nikdy nebude zahrnovat všechny nepříznivé aspekty a tyto rušivé aspekty nikdy nebudou kvantifikovány s nekonečnou přesností, proto je vhodné soustředit se na hlavní zdroje nejistot. Model kalibračního pracoviště by musel zahrnovat jak část hardwarovou, tak i část zpracování signálů v části softwarové, takže by odlišnou nejistotu měl způsob odečtu dat z amplitudy pulzu v časové oblasti a způsob odečtu z frekvenční oblasti. Nejistota by měla zahrnovat nejen ideální průběhy veličin, ale také krajní případy, v nichž se metody odečtu mohou velmi lišit, jak je vidět v grafech přiložených k jednotlivým testům. Sestavit a hlavně správně vyčíslit parametry regulérního modelu kalibračního pracoviště včetně správného stanovení hustoty pravděpodobnosti jednotlivých prvků převyšuje schopnosti a časové možnosti autora a zůstává námětem pro navazující práci.

Jestliže jsou regulérní výpočty příliš komplikované a chybí k nim vstupní údaje, je vhodné pokusit se alespoň odhadnout, v jakém rozmezí se může nejistota pohybovat. Vyděme ze vztahu (40), na základě něhož byla kalibrovaná hodnota počítána. V tomto vztahu jsou při výpočtu nejistot (například metodou Monte Carlo) kritickými hodnotami napěťové výstupy $U_f(f)$ a $U_a(f)$ jejichž pravděpodobnostní popis není znám. Za vstupní veličinou můžeme považovat sílu, která působí na snímač, jehož nábojový výstup vstupuje do převodníku a platí

$$q_f = S_{f,q} \cdot F [pC] \quad 48$$

kde $S_{f,q} [pC/ms^{-2}]$ je nábojová citlivost snímače síly. Nábojový výstup je převeden pomocí modulu MMF M28 na výstupní napětí

$$U_{f,v} = k_{f,p} \cdot q_f [mV] \quad 49$$

kde $k_{f,p} [mV/pC]$ je převodní konstanta napájecího modulu. Výstup z napájecího modulu je dále digitalizován měřicí USB kartou NI 9223 na digitální hodnotu $U_{f,D}$

$$U_{f,D} = k_{gain} \cdot U_{f,V} \pm k_{offset} [mV] \quad 50$$

kde je chyba převodu karty způsobená nejednotkovou konstantou $k_{gain}[-]$ reprezentující multiplikativní chybu a nenulovou konstantou $k_{offset} [mV]$, reprezentující aditivní chybu. Digitalizovaná hodnota $U_{f,D}$ je pak zpracována algoritmem programu a je odečtena hodnota $U_f(f)$ pro odečet z frekvenční oblasti resp. U_f pro odečet pomocí fitování. Fakticky identický postup pak existuje také pro hodnotu $U_a(f)$. Uvažujme nyní zjednodušeně, že působí síla 1000 N (což je běžná úroveň síly při nárazu plastovým či hliníkovým hrotem) a neuvažujme dynamický charakter měření ani dynamický princip činnosti snímačů, stejně jako algoritmický odečet hodnot pomocí sw. Výpočet napěťové citlivosti pak popisuje neformální zjednodušený vztah

$$S_f = \frac{S_a}{m} \cdot \frac{k_{f,p} \cdot S_{f,q} \cdot F \cdot k_{gain} \pm k_{offset}}{k_{a,p} \cdot S_{a,q} \cdot F / m \cdot k_{gain} \pm k_{offset}} [mV/N] \quad 51$$

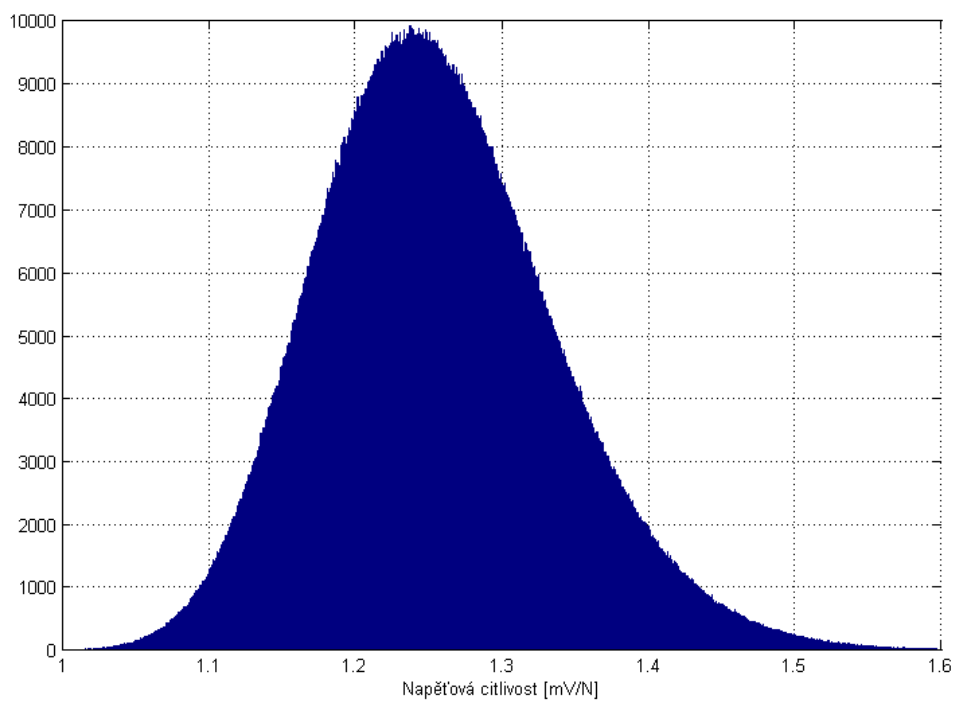
kde $k_{a,p} [mV/pC]$ je převodní konstanta nábojového zesilovače MMF M68
 $S_{a,q} [pC/ms^{-2}]$ je nábojová citlivost akcelerometru.

Budeme-li považovat vztah (51) za zjednodušený model měření, můžeme jej využít pro odhad rozptýlení hodnot vlivem použitého hardwaru a metodou Monte Carlo sestavit podobu histogramu. Pro tučně zvýrazněné symboly lze ve specifikacích použitého hardwaru vyčíst jejich možnou odchylku, ostatní proměnné budou odhadnuty jako konstanta. V prostředí Matlab byl proveden orientační výpočet pro situaci s plastovým hrotem, kalibrační blokem M3 a snímačem KD 91 v.č., s hodnotami vzatými z příslušných specifikací:

$$\begin{aligned} k_{f,p} &= 1 \pm 0,5\% [mV/pC] \\ k_{gain} &= 1 \pm 0,2\% [-] \\ k_{offset} &= 0 \pm rozsah * 0,1\% = 0 \pm 10,6 \cdot 10^3 * 0,001 [mV] \\ m &= 4,228 - 4,232 [kg] \\ k_{a,p} &= 1 \pm 0,02 [mV/pC] \\ S_{a,q} &= 0,33247 \pm 0,67\% [pC/ms^{-2}] \end{aligned}$$

Síla F byla zvolena 1000 N, nábojová citlivost snímače síly pak $S_{f,q} = 1,25$. Hodnoty ve specifikacích byly chápány jako mezní hodnoty normálního rozdělení pro $k = 2$, tedy interval spolehlivosti 95,45%. Pravděpodobnostní rozdělení pro měření s digitální vahou bylo použito rovnoměrné. Výsledný histogram, pro 10^7 vygenerovaných hodnot, zachycuje obrázek (46). Z jeho průběhu je patrný lehce atypický tvar Gaussovy křivky, se strmější pravou stranou. Střední hodnota činí cca 1,255 mV/N, což respektuje

zadanou výchozí hodnotu. Směrodatná odchylka pak nabývá hodnoty přibližně 0,081mV/N.



Obrázek 46: Orientační histogram hodnot napěťové citlivosti pro měření s plastovým hrotem, kalibrační hmotou M3 a snímačem KD 91, vypočteno metodou Monte Carlo.

5 ZÁVĚR

V rámci této práce byla vypracována podrobná rešerše, rozebírající problematiku rázového kladívka na několika úrovních. Detailně byl zpracován popis kladívka s důrazem na užití jeho parametrů v praxi. Kladívko bylo rovněž popsáno z hlediska jeho dynamiky. Rázu, jakožto klíčovému fenoménu úzce souvisejícímu s jeho funkcí, byla věnována samostatná kapitola. Z matematického modelu rázového kladívka byly odvozeny některé jeho typické vlastnosti, aby mohly být dány do přímé souvislosti s důvody jeho kalibrace.

Stěžejní částí této práce byl vhodný návrh kalibračního pracoviště a jeho realizace včetně obslužného softwaru, který má kalibrační proces v maximální míře automatizovat. V souvislosti s tím byl proveden rozbor vlastností a požadavků, které musí kalibrační pracoviště splňovat. Pracoviště bylo realizováno v podobě nosné struktury se zavěšenou kalibrační hmotou, s možností částečného modulárního přenastavení. Důsledkem podrobného rozboru bylo také sestavení pomocného přípravku, který standardně není součástí běžného kalibračního pracoviště, ale v rámci testování různých nepříznivých vlivů plní významnou úlohu jako prostředek zamezující vlivu lidského faktoru. Tento přípravek má formu padacího ramena, ke kterému je kladívko upevněno, a umožňuje tak mnohem přesnější řízení úrovně nárazové síly i přesnosti dopadu.

Nedílnou součástí pracoviště je obslužný software vytvořený v prostředí LabVIEW, který kromě automatizace měření zprostředkovává mnohem důležitější úlohu, a to důsledné zpracování naměřených dat. Data mohou být s použitím tohoto softwaru sbírána a zpracovávána libovolnou USB kartou, schopnou se softwarem komunikovat. Zpracování dat zahrnuje, kromě snadného zálohování a rozšířených možností prezentace, hlavně analýzu ve frekvenční i časové oblasti, s možností základního statistického zpracování. Realizovány jsou dva způsoby odečtu dat z naměřených průběhů – z amplitudového spektra a z časového průběhu pomocí fitovacího algoritmu. Oba způsoby odečtu mají své výhody i nevýhody, což je v rámci práce diskutováno.

Kalibrační postup na sestaveném kalibračním pracovišti s vytvořeným obslužným softwarem byl mnohokrát ověřen a využit pro zkoumání vlivů negativně působících na kalibrační výsledky. Bylo předně testováno, které prvky kalibračního pracoviště jsou nejslabším článkem z hlediska dosažitelné přesnosti, a také byla ověřena platnost teoretických předpokladů o změnách napěťové citlivosti snímače síly v rázovém kladívku. Z kalibračních vlivů byl testován vliv nábojového převodníku, kalibračního bloku, zavěšení bloku a nedbalý úder, vliv hmotnosti akcelerometru, vliv zručnosti operátora a vliv úrovně dopadové síly. Během testů se dospělo k několika závěrům, které jsou námětem na pokračování této práce. V rozporu s teorií byl zjištěn vliv úrovně dopadové síly na kalibrovanou hodnotu, což je třeba blíže objasnit. Při kalibračních testech s většími kalibračními bloky se jako klíčový rušivý aspekt ukázaly četné rezonance, které výrazně znesnadňují analýzu naměřených dat a vnáší do měření

nepřijatelnou chybu. Ačkoliv jeden z nejvýraznějších zdrojů těchto rezonancí byl pravděpodobně identifikován jako odraz nárazové vlny, problém s rezonancemi na větších kalibračních blocích si vyžaduje další zkoumání. Jiný významný problém byl zjištěn při závěrečných měřeních, a totiž že hmotnost použitých akcelerometrů není při měření zanedbatelná a vnáší do měření chybu. Námětem pro pokračování práce je proto vyzkoušet s malými kalibračními bloky interferometr.

Výsledky všech měření jsou zpracovány jednak tabulkově a jednak v podobě přehledných grafů rozptylu hodnot, které mají vypovídat o kompatibilitě, opakovatelnosti a přesnosti měření. Při kalibracích bylo dosaženo hodnot srovnatelných s hodnotou, kterou uvádí ve specifikacích výrobce kladívka, nicméně o důvěryhodnosti této udané hodnoty je možno pochybovat, jak bylo v práci důsledně diskutováno. Vzhledem k významným, ne zcela objasněným vlivům, které byly při kalibračních testech zachyceny a také pro náročnost sestavení regulérního modelu měření, nebyly důsledně stanoveny nejistoty měření. Nejprve by měly být řádně vyřešeny problémy s rezonancemi bloků a použitelností snímačů a poté by měl být věnován prostor pro stanovení nejistot. V rámci práce byl proveden pouze orientační neformální výpočet histogramu hodnoty napěťové citlivosti metodou Monte Carlo, pro zjevnější vyniknutí vlivu aktuálně použitého hardwaru na nejistotu měření.

LITERATURA

- [1] BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část: Modální zkoušky* [online]. 2012 [cit. 2015-01-10]. Dostupné z: <http://www.337.vsb.cz/materialy/BilosovaAlena_EMAskripta.pdf>. Literatura
- [2] MCCONNELL, K. G. a SANG-BO HAN. EFFECT OF MASS ON FORCE=TRANSDUCER SENSITIVITY. *Experimental Techniques* [online]. 1986, vol. 10, issue 7, s. 18-22 [cit. 2015-05-13]. DOI: 10.1111/j.1747-1567.1986.tb00346.x.
- [3] HÖSCHL, Cyril. 1977. *Rázová pevnost těles*. Praha: Dům techniky ČVTS. Stavba strojů, Svazek 44. Dostupné také z: http://www.it.cas.cz/files/skripta/06_RAZOVA_PEVNOST_TELES-ocr.pdf
- [4] ENDEVCO MEGGITT SENSING SYSTEMS. *Acceleration levels of dropped objects* [online]. 7 s. [cit. 2015-05-13]. Dostupné také z: https://www.endevco.com/news/archivednews/2009/2009_02/tp321.pdf
- [5] MCCONNELL, Kenneth G. 1995. *Vibration testing: theory and practice*. New York: John Wiley, 606 s. ISBN 04-713-0435-2
- [6] DALLY, James W, William F RILEY a Kenneth G MCCONNELL. *Instrumentation for engineering measurements*. 2nd ed. New York: Wiley, c1993, xxi, 584 p. ISBN 0471551929.
- [7] AL], Colin Hansen ... [et]. *Active control of noise and vibration*. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC, 2012. ISBN 0415590612.
- [8] STRUCTURAL TESTING, Part I: Mechanical Mobility Measurements, informativní materiály společnosti Brüel & Kjær
- [9] SUJATHA, C. 2010. *Vibration and acoustics: measurement and signal analysis*. New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Ltd. ISBN 00-701-4878-3.
- [10] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI 9222/9223 Calibration Procedure* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné také z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374922c.pdf>
- [11] TAYLOR, B. N. a THOMPSON. Factors for Units Listed Alphabetically. *Guide for the Use of the International System of Units* [online]. 2009 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.nist.gov/pml/pubs/sp811/index.cfm/appenB8.html#P>

- [12] HALVORSEN, W.G. a D.L. BROWN. Impulse technique for structural frequency response testing. *Journal of Sound and Vibration*. United Kingdom: Academic Press, 1997, : 12. ISSN 0022-460x. Dostupné také z: http://www.modalshop.com/filelibrary/AR-8_Halvorsen%20_Brown_Sound_and_Vibration%201977.pdf
- [13] 1.0038. <Http://www.steelss.com> [online]. 2011 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.steelss.com/Carbon-steel/1-0038.html>
- [14] *Vibrace a rázy - Experimentální určování mechanické pohyblivosti: Část 5: Měření pomocí buzení nárazem s budičem nepřipojeným ke konstrukci*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

Seznam příloh

Příloha 1. Kalibrační list akcelerometru MMF KD 91 v.č. 0143

Příloha 2. Kalibrační list akcelerometru MMF KD 91 v.č. 0237

Příloha 3. Kalibrační list akcelerometru MMF KD 30 v.č. 5590

Příloha 4. Specifikace rázového kladívka Endevco 2302-5