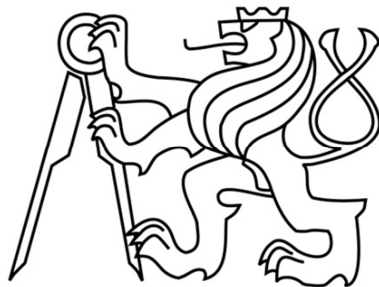


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta Elektrotechnická

Obor: Kybernetika a robotika

Katedra měření



# System pro měření vibrací

# System for Vibration Measurement

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. David Říha

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Draxler CSc.

Rok: 2014





## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. David Říha**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**  
Obor: **Letecké a kosmické systémy**

Název tématu česky: **System pro měření vibrací**

Název tématu anglicky: **System for Vibration Measurement**

### Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte obvody a programové vybavení systému pro měření vibrací u malých letadel a v průmyslových aplikacích. U systému jsou požadovány následující základní parametry:

Frekvenční rozsah: 2 Hz až 2 kHz

Vibrační rychlost: 0 až 25 mm/s

Přesnost: 5 % z rozsahu ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 1 kHz,  
10 % z rozsahu ve frekvenčním pásmu 2 Hz až 10 Hz a 1 kHz až 2 kHz

Předpokládá se použití piezoelektrického snímače vibrací a vyhodnocení signálu pomocí PC. Kromě vibrační rychlosti je požadováno měření vibračního zrychlení a výchylky při stejných parametrech jako u vibrační rychlosti. Součástí řešení je kalibrace systému v uvedeném rozsahu frekvencí a vibrační rychlosti.


### Seznam odborné literatury:

- [1] Salava, T.: Elektroakustická a elektromechanická měření. SNTL, Praha 1979
- [2] Handbook: Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers, Theory and Application. Bruel and Kjar, Denmark 1987
- [3] Hrnčíř, P.: Pracoviště pro měření vibrací. Diplomová práce ČVUT-FEL, Praha 1987
- [4] ČSN ISO 2954
- [5] RTCA/DO 160 C, Oborové středisko pro letecké předpisy a normalizaci, 1992

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Karel Draxler, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2012

Platnost zadání do<sup>1</sup>: 30. června 2014

  
Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.  
vedoucí katedry



  
Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 10. 10. 2012

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Jméno Příjmení



## **Poděkování**

Děkuji panu doc. Ing. Karlu Draxlerovi CSc. za vedení této práce a vedení firmy Noliac Systems s. r. o. za poskytnutí koncepce zařízení, obvodů pro zpracování signálu, akcelerometru, příslušenství, měřícího a zkušebního vybavení, finančních a dalších zdrojů pro realizaci práce.





## Obsah

1	Požadavky dané normou ČSN ISO 2954:2012.....	16
1.1	Obecné požadavky .....	17
1.2	Požadavky na snímač vibrací a propojovací kabel.....	19
1.3	Požadavky na indikační jednotku.....	21
1.4	Návod k použití.....	21
1.5	Shoda se zadáním.....	22
2	Požadavky dané normou RTCA/DO-160C.....	24
2.1	Obecné informace .....	24
2.1.1	Pořadí prováděných zkoušek.....	24
2.1.2	Okolní podmínky: .....	24
2.1.3	Zkušební zařízení .....	25
2.2	Kapitola 7 Provozní rázy a havarijní bezpečnost .....	25
2.2.1	Účel zkoušky .....	25
2.2.2	Provozní rázy .....	25
2.2.3	Havarijní bezpečnost.....	25
2.2.4	Impulzní zatížení.....	25
2.2.5	Orientace zařízení v letadle – známé a pevné.....	26
2.2.6	Orientace zařízení v letadle – neznámé a nahodilé.....	26
2.2.7	Požadavky na měřící zařízení.....	26
2.3	Kapitola 8 Vibrace.....	28
2.3.1	Účel zkoušky .....	28
2.3.2	Standardní vibrace.....	28
2.3.3	Robustní vibrace.....	29
2.3.4	Požadavky na vibrační zkoušky .....	29
2.3.5	Měření výkonové spektrální hustoty zrychlení .....	30
2.3.6	Zkouška standardních vibrací.....	31
2.3.7	Postup sinusové zkoušky.....	31
2.3.8	Postup náhodné zkoušky .....	32
2.3.9	Shoda se zadáním .....	32
2.4	Shrnutí.....	34
3	Výběr vhodného snímače vibračního zrychlení.....	34
3.1	Obecné požadavky .....	35
3.1.1	Z požadavků normy ČSN 2954:2012:.....	35
3.1.2	Z požadavků normy RTCA/DO-160C .....	35

3.2	Přehled dostupných typů .....	35
3.2.1	Snímače vibračního zrychlení od firmy Brüel & Kjær.....	35
3.2.2	Snímače vibrací firmy Endevco Meggitt.....	36
3.2.3	Snímače vibrací firmy Metra Mess- und Frequenztechnik .....	37
3.2.4	Snímače vibrací firmy Noliac .....	39
3.3	Konečný výběr.....	40
4	Konkurenční produkty a přehled možných řešení .....	40
4.1	Přehled konkurenčních produktů a jejich parametry .....	40
4.1.1	Přístroje firmy Brüel & Kjær .....	40
4.1.2	Přístroj firmy Voltcraft .....	42
4.1.3	Přístroj firmy Aura a.s. ....	43
4.1.4	Přístroje firmy Lutron .....	45
4.1.5	Přístroj firmy Areva.....	46
4.2	Shrnutí .....	47
5	Testovací indikační jednotka.....	47
5.1	Koncepce indikační jednotky .....	47
5.2	Vlastnosti zařízení .....	48
5.2.1	Počet vstupů .....	48
5.2.2	Vzorkovací frekvence .....	48
5.2.3	Počet bitů ADC .....	48
5.2.4	Elektromagnetická kompatibilita .....	49
5.2.5	Další vlastnosti .....	49
5.3	Zvolená koncepce .....	49
5.4	Senzor vibrací.....	50
5.5	Obvod ADC .....	51
5.5.1	Parametry ADC: .....	52
5.6	Měřicí zesilovače.....	53
5.6.1	Nábojový zesilovač .....	53
5.6.2	Zesilovač nízkých hladin signálu .....	56
5.6.3	Opatření proti rušení a zajištění EMC.....	56
5.6.4	Model nábojového zesilovače .....	57
5.6.5	Frekvenční charakteristika modelu .....	58
5.6.6	Další obvody indikační jednotky.....	59
5.7	HW indikační jednotky.....	60
5.7.1	Schéma indikační jednotky .....	60
5.7.2	Deska plošného spoje.....	61
5.7.3	Stínění .....	62

5.7.4	Vstupní konektor .....	63
5.7.5	Propojovací kabel SK132.....	64
6	Definice testů dle požadavků norem.....	65
6.1	ČSN 2954:2012 kapitola: 1.1 Obecné požadavky .....	65
6.2	ČSN 2954:2012 kapitola: 1.2 Požadavky na snímač vibrací a propojovací kabel.....	65
6.3	ČSN 2954:2012 kapitola: 1.3 Požadavky na indikační jednotku .....	67
6.4	Testování měřicí sestavy .....	68
6.4.1	Test sestavy zemním proudem .....	68
6.5	Opatření.....	69
6.6	Galvanické oddělení s vývojovou deskou ADUM4160.....	70
7	Finální verze indikační jednotky.....	70
7.1	Testování proveditelnosti návrhu .....	70
7.2	Přehled modifikací .....	71
7.2.1	Schéma zapojení.....	72
7.2.2	Deska plošného spoje.....	74
7.2.3	Konfigurace prototypové desky .....	75
8	Zkouška vlastností indikační jednotky .....	75
8.1	Kalibrace kondenzátoru C2.....	76
8.2	Použité přístroje pro kalibraci .....	76
8.3	Schéma měření.....	77
8.4	Průběh měření .....	78
8.4.1	Kalibrace v pásmu frekvencí od 1 Hz do 3.125 Hz.....	78
8.4.2	Kalibrace v pásmu frekvencí od 3.125 Hz do 31.25 Hz.....	78
8.4.3	Kalibrace v pásmu frekvencí od 31.25 Hz do 10 kHz.....	78
8.4.4	Pro všechny pásma frekvencí od 1Hz do 10 kHz.....	78
8.5	Výsledky kalibrace.....	78
8.5.1	Modelová frekvenční charakteristika .....	79
8.5.2	Linearita přenosu.....	80
9	Softwarové prostředí.....	81
9.1	Nastavení pro operační systém.....	81
9.2	Software DEWESoft .....	82
9.3	Měřicí prostředí.....	83
9.4	Stanovení nábojové citlivosti a rozsahu .....	82
9.5	Správa senzorů .....	83

9.6	Návrh korekčních filtrů .....	84
9.6.1	Model filtru v časově spojité oblasti .....	85
9.6.2	Filtr dle normy ČSN ISO 2954:2012 .....	85
9.6.3	Filtr pro frekvence od 2 Hz do 500 Hz.....	86
9.6.4	Filtr pro frekvence od 10 Hz do 2000 Hz.....	87
9.6.5	Integrátory a odstranění šumu .....	88
9.6.6	Vlastní šum indikační jednotky.....	88
9.6.7	Volba filtru horní propust integrátorů.....	89
10	Kalibrace .....	90
10.1	Postup kalibrace.....	90
10.2	Použité přístroje.....	91
10.3	Naměřené frekvenční charakteristiky .....	92
10.3.1	Výpočet přenosů a chyby z rozsahu měřené veličiny.....	92
10.3.2	Kalibrace ve frekvenčním pásmu od 10 Hz do 1 kHz.....	94
10.3.3	Kalibrace ve frekvenčním pásmu od 10 Hz do 2 kHz.....	98
10.3.4	Kalibrace ve frekvenčním pásmu od 2 Hz do 500 Hz.....	103
10.4	Nejistoty měření .....	107
10.4.1	Nejistota stanovení napětí na vstup kondenzátoru $C_k$ .....	107
10.4.2	Nejistota stanovení referenční hodnoty zrychlení .....	108
10.4.3	Nejistota stanovení referenční hodnoty rychlosti .....	109
10.4.4	Nejistota stanovení referenční hodnoty výchylky .....	109

## Anotace

Tato práce popisuje vývoj systému pro měření vibrací. Cílem práce je vyvinout levný měřicí systém skládající se ze senzoru vibrací, kabelu a měřicí jednotky. Zařízení poskytuje dostatečný frekvenční a dynamický rozsah měřené veličiny. Důraz je kladen především na přesnost měřených vibrací (z rozsahu měřené veličiny): do 5 % na frekvenčním rozsahu (10 Hz – 1 kHz) a do 10 % z rozsahů (2 Hz – 10 Hz a 1 kHz – 2 kHz). Zařízení je navrženo pro použití v průmyslu dle normy ČSN ISO 2954:2012 a pro měření vibrací pro certifikační zkoušky pro zařízení instalované v malých letadlech dle normy RTCA/DO-160C. Vibrace jsou měřeny piezoelektrickým akcelerometrem připojeným koaxiálním kabelem do indikační jednotky, ta je připojena přes sběrnici USB do osobního počítače. Data jsou zpracovávána softwarem externího dodavatele. Operační systém je předpokládán Windows XP, nebo novější. Uživatel může dále použít konektor pro měření analogového signálu z předzesilovačů pro použití měřicí jednotky bez osobního počítače.

## Annotation

This project describes developing of a system for vibration measurement. Goal of this project is develop and finalize low cost measurement system consist of a sensor, cable and measurement unit. Final device has sufficient frequency range and dynamic range of amplitude of measured signal. Importance is also accuracy of measured vibrations (from full scale): 5 % from frequency range (10 Hz – 1 kHz) and 10 % from frequency range (2 Hz – 10 Hz and 1 kHz – 2 kHz). This device is focused for industry use (defined by standard ISO 2954:2012) and for measurement of vibration for certification tests of devices installed on board of small aircrafts (defined by standard RTCA/DO-160C). For measurement is used piezoelectric accelerometer, connected with coaxial cable. Measured signal is precisely computed by software for personal computer. There is excepted environment MS Windows XP and newer. End user can also use embedded outputs of analog signal for simply measurement without computer.

## Použité veličiny

Pro veličinu bez udané jednotky platí její základní jednotka, jinak je jednotka uvedena ve hranatých závorkách.

### Elektrické veličiny

Základní elektrickou veličinou v soustavě SI je elektrický proud. Dalšími elektrickými zde použitými veličinami jsou elektrické napětí, elektrický odpor, elektrický náboj, intenzita elektrického pole, kapacita, permitivita, permeabilita, indukčnost a elektrická

impedance. Použité veličiny obrazuje Tabulka 0-1.

Tabulka 0-1 Přehled základních elektrických veličin

Veličina		Jednotka			Poznámka
Název	Symbol	Název	Značka	Rozměr	
elektrický proud	$I; i$	ampér	A	A	$i$ - pro střídavý proud
elektrické napětí	$U; u$	volt	V	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$	$u$ - pro střídavé napětí
intenzita elektrického pole	$E$	volt na metr	$\text{Vm}^{-1}$	$\text{m kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$	
elektrická indukce	$D$	coulomb na metr čtverečný	$\text{C m}^{-2}$	$\text{m}^{-2} \text{s A}$	
elektrický náboj	$Q$	coulomb	C	$\text{s A}$	$dQ = I dt$
kapacita	$C$	farad	F	$\frac{\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^4}{\text{A}^2}$	$C = Q/U$
permitivita	$\varepsilon$	farad na metr	$\text{F m}^{-1}$	$\frac{\text{m}^{-3} \text{kg}^{-1} \text{s}^4}{\text{A}^2}$	permitivita vakua $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
indukčnost	$L$	henry	H	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$	
permeabilita	$\mu$	henry na metr	$\text{H m}^{-1}$	$\text{m kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$	permeabilita vakua $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$
elektrický odpor	$R$	ohm	$\Omega$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$	$R \cdot I = U; R \cdot i = u$
elektrická impedance	$Z$	ohm	$\Omega$	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$	$Z \cdot i = u$
elektrická vodivost	$G$	siemens	S	$\frac{\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2}{\text{A}^2}$	$G \cdot U = I; G \cdot u = i$
elektrická admitance	$Y$	siemens	S	$\frac{\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3}{\text{A}^2}$	$Y \cdot u = i$
elektrický výkon	$P$	watt	W	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$	$P = R \cdot I^2 = U^2/R$

## Mechanické veličiny

V mechanice se pod pojmem mechanické veličiny rozumí veličiny popisující kmitání těles a soustav v pevné fázi, přehled mechanických veličin zobrazuje Tabulka 0-2.

Tabulka 0-2 – přehled základních mechanických veličin

Veličina		Jednotka			Poznámka
Název	Symbol	Název	Značka	Rozměr	
výchylka	$y$	metr	m	m	$y = \int v(t) dt$

Veličina		Jednotka			Poznámka
Název	Symbol	Název	Značka	Rozměr	
rychlost	$v$	metr za sekundu	$\text{m s}^{-1}$	$\text{m s}^{-1}$	$v = \frac{dy}{dt}$ $= \int a(t)dt$
zrychlení	$a$	metr za sekundu na druhou	$\text{m s}^{-2}$	$\text{m s}^{-2}$	$a = \frac{dv}{dt}$
gravitační zrychlení	$g$	metr za sekundu na druhou	$\text{m s}^{-2}$	$\text{m s}^{-2}$	normální tíhové zrychlení je $9,81 \text{ ms}^{-2}$
síla	$F$	Newton	N	$\text{m kg s}^{-2}$	$F = am$
hmotnost	$m$	Kilogram	kg	kg	
Tuhost	$s$	newton na metr	$\text{N m}^{-1}$	$\text{kg s}^{-2}$	$s = \frac{1}{c}$
poddajnost	$c$	metr na newton	$\text{m N}^{-1}$	$\text{kg}^{-1} \text{ s}^2$	$c = \frac{1}{s}$
mechanická rezistance (odpor)	$r$	mechanický ohm	$\Omega_m$	$\text{kg s}^{-1}$	
mechanická impedance	$Z_m$	mechanický ohm	$\Omega_m$	$\text{kg s}^{-1}$	$Z_m = \frac{F}{v}$
modul pružnosti	$E_m$	newton na metr čtverečný	$\text{N m}^{-2}$	$\text{m}^{-1} \text{ kg s}^{-2}$	
dynamická viskozita	$\mu$	newtonsekunda na metr čtverečný	$\text{N s m}^{-2}$	$\text{m}^{-1} \text{ kg s}^{-1}$	
práce	$A$	Joule	J	$\text{m}^2 \text{ kg s}^{-2}$	
výkon	$P$	Watt	W	$\text{m}^2 \text{ kg s}^{-3}$	

### Použité zkratky

Zkratka	Význam
AC	(alternating current), proud jehož směr se periodicky střídá
ADC	(analog-to-digital converter) analogově číslicový převodník
DAC	(digital-to-analog converter) číslicově analogový převodník
DC	(direct current) stejnosměrný proud
DPF	(down pass filter) filtr typu dolnofrekvenční propust
DPS	deska plošného spoje

EMC	(electromagnetic compatibility) elektromagnetická kompatibilita
FIR	(finite impulse response) diskrétní filtr s konečnou impulzní odezvou
FFT	(fast fourier transform) rychlá Fourierova transformace
HPF	(high pass filter) hornofrekvenční propust
IIR	(infinite impulse response) diskrétní filtr s nekonečnou impulzní odezvou
LED	(light-emitting diode) světlo vyzařující dioda
OA	(operational amplifier) Operační Zesilovač
P-P	(peak-peak) špička-špička hodnota signálu (rozkmit)
PC	(personal computer) osobní počítač
USB	(universal serial bus) Univerzální sériová sběrnice
RMS	(root mean square) efektivní hodnota signálu
SMD	(surface mount device) součástka určená pro povrchovou montáž
SMT	(surface mount technology) technologie pro povrchovou montáž součástek
VF	vysokofrekvenční

## 1 Požadavky dané normou ČSN ISO 2954:2012

Tato práce navazuje na Bakalářskou práci [5]. Při psaní této práce byla zavedena nová přepracovaná verze normy ČSN ISO 2954:2012, která nahrazuje normu ČSN ISO 2954 (35 6859) z února 1994. Z tohoto důvodu nelze přesně převzít některé závěry z předešlé práce. Tato kapitola shrnuje důležité požadavky dané touto normou.

Hlavní změny v citované normě se týkají pásmových filtrů, které jsou definovány jako normované Butterworthovy<sup>1</sup> filtry třetího řádu. Tím norma dovoluje použít jiných, než

---

<sup>1</sup>Filtr typu Butterworth se vyznačuje maximálně plochou charakteristikou modulu přenosu. Jde-li o řád filtru, je dán řádem charakteristického polynomu přenosu filtru, zde tedy 3.



v normě uvedených frekvenčních rozsahů měření vibrací strojních zařízení.

Dále jsou citovány vybrané požadavky na měřicí přístroj dle normy ČSN ISO 2954:2012. Tyto požadavky budou stěžejní pro návrh a konstrukci výsledného zařízení, pro výběr snímače vibračního zrychlení a pro návrh software zpracující měřená data.

## 1.1 Obecné požadavky

1. Přístroj alespoň indikuje, nebo zaznamenává efektivní hodnoty rychlosti vibrací, která je definovaná jako jednotka měření.
2. Referenční měřicí veličiny popisující vibrace nerotujících částí uvádí Tabulka 1-1.

Tabulka 1-1 Veličiny popisující vibrace nerotujících částí strojů

Měřicí veličina	Jednotka	Širokopásmová hodnota	Při diskretních frekvencích	
Výchylka	μm	efektivní	-	rozkmit
Rychlost vibrací	mm/s	efektivní	špičková amplituda	-
Zrychlení	m/s <sup>2</sup>	efektivní (maximální)	špičková amplituda	-

3. Integrovaní a derivování měřících veličin je přípustné.
4. Přístroj se stává: ze snímače vibrací; z indikační jednotky a ze systému napájecího zdroje.
5. Frekvenční rozsah měření přístroje pro měření mohutnosti vibrací<sup>2</sup> musí být od 10 Hz do 1000 Hz, ale přístroj může obsahovat další rozsahy.
6. Citlivost uvnitř frekvenčního rozsahu měření se nesmí odchylovat od referenční citlivosti při referenční frekvenci 79,4 Hz, nebo 1000 rad/s. Člen na omezení pásma je kombinací hornofrekvenční a dolnofrekvenční propusti tvořené Butterworthovými filtry 3. řádu. Tyto součásti jsou definovány takto:

- i. Hornofrekvenční propust

$$H_h(s) = \frac{1}{\left[1 + \frac{\omega_1}{Q_1 \times s} + \left(\frac{\omega_1}{Q_2 \times s}\right)^2 + \left(\frac{\omega_1}{s}\right)^3\right]} \quad (1-1)$$

- ii. Dolnofrekvenční propust

---

<sup>2</sup> Mohutnost vibrací je definována jako maximální efektivní hodnota rychlosti širokopásmových vibrací v definovaném frekvenčním spektru.

$$H_1(s) = \frac{1}{\left[1 + \frac{s}{Q_3 \times \omega_2} + \left(\frac{s}{Q_4 \times \omega_2}\right)^2 + \left(\frac{s}{\omega_2}\right)^3\right]} \quad (1-2)$$

Součin  $H_h(s) \times H_1(s)$  reprezentuje funkci omezení pásma.

Dle dané normy jsou parametry v rovnicích následující:

$$s = j2\pi f = j\omega \quad (1-3)$$

$$Q_1 = Q_3 = \frac{1}{2} \quad (1-4)$$

$$Q_2 = Q_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (1-5)$$

7. Frekvenční rozsah lze omezit, nebo rozšířit. Mezní frekvence se doporučují vybrat dle normy IEC 61260. Dále je doporučeno dodržet sklon na okrajích tak jako u filtrů stanovených normou ČSN 2954:2012.
8. Mohutnost vibrací se musí uvádět včetně frekvenčního rozsahu, na kterém byla zaznamenána (mezní frekvence odpovídající poklesu o 3dB), např.  $v_{ef}$  (od 2 Hz do 2000 Hz) = 7,5 mm/s.
9. Je-li k dispozici volba měřícího rozsahu, musí se volit takový rozsah, aby indikace nejnižší úrovně mohutnosti vibrací, která se má měřit, byla nejméně 10% z hodnoty při plném rozsahu stupnice. Musí být stanovena minimální a maximální úroveň rozsahu mohutnosti vibrací.
10. Nejistota měření včetně nejistoty kalibrace smí být maximálně  $\pm 10\%$  z indikované hodnoty v rozsahu od 10 % do 100 % hodnoty při plném rozsahu stupnice.

Nejistoty platí v celém rozsahu teploty, který je schválený pro snímač vibrací a indikační jednotku, a to pro všechny typy připevnění snímače vibrací, pro všechny délky propojovacího kabelu mezi snímačem vibrací a indikační jednotkou poskytnutých výrobcem a kolísání napájecího napětí  $\pm 10\%$ . Meze musí zahrnovat nejistotu kalibrace.

Kontrolovat se musí vždy jen jeden z výše uvedených parametrů.

11. Při kalibraci se snímač musí vybudit sinusovými vibracemi ve směru vibrací, který se neodchyluje od osy citlivosti snímače o více než  $\pm 5^\circ$ . Celkové harmonické zkreslení rychlosti budících vibrací nesmí překračovat 5%. Rychlost budících vibrací musí být známa s rozšířenou nejistotou (hodnota  $2\sigma$ ) lepší než 3 % uvnitř celého frekvenčního rozsahu měření.
12. Doporučuje se, aby referenční hodnota citlivosti byla nastavena při referenční

frekvenci a na vhodných hladinách vibrací v závislosti na dostupných rozsazích a při pokojové teplotě  $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ .

13. Musí být stanoveny požadavky na vstupní napájení soupravy snímače a indikační jednotky.

## 1.2 Požadavky na snímač vibrací a propojovací kabel

1. Snímač vibrací musí být seismického typu<sup>3</sup>, tj. musí měřit sledované vibrace vzhledem ke statické referenční soustavě určené provozním režimem snímače. Jeho výstup nesmí záviset na jeho orientaci vzhledem k zemské gravitaci. Pokud se použije snímač, jehož výstupní signál může být závislý na orientaci vzhledem k zemské gravitaci, musí se vysvětlit jakýkoliv vliv zemské gravitace na výstupní signál ze snímače.
2. Pokud se používá snímač vibrací, který je navržen pro uchycení k měřenému objektu, musí se připevnit pomocí pevného mechanického spojení (přilepit, připevnit svěrkou, přišroubovat, nebo připevnit pomocí magnetické podložky). Výsledná rezonance připevnění snímačů v případě použití akcelerometrů musí být vyšší, než horní sledovaná frekvence. Přídavné informace o připevnění lze nalézt v ISO 5348.
3. U všech typů připevnění musí být činitel příčné citlivosti<sup>4</sup> v celém frekvenčním rozsahu měření nižší než 0,1.
4. U snímačů s lineární amplitudovou charakteristikou musí být maximální hladina rychlosti vibrací alespoň trojnásobkem rychlosti vibrací při výchylce na plný rozsah stupnice ve směru citlivosti.
5. V návodu k použití musí být uvedena efektivní hmotnost snímače vibrací. Doporučuje se udržovat tuto hmotnost nižší, než 1/10 z vibrující hmotnosti měřeného objektu v blízkém okolí místa připevnění. Norma definuje metodu na zjištění příliš vysoké hmotnosti snímače vibrací – viz norma [4] ČSN ISO 2954:2012 bod 6.4.
6. Snímač musí ve všech směrech odolat vibracím, které jsou alespoň třikrát vyšší,

---

<sup>3</sup> Senzor vibrací je mechanická kmitavá soustava, složená ze seismické hmotnosti  $m_s$ , pružiny o tuhosti  $s_m$  a tlumení, které je úměrné rychlosti pohybu s konstantou úměrnosti  $r_m$  (viskózní tlumení). Soustava je popsána rovnováhou setrvačné, direktivní a tlumící síly. Rovnováha sil je vztažena k myšlenému bodu A, vůči kterému jsou měřeny kmity objektu  $y(t)$ . Více informací viz Bakalářská práce [5], nebo tituly [1] a [2].

<sup>4</sup> Činitel příčné citlivosti – je poměr mezi citlivostmi na vibrace od vedlejších os vůči hlavní měřící ose.

než stanovené maximální vstupní vibrace, aniž dojde ke změně jeho vlastností.

7. Ekvivalentní vstupní veličina vlastního rušení vyvolaného brumem a šumem a ekvivalentní vstupní veličina vnějšího rušení pro rušivá pole a buzení o velikosti stanovené níže nesmí ovlivnit měření o více než 5 % z indikované hodnoty v rozsahu 30 % do 100 % z hodnoty při plném rozsahu stupnice. Pokud indikovaná hodnota závisí na orientaci přístroje v poli, musí se použít nejnepříznivější hodnota.

Výrobce musí uvést výsledky zkoušek provedených za následujících podmínek rušení (minimální požadavky musí zahrnovat rozšířenou nejistotu):

- Snímač vibrací se musí vystavit homogennímu magnetickému poli o intenzitě vyšší než 100 A/m při 50 Hz a 60 Hz a musí se změřit intenzita pole před vložením snímače.
- Pokud má snímač elektricky vodivé spojení s měřeným objektem a indikátor je v linkovém provozu a má zemnicí svorky, musí se na zemnicí kontakt snímače zapojit zemnicí proud o efektivní hodnotě 100 mA při 50 Hz a 60 Hz a tento proud se musí vybit přes zemnicí svorku sestavy indikátoru.
- Snímač se musí vystavit homogennímu poli hluku šířeného vzduchem o hladině akustického tlaku (efektivní hodnota) vyšší než 100 dB vzhledem k referenční hodnotě 20  $\mu$ Pa v každém oktávovém pásmu, vytvářené generátorem náhodného šumu nebo přeladitelným tónovým generátorem v rozsahu od 32 Hz do 4 kHz.

Kromě toho se při úplném popisu snímače vibrací doporučuje postupovat podle ISO 8042.

Doporučuje se také zkontrolovat, zda snímač a indikátor vyhovují místním požadavkům na elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) a bezpečnost, které jsou často ekvivalentní s IEC 61000-6-2 a IEC 61010-1.

8. Musí se stanovit provozní rozsah teploty snímače vibrací a propojovacího kabelu, ve kterém nepřesahuje chyba měření mezní hodnoty stanovené v části: 1.1, bod 10.
9. Musí se stanovit přípustný rozsah teploty, které může být vystaven snímač vibrací a propojovací kabel, aniž dojde k jejich poškození.
10. Musí se stanovit maximální meze mimoprovozních vibrací a rázů v jakékoliv ose snímače, kterým může být snímač podroben, aniž dojde k jeho poškození.
11. Musí se stanovit maximální vlhkost, které je možné podrobit snímač a propojovací kabel. Pokud se má snímač provozovat v nepříznivém prostředí, musí se vyznačit schopnost snímače odolat tomuto prostředí. Pro výbušnou atmosféru se musí uvést

třída nebezpečnosti.

12. Musí se uvést citlivost na mechanické namáhání základny snímače.
13. Pokud jsou dostupné, doporučuje se uvést informace o předpokládané střední době mezi poruchami, očekávané životnosti a doporučené době mezi opakovanými kalibracemi snímače.
14. Je-li mezi snímačem vibrací a indikační jednotkou propojovací kabel, musí být jeho délka alespoň 1 m. Výrobce musí uvést, jaké přídatné prodlužovací kabely je možné použít, aniž se překročí tolerance uvedené v části: 1.1, bod 10. Doporučuje se zvážit požadavky na vstupní/výstupní impedance kabelu ke snímači a měřicího přístroje.

### 1.3 Požadavky na indikační jednotku

1. Je přípustné, aby indikační jednotku tvořil ručkový přístroj, grafický zapisovač, sloupcový indikátor, nebo digitální displej.
2. Rozšířená nejistota  $2\sigma$  při kalibraci přístroje nesmí překročit  $\pm 2\%$  z hodnoty při plném rozsahu stupnice.
3. Doporučuje se, aby z indikátoru indikační jednotky bylo možné snadno odečítat hodnoty směrem dolů k  $1/10$  z hodnoty při plném rozsahu stupnice. K identifikování měřené veličiny a jednotky musí být na indikační jednotce vyznačeno nebo na displeji zobrazeno například „ $v_{ef}$  v mm/s“.
4. Pro účel kontroly zesílení je povoleno použít zařízení, které umožňuje nastavení celkového zesílení indikační jednotky při specifické frekvenci (např. 50 Hz) s rozšířenou nejistotou  $2\sigma$  nižší než  $\pm 2\%$ .
5. Musí se stanovit provozní rozsah teploty a mimoprovozní rozsah teploty indikační jednotky.
6. Musí se stanovit maximální vlhkost, které je možné vystavit indikační jednotku a při které může setrvat v provozu v rámci specifikace.
7. Pokud se má indikační jednotka používat provozovat v nepříznivém prostředí, musí se vyznačit schopnost soupravy indikátoru odolat tomuto prostředí. Pro výbušnou atmosféru se musí uvést třída nebezpečnosti.

### 1.4 Návod k použití

Ke všem přístrojům pro měření mohutnosti vibrací musí být k dispozici v tištěné formě

nebo elektronické podobě návod k použití, ve kterém je citována mezinárodní norma ISO 2954:2012.

V návodu k použití musí být vyznačeno, jaké měřicí veličiny je přístroj schopen měřit a odpovídající frekvenční rozsah. Jakmile zabudované charakteristiky vyhovují všem požadavkům na měření uvedeným v mezinárodní normě, je dovoleno, aby výrobce označil svůj přístroj jako vhodný k měření mohutnosti vibrací v souladu s výše uvedenou mezinárodní normou, která se má uvést podle číselného označení a data vydání.

Pozn.: ISO 10816 (všechny části) uvádí požadavky na měření mohutnosti vibrací na nerotujících částech strojů.

V návodu k použití musí být vyznačena referenční frekvence pro kalibraci a ke zkušebním účelům.

## 1.5 Shoda se zadáním

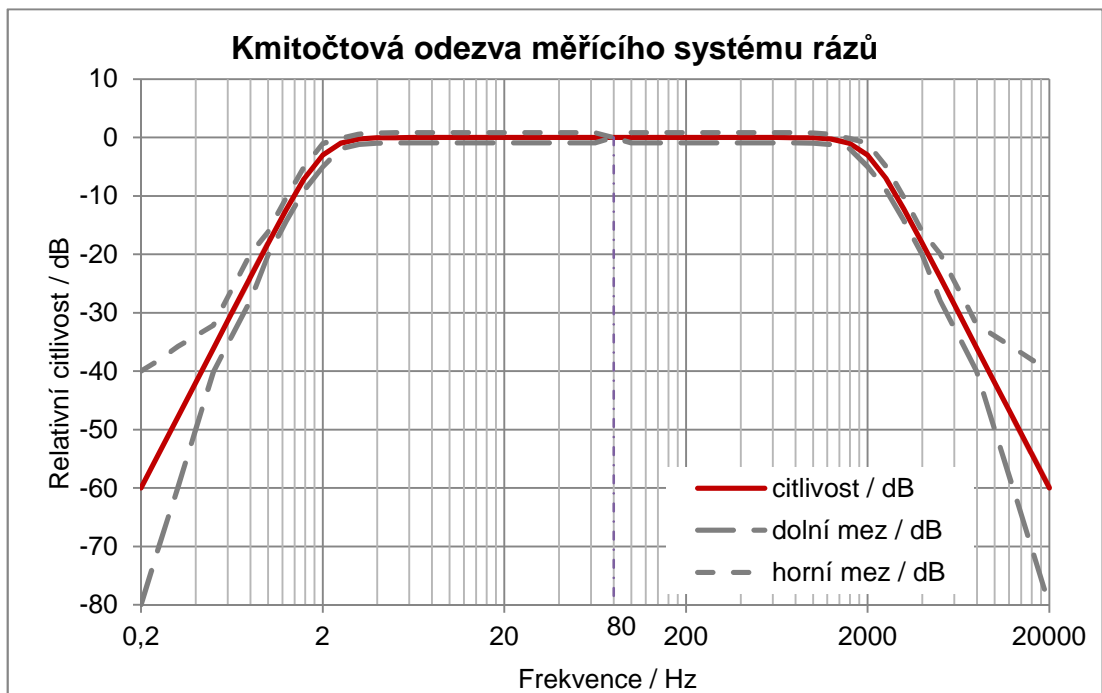
Aplikace normy ČSN 2954:2012, konkrétně požadavek na frekvenční rozsah zařízení dle požadavků zadání s odlišnými mezními frekvencemi<sup>5</sup> 2 Hz a 2 kHz definuje Obrázek 1-1. Výsledné hodnoty byly získány dosazením uvedených mezních frekvencí do vztahů 1-1 a 1-2.

Tabulka 1-2 Aplikace mezních frekvencí 2 Hz a 2000 Hz

frekvence / Hz	citlivost / dB	dolní mez / dB	horní mez / dB	citlivost / 1	dolní mez / 1	horní mez / 1
0,20	-60,00	-80,00	-40,00	0,00	0,00	0,01
0,40	-41,94	-49,94	-33,94	0,01	0,00	0,02
0,63	-30,06	-34,06	-26,06	0,03	0,02	0,05
0,79	-24,09	-28,09	-20,09	0,06	0,04	0,10
1,00	-18,13	-20,13	-16,13	0,12	0,10	0,16
1,26	-12,30	-14,30	-10,30	0,24	0,19	0,31
1,58	-7,09	-9,09	-5,09	0,44	0,35	0,56
2,00	-3,01	-5,01	-1,01	0,71	0,56	0,89
2,51	-0,99	-1,91	-0,16	0,89	0,80	0,98
3,16	-0,27	-1,19	0,56	0,97	0,87	1,07
3,98	-0,07	-0,99	0,76	0,99	0,89	1,09
5,01	-0,02	-0,94	0,81	1,00	0,90	1,10
6,31	0,00	-0,92	0,83	1,00	0,90	1,10

<sup>5</sup> Norma ČSN 2954:2012 má původní meze 10 Hz a 1000 Hz, originální graf a tabulka hodnot je dostupná v citované normě.

frekvence / Hz	citlivost / dB	dolní mez / dB	horní mez / dB	citlivost / 1	dolní mez / 1	horní mez / 1
63,10	0,00	-0,92	0,83	1,00	0,90	1,10
79,40	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
100	0,00	-0,92	0,83	1,00	0,90	1,10
631	0,00	-0,92	0,83	1,00	0,90	1,10
794	-0,02	-0,94	0,81	1,00	0,90	1,10
1000	-0,07	-0,99	0,76	0,99	0,89	1,09
1259	-0,26	-1,18	0,57	0,97	0,87	1,07
1585	-0,96	-1,88	-0,13	0,90	0,81	0,99
1995	-2,98	-4,98	-0,98	0,71	0,56	0,89
2512	-6,92	-8,92	-4,92	0,45	0,36	0,57
3162	-12,21	-14,21	-10,21	0,25	0,19	0,31
3981	-18,01	-20,01	-16,01	0,13	0,10	0,16
5012	-23,96	-27,96	-19,96	0,06	0,04	0,10
6310	-29,94	-33,94	-25,94	0,03	0,02	0,05
7934	-35,91	-39,91	-31,91	0,02	0,01	0,03
10000	-41,94	-49,94	-33,94	0,01	0,00	0,02
20000	-60,00	-80,00	-40,00	0,00	0,00	0,01



Obrázek 1-1 Jmenovité hodnoty relativní citlivosti a meze přípustných odchylek

## 2 Požadavky dané normou RTCA/DO-160C

Konečné zařízení bude určeno také pro měření vibrací na malých letadlech. Bude umožňovat měřit takové vibrace, jaké se dají předpokládat u malých letadel, ale v laboratorních podmínkách. Při vzniku této práce byl k dispozici český překlad dokumentu RTCA/DO-160C [9], dále jsou citovány jednotlivé stati týkající se měření rázů a vibrací.

### 2.1 Obecné informace

Dle této normy [9] jsou definované podmínky prostředí a zkušební postupy určené pouze pro stanovení výkonnosti palubního zařízení za těchto podmínek prostředí a nejsou určeny pro stanovení životnosti palubního zařízení, podrobeného těmto zkouškám.

#### 2.1.1 Pořadí prováděných zkoušek

Pokud není ve specifikaci zařízení (TP) stanoveno jinak, mohou se zkoušky provádět v libovolném pořadí, norma ale definuje výjimky, z nichž se pro zadání zmiňuje:

1. Vlhkostní zkouška nesmí být prováděna před teplotní a výškovou zkouškou a vibrační zkouškou.

Kombinování zkoušek je povoleno, ale není vyžadováno. Pokud je tak učiněno, je třeba uvést příslušné informace ve formuláři kvalifikace podmínek prostředí (viz dodatek A normy RTCA/DO-160C [9]).

#### 2.1.2 Okolní podmínky:

Pokud není stanoveno jinak, musí být všechny zkoušky prováděny při následujících okolních podmínkách:

1. Teplota: +15 až +35 stupňů Celsia
2. Relativní vlhkost: nesmí být větší než 85 %
3. Tlak okolního vzduchu: 84 až 107 kPa (ekvivalentní hodnota +5,000 ft až -1500 ft).

Jsou-li podmínky odlišné od výše uvedených, musí se zaznamenat.

Tolerance podmínek prostředí při zkouškách:

1. Teplota:  $\pm 3$  stupně Celsia
2. Výška:  $\pm 5$  % stanoveného tlaku



### 2.1.3 Zkušební zařízení

Všechna zkušební zařízení a měřicí zařízení použitá při provádění zkoušek, by měla být označena uvedením výrobce, modelu, výrobního čísla a data vypršení kalibrační lhůty a/nebo platného kalibračního období, kde je to vhodné. Veškeré kalibrování, pokud se provádí, musí odpovídat státním a/nebo mezinárodním normám.

## 2.2 Kapitola 7 Provozní rázy a havarijní bezpečnost

### 2.2.1 Účel zkoušky

Zkouška odolnosti vůči provozním rázům ověřuje, zda zařízení bude pokračovat ve funkci v souladu se specifikovanou výkonností zařízení poté, co bylo vystaveno působení rázů za normálního provozu letadla.

Havarijní zkouška odolnosti ověřuje, zda se určité zařízení neuvolní z jeho montážního upevnění nebo se neoddělí takovým způsobem, že by to bylo nebezpečné při nouzovém přistání.

### 2.2.2 Provozní rázy

Zkoušené zařízení musí být upevněné na rázovém stole pomocí zkoušecího přípravku a upevňovacího zařízení, které se použije při instalování v letadle. Montáž zařízení má obsahovat takové nekonstrukční spoje, které jsou normální součástí instalace. Snímač zrychlení pro měření nebo řízení vstupních rázových impulzů má být umístěn pokud možno co nejbliž u bodu upevnění zařízení. Po teplotní stabilizaci zařízení se udělí zkoušenému zařízení 3 rázy ve všech směrech s pulsusovou vlnou a s hodnotou vrcholového zrychlení 6 g. Celková doba trvání má být  $11 \pm 2$  ms s maximem zrychlení přibližně 5,5 ms. Zařízení má být rázově zkoušeno v definovaných orientacích (viz Norma RTCA/DO-160C [9]).

### 2.2.3 Havarijní bezpečnost

Provádějí se zkoušky impulzní a zkoušky s trvalým zatížením.

### 2.2.4 Impulzní zatížení

Zkoušené zařízení, nebo náhradní zatížení musí být upevněné na rázovém stole pomocí zkoušecího přípravku a upevňovacího zařízení, které se použije při instalování v letadle. Požadavky na impulzní zatížení je shodné jako kapitola: 2.2.2 Provozní rázy, s tím rozdílem, že vrcholové zrychlení je 15 g. Po aplikaci šesti rázů se připouští ohyb a zkrut. Nepřipouští se však žádné porušení upevňovacích prvků a zařízení nebo náhradní zatížení se nesmí oddělit.

### 2.2.5 Orientace zařízení v letadle – známé a pevné

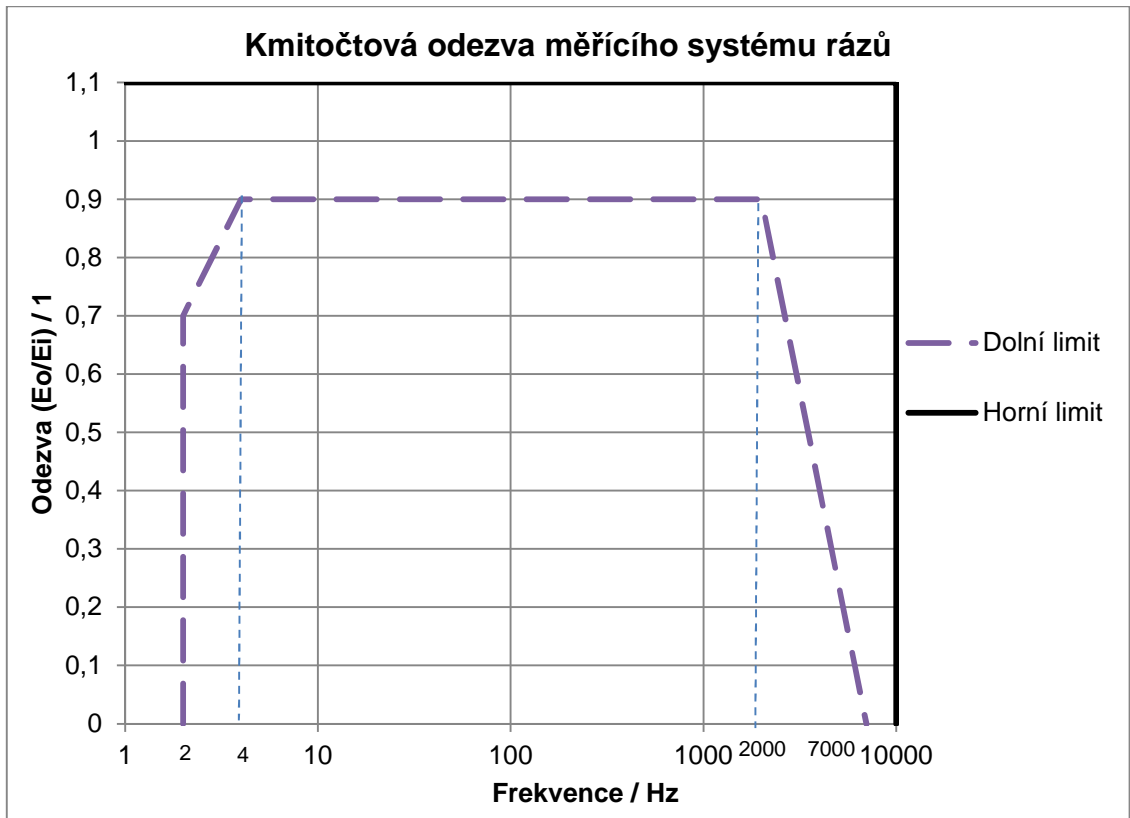
Směr zatížení	Zrychlení během zkoušek (g - minimum)
Vzhůru	2,7
Dolů	6,0
Dopředu	12,0
Dozadu	2,0
Do strany	2,0

### 2.2.6 Orientace zařízení v letadle – neznámé a nahodilé

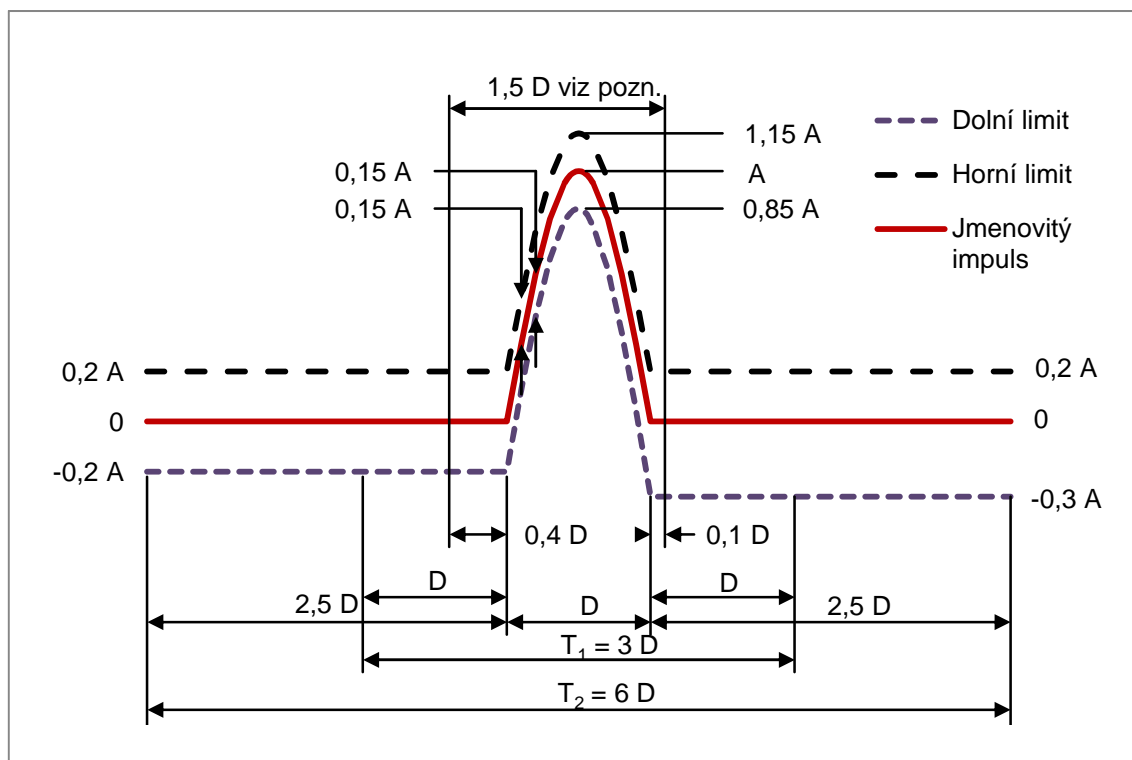
Směr zatížení	Zrychlení během zkoušek (g - minimum)
Všechny osy a oba směry	12

### 2.2.7 Požadavky na měřící zařízení

Na rázovém zkušebním zařízení je nutno použít určené zatížení, které by zaručilo, že zaznamenaný rázový impuls bude v mezích specifikovaných tolerancí, viz Obrázek 2-2. Přesnost systému pro měření zrychlení musí být  $\pm 10$  procent. Charakteristiky přístrojového vybavení pro demonstraci souladu a mezní hodnoty tolerance impulsu zobrazují Obrázek 2-1 a Obrázek 2-2. Ekvivalentní spektrum kmitočtové odezvy může být nahrazeno pulsínusovou vlnovkou.



Obrázek 2-1 Kmitočtová odezva měřicího systému rázů



Obrázek 2-2 Konfigurace půlsinusového rázu a meze tolerancí

Tabulka 2-1 Hodnoty pro provozní nebo havarijní bezpečnost

Zkouška, impuls	Vrcholová hodnota A [g]	Jmenovitá doba trvání D [ms]
provozní	6	11
havarijní	15	11

Poznámka:

Oscilogram má obsahovat dobu trvání  $T_1$  nebo  $T_2$  s impulzem umístěným přibližně uprostřed. Amplituda zrychlení ideálního půlsinusového impulzu je  $A$  a její doba trvání je  $D$ . Měřený akcelerační impuls má ležet uvnitř mezi vyznačených plnou čarou a měřená změna rychlosti má být v mezích  $V_1 \pm 0,1V_1$ , kde  $V_1$  je změna rychlosti ideálního impulzu, která se rovná  $2AD/\pi$ . Impedance pro určení rychlosti má být provedena od  $0,4 D$  před impulzem až do  $0,1 D$  za impulzem.

## 2.3 Kapitola 8 Vibrace

### 2.3.1 Účel zkoušky

Tyto zkoušky ověřují, zda zařízení splňuje příslušné výkonnostní normy, je-li vystaveno hladinám vibrací specifikovaným pro příslušnou kategorii.

Vibrační zkoušky se používají u všech druhů zařízení u všech druhů zařízení u všech typů letadel.

Vibrační zkoušky jsou dvojího druhu, standardní a robustní<sup>6</sup>. Standardní zkoušky se používají u všech druhů zařízení a typů letadel, avšak u proudových letadel se použije buď standardní zkouška, nebo robustní (dle specifikace zařízení).

Postup sinusových zkoušek se používá u všech druhů zařízení u všech typů letadel s výjimkou, že postupy náhodných zkoušek se používají pro zařízení umístěná na proudových letadlech. U proudových letadel je sinusová zkouška používaná jen pro zařízení umístěná u motorů a všude jinde se používají náhodné zkoušky.

### 2.3.2 Standardní vibrace

Standardní postup se používá pro všechny typy palubního zařízení u všech typů letadel, kdy je demonstrována výkonnost zařízení v normálním provozním prostředí.

---

<sup>6</sup> Tato práce je určena pro měření vibrací a rázů u malých letadel, malých letadel se týkají pouze standardní zkoušky. Zde byl text ponechán pro úplnost. Tabulky a grafy v této kapitole jsou přizpůsobeny požadavkům zadání.

### 2.3.3 Robustní vibrace

Robustní postup se používá u zařízení instalovaného na proudových letadlech, kdy je demonstrována jak výkonnost zařízení při standardních úrovních vibrací, tak i strukturální integrita při robustní úrovni vibrací. Potřeba provedení této zkoušky musí být uvedena v příslušné specifikaci zařízení.

### 2.3.4 Požadavky na vibrační zkoušky

U všech prováděných zkoušek vibračních zkoušek se požaduje následující:

1. Zkoušené zařízení se nainstaluje tak, aby vstupní vibrační pohyb byl paralelní s jednou ze tří hlavních ortogonálních os. Zkoušecí přípravky mají být co nejtužší a symetrické. Zařízení musí být k přípravku nebo k vibračnímu stolu připevněno pomocí prvků specifikovaných ve specifikaci zařízení.
2. Snímač zrychlení musí být připevněn co nejblíže u upevňovacích prvků zařízení pro každou osu zkoušky. Je-li pro regulaci úrovně zkoušky použito více snímačů zrychlení, musí se jako regulace úrovně zkoušky použít průměrná hodnota regulačních signálů snímačů zrychlení pro sinusové zkoušky, nebo průměrná hodnota výkonové spektrální hustoty zrychlení (The Acceleration Power Spectral Density – APSD) pro náhodné zkoušky.
3. Přesnost přístrojů pro měření sinusové akcelerace musí být  $\pm 10\%$  z rozsahu pro zrychlení a  $\pm 2\%$  pro frekvenci.
4. V případě, že požadavky na provedení zkoušek náhodných vibrací převyšují výkonové možnosti zkušebního vibračního systému, může být zkouška prováděna ve vymezených frekvenčních pásmech od 10 Hz do 500 Hz a 500 Hz až 2000 Hz.
5. Povolená hmotnostní odchylka – Pro zařízení o hmotnosti větší než 50 lb (22,68 Kg) je povolena redukce úrovně zkoušek pro frekvence nad 60 Hz následujícím způsobem:

Úrovně náhodných a sinusových zkoušek je možno snížit o 1 dB na každých 10 lb (4,54 kg) hmotnosti převyšující 50 lb (22,68 kg) až do maximálního snížení o 6 dB.
6. (Snížení o 6 dB bude mít za následek snížení úrovně APSD na  $\frac{1}{4}$  a sinusové úrovně na  $\frac{1}{2}$  původní úrovně hladiny).

## 2.3.5 Měření výkonové spektrální hustoty zrychlení

### 2.3.5.1 Požadavky na přesnost řídicího signálu

Výkonová spektrální hustota (APSD) zkušebního řídicího signálu se nesmí od požadované hodnoty odchylovat o více než +3,0 dB nebo -1,5 dB pod 500 Hz a  $\pm 3,0$  dB od 500 Hz do 2000 Hz.

Analyzátoři a řídicí systémy musí používat hodnotu součinu šířky pásma krát čas / bandwidth-time (BT) větší, nebo rovnou 50. Specifické charakteristiky analyzátoru nebo jejich ekvivalenty musí být následující:

### 2.3.5.2 Požadavky na analogový analyzátor

1. Spřažený kontinuální filtr; systém pro kmitočtovou korekci/ analýzu s šířkou pásma B menší nebo rovnou 50 Hz.
2. Systémy analýzy s rozmítáním kmitočtu/swept frequency analysis systems, mají následující charakteristiky:

a. Analyzátor s konstantní šířkou pásma

i. Šířky pásem filtru

$B = 10$  Hz, maximum od 10 Hz do 200 Hz

$B = 50$  Hz, maximum od 200 Hz do 2000 Hz

- ii. Čas průměrování analyzátoru =  $T = 2 \cdot R \cdot C = 1$  s minimálně, kde  $T$  = skutečný čas průměrování a  $R \cdot C$  = časová konstanta analyzátoru.
- iii. Velikost poměrné lineární rychlosti rozmítání analyzátoru =  $R = B/4RC$  nebo  $B^2/8$  Hz/s maximálně, podle toho, jaká z hodnot je menší.

b. Analyzátor s konstantně procentní šířkou pásma

- i. Šířka pásma filtru =  $P \cdot f_C =$  jedna třetina oktávy maximálně ( $0.23 f_C$  kde  $P$  = procento a  $f_C$  = střední frekvence analyzátoru).

- ii. Čas průměrování analyzátoru =  $T = 50/P \cdot f_C$  minimum

- iii. Logaritmičká rychlost rozmítání analyzátoru

$$= R = \frac{P \cdot f_C}{4RC} \text{ nebo } = R = \frac{(P \cdot f_C)^2}{8} \text{ Hz/s maximum, podle toho, která}$$

z hodnot je menší.

### 2.3.5.3 Požadavky na digitální analyzátor

Digitální systém analýzy spektrální hustoty výkonu využívající techniku analýzy diskrétní frekvence musí mít minimální rozlišitelnost frekvence 400 řádků (tj.  $f$  se rovná nebo je menší než 5 Hz). Součin šířka pásma krát čas se rovná počtu záznamů použitých pro jedno APSD (výkonová spektrální hustota zrychlení, tj. počet středních hodnot souboru dat musí být 50 nebo více, při měření APSD).

### 2.3.6 Zkouška standardních vibrací

Úrovně zkoušky standardních vibrací uvádí Tabulka 2-1 Hodnoty pro provozní nebo havarijní bezpečnost a zobrazují Obrázek 2-3 a Obrázek 2-4. Pro příslušné typy letadel jsou definovány úrovně sinusových a náhodných vibračních zkoušek. Požaduje se minimálně zkouška v délce jedné hodiny na osu vibrací.

V průběhu a na zakončení vibračních zkoušek stanovte soulad s příslušnými normami výkonnosti zařízení.

### 2.3.7 Postup sinusové zkoušky

Se zařízením v provozu se mění frekvence vibrací v příslušném rozmezí frekvencí logaritmickou rychlostí rozmítání nepřesahující 1,0 oktávu/minutu. Během počátečního rozmítání musí být identifikovány kritické frekvence. Kritické frekvence jsou definovány jako takové frekvence, u kterých:

1. rezonance mechanických vibrací vykazující vrcholové amplitudy zrychlení větší než je dvojnásobek vstupní amplitudy zrychlení, nebo
2. změna výkonnostních charakteristik nebo chování je znatelná, ať již jsou nebo nejsou překračovány normované výkonnosti.

Pokračuje se s vibracemi a provozem minimálně po dobu jedné hodiny a stanoví se soulad s příslušnými normami výkonnosti zařízení. Jakékoliv změny v kritických frekvencích, které nastanou během zkoušky je nutno zaznamenat do formuláře kvalifikace prostředí (viz dodatek A normy [9] RTCA/DO-160C).

V případě, že rozkmit použité vstupní vibrace přesáhne 0,5 mm, pak jakékoliv potíže v čtení zobrazovaného jevu zkoušeného předmětu nelze považovat za nevyhovění zkoušce.

3. Předchozí postup (Odstavec 8.5.1 a. normy [9] RTCA/DO-160C) se opakuje při zavedení vibračního pohybu ve zbývajících 2 hlavních ortogonálních osách zařízení.

### 2.3.8 Postup náhodné zkoušky

1. Se zařízením v provozu se zavede příslušná úroveň vibrací výkonové spektrální hustoty zrychlení (APSD) minimálně po dobu jedné hodiny na každou osu a stanoví se soulad s příslušnými normami výkonosti zařízení.

Na počátku a ke konci periody vibrací se provede analýza APSD akcelerační odezvy vibrací ve zvolených polohách zařízení. Změřené změny výkonnosti nebo vibračních rezonancí je nutno zaznamenat do formuláře kvalifikace prostředí (viz dodatek A normy RTCA/DO-160C [9]).

2. Předchozí postup (Odstavec 8.5.2 a. normy RTCA/DO-160C [9]) se opakuje při zavedení vibračního pohybu ve zbývajících 2 hlavních ortogonálních osách zařízení.

### 2.3.9 Shoda se zadáním

Dle zadání má být výsledné měřicí zařízení být schopné měřit vibrace (potažmo rázy) u malých letadel, tím je myšlena kategorie letadel:

Letadla s pevným křídlem a pístovými a turbovrtulovými motory:

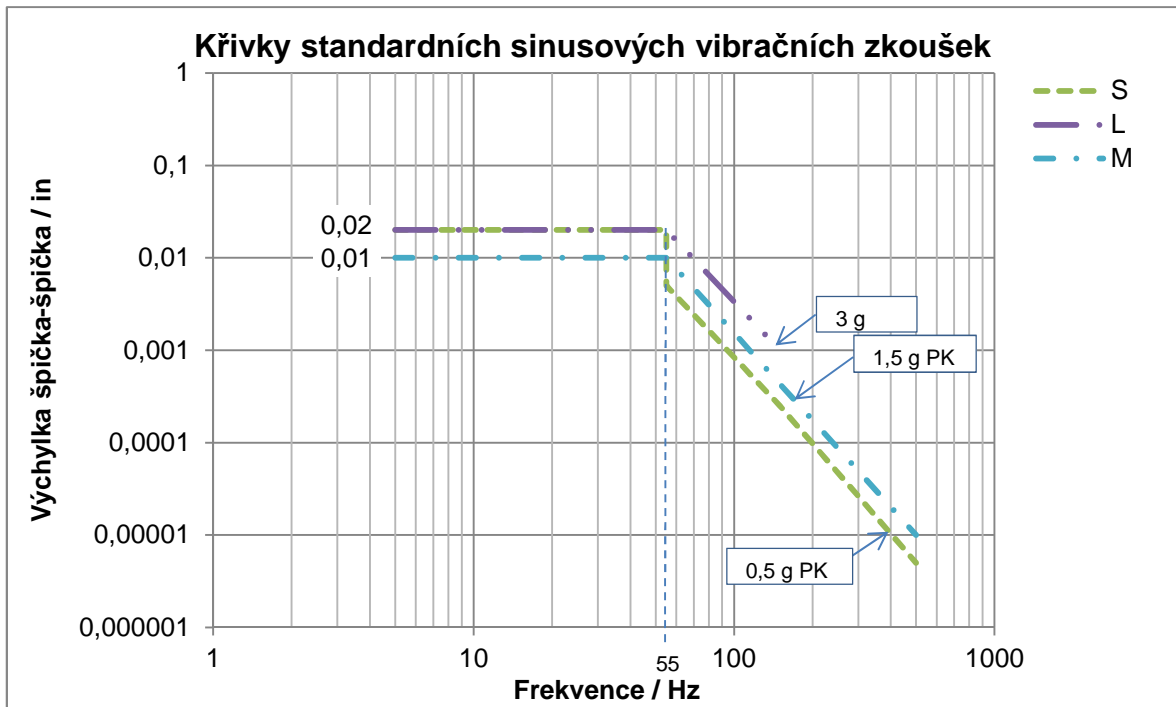
- a. vícemotorové pod 5700 kg
- b. jednomotorové pod 5700 kg

Tabulka 2-2 Kategorizace požadavků na zkoušky standardních vibrací dle typů letadel a rozmístění zařízení

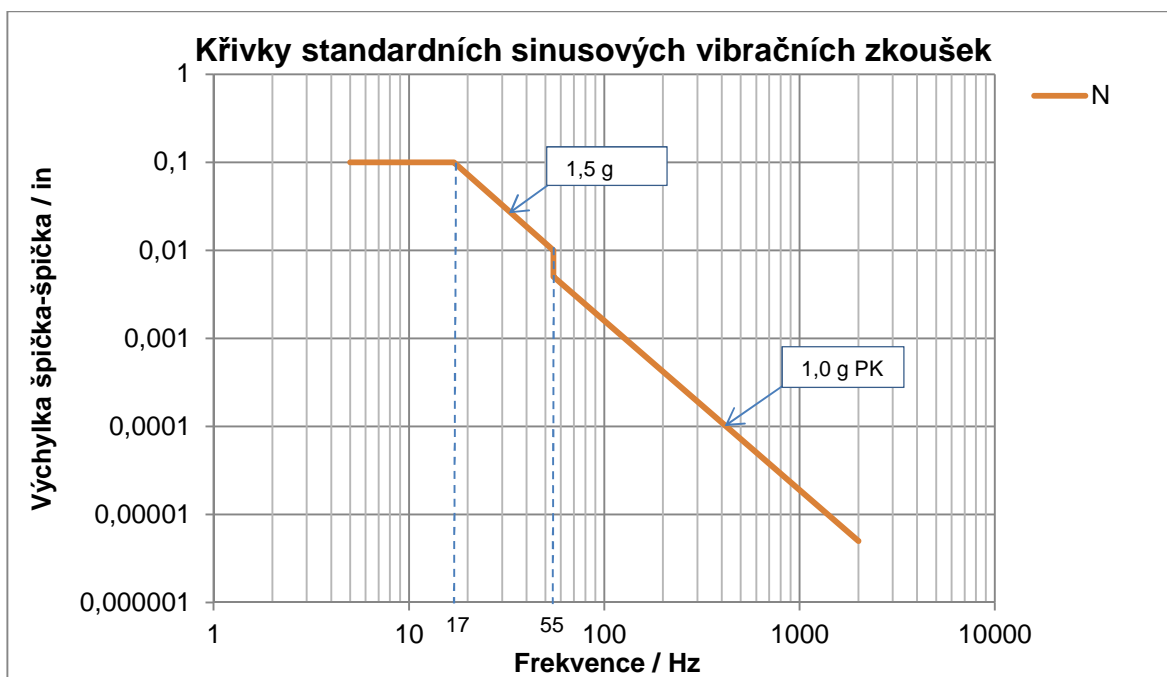
typ letadla	Křivka vibrační zkoušky pro zařízení nainstalované na:					
	trup	Přístrojový panel/konzola a přístrojová skříň				
		na tlumičích vibrací	bez tlumičů vibrací	motorová gondola a pylon motoru	motor a převodovka	křídlo, ocasní plochy, podvozkové šachty
Letadla s pevným křídlem a s pístovými a turbovrtulovými motory						
vícemotorové pod 5700 kg	M	S	M	L	L	L



typ letadla	Křivka vibrační zkoušky pro zařízení nainstalované na:					
	trup	Přístrojový panel/konzola a přístrojová skříň				
		na tlumičích vibrací	bez tlumičů vibrací	motorová gondola a pylon motoru	motor a převodovka	křídlo, ocasní plochy, podvozkové šachty
jednomotorové pod 5700 kg	M	S	M	N	L	N



Obrázek 2-3 Křivky standardních sinusových vibračních zkoušek pro zařízení nainstalované v letadlech s pevnými křídly a s pístovými nebo turbovrtulovými motory



Obrázek 2-4 Křivky standardních sinusových vibračních zkoušek pro zařízení nainstalované ve vrtulnicích

Pozn.: Byly ponechány původní anglické jednotky, protože tento graf byl z těchto jednotek odvozen.

## 2.4 Shrnutí

Obecné požadavky definují celkové nároky na zařízení. Tedy provozní teplotu, okolní tlak, maximální relativní vlhkost vzduchu a další.

Důležitý požadavek daný kapitolou 7 citované normy je kladený na snímač vibrací, ten musí být schopen měřit impuls s vrcholovým zrychlením 15 g. Dále jsou dány tolerance frekvenční charakteristiky přístrojového vybavení, viz Obrázek 2-1 a je definován také průběh testovacího impulsu, viz Obrázek 2-2 a Tabulka 2-1.

Kapitola 8 citované normy definuje požadavky na digitální, potažmo analogový analyzátor. Pro vibrační zkoušky u malých letadel byly vybrány úrovně pro tyto zkoušky. Tyto zkoušky definují: Tabulka 2-2, Obrázek 2-3 a Obrázek 2-4. Tyto požadavky budou případně zohledněny při návrhu software. Norma předepisuje nutnost lokalizace rezonančních frekvencí, tato operace bude také jednou z funkcí obslužného software.

## 3 Výběr vhodného snímače vibračního zrychlení

Vhodný snímač vibračního zrychlení je dán předchozími požadavky, z uvedených v předchozích kapitolách zdůrazňuji především tyto:

## 3.1 Obecné požadavky

1. Rezonanční frekvence musí být pokud možno co nejvyšší. Minimálně musí být taková, aby bylo zaručeno, že ve frekvenčním spektru od 2 Hz do 2 kHz bude zaručena relativní citlivost, kterou definuje Obrázek 1-1 případně Tabulka 1-2. V tomto případě bude postačující minimální rezonanční frekvence 30 kHz, takto stanovená rezonanční frekvence zaručí použití snímače vibrací ve frekvenčním rozsahu až do 10 kHz, viz publikace [2], Fig. 2.9. str. 27.
2. Váha a rozměry snímače by měli být co možná nejmenší.
3. Snímač by měl být cenově dostupný, ale zároveň kvalitní.
4. Vlastní snímač vibrací by měl být bez zabudovaného zesilovače, pro širší teplotní rozsah použití a celkově lepší odolnosti.

### 3.1.1 Z požadavků normy ČSN 2954:2012:

1. Snímač vibrací musí být seismického typu, tj. musí měřit sledované vibrace vzhledem ke statické referenční soustavě určené provozním režimem snímače. Jeho výstup nesmí záviset na jeho orientaci vzhledem k zemské gravitaci. Pokud se použije snímač, jehož výstupní signál může být závislý na orientaci vzhledem k zemské gravitaci, musí se vysvětlit jakýkoliv vliv zemské gravitace na výstupní signál ze snímače.
2. Snímač musí ve všech směrech odolat vibracím, které jsou alespoň třikrát vyšší, než stanovené maximální vstupní vibrace, aniž dojde ke změně jeho vlastností.

### 3.1.2 Z požadavků normy RTCA/DO-160C

1. Dle Kapitoly 7 citované normy musí být snímač vibrací schopen měřit impulz s vrcholovým zrychlením 15 g.

## 3.2 Přehled dostupných typů

Výběr snímačů byl proveden s ohledem na předchozí požadavky. Přehled byl zpracován do kategorií podle výrobců. Tabulky byly převzaty z vyhledávačů výrobců v originálním znění.

### 3.2.1 Snímače vibračního zrychlení od firmy Brüel & Kjær

Snímače vibrací od dánské firmy Brüel & Kjær zobrazuje Tabulka 3-1. Z vybraných snímačů se jako nejvhodnější pro univerzální použití se jeví typ 4374, bohužel je určený k nalepení na měřený objekt. Jako další vhodný typ lze volit 4384, díky nízké hladině

residuálního šumu<sup>7</sup>, nebo 4393 pro velmi nízkou váhu. Oba senzory pak lze připojit standardním koaxiálním konektorem 10-32 UNF.

Tabulka 3-1 Přehled vhodných snímačů vibrací od firmy Brüel & Kjær

	 4374 Product Data	 4375 Product Data	 4384 Product Data	 4391 Product Data	 4393 Product Data	 4500A Product Data	 4501A Product Data	 4505A Product Data
Frequency Range	1 - 26000	0.1 - 16500	0.1 - 12600	0.1 - 12000	0.1 - 16500	1 - 16600	1 - 16600	1 - 12000
Temperature Range	-74 - 250	-74 - 250	-74 - 250	-60 - 180	-74 - 250	-54 - 175	-54 - 175	-54 - 230
Weight	0.65	2.4	11	16	2.4	4.1	4	4.9
Sensitivity	1.5 pC/g	3.1 pC/g	10 pC/g	10 pC/g	3.1 pC/g	3 pC/g	3 pC/g	3 pC/g
Residual Noise Level	1.85	0.52	0.24	0.23	0.52	0.76	0.76	0.76
Maximum Operational Level	5000	5000	6000	2000	5000	3000	3000	3000
Connector Electrical	10-32 UNF	10-32 UNF	10-32 UNF	TNC	M3	10-32 UNF	10-32 UNF	10-32 UNF
Mounting	Adhesive	Stud	Stud	Stud	Stud	Clip	Clip	Stud
Accessory Included	IntegralAO 0038	IntegralAO 0038	AO 0038	AO 0231	AO 0283	OptionalAO 0338	OptionalAO 0338	OptionalAO 0038
Clip Stud Screw included	None	YQ 2003	YQ 2960	YQ 2960	YQ 2003	Mounting Clip	Mounting Clip	OptionalUA 0130
Output	Charge-PE	Charge-PE	Charge-PE	Charge-PE	Charge-PE	Charge-PE	Charge-PE	Charge-PE
Unigain	No	No	Yes	Yes	Yes	No	No	No
Triaxial	No	No	No	No	No	No	No	No
TEDS	No	No	No	No	No	No	No	No
Applications	Miniature	Miniature	General Purpose	Industrial	Miniature	General Purpose MiniatureModal	General Purpose MiniatureModal	Miniature Human Vibration
Unit	pC	pC	pC	pC	pC	pC	pC	pC
Resonance Frequency	85	55	42	40	55	50	50	50
Maximum Shock Level	25000	25000	20000	2000	25000			

Tabulka je dostupná z:







<http://www.bksv.com/products/compare.aspx?list=4374:4375:4384:4391:4393:4500A:4501A:4505A:&p={BB8F0DBC-A7A8-4AB7-89E6-49758EF6D816}>

### 3.2.2 Snímače vibrací firmy Endevco Meggitt







Firma původem z USA, Endevco Meggitt nabízí velice širokou paletu snímačů vibrací a dalších snímačů pro různé aplikace. Firma mimo jiné vyrábí zesilovače a ostatní měřicí elektroniku. Pro tuto aplikaci od zmíněné firmy je nejvhodnější snímač vibrací typu 2224C, viz Tabulka 3-2. Další uvedené snímače vibrací lze použít také.

<sup>7</sup> Hladina residuálního šumu neboli zbytkový šum, je celkový šum, od kterého se odečte specifický šum, který má známý původ.

Tabulka 3-2 Přehled snímačů vibrací firmy Endevco Meggitt

Model		7221A	2221D	2221F	2224C	2225	2222D
							
Sensitivity	pC/g or mV/g	10	17	10	--	0.75	1.1
Weight	grams	10	12	11	16	13	1
Sinusoid Limit	g	1000	1000	1000	1000	10000	1000
Shock Limit	g	5000	5000	3000	2000	20000	10000
Frequency Response	Hz (+/- 1dB)	0.1 to 12000	0.1 to 10000	0.1 to 12000	0.1 to 10000	1 to 10000	0.1 to 12000
Temp	°C	-55 to 204	-55 to 177	-55 to 260	-55 to 177	-55 to 177	-55 to 175
Hermetic Seal		Yes	No	Yes	No	No	Yes
Mounting		Thread	Thread	Thread	Thread	Thread	Adhesive

Tabulka 3-3 Přehled snímačů vibrací firmy Endevco Meggitt

Model		2225M5A	2273A	7201-10	7240C	2222C	2220E
							
Sensitivity	pC/g or mV/g	0.025	3	10	3	1.4	3.1
Weight	grams	13	25	18	41490	0.5	41277
Sinusoid Limit	g	100000	1000	2000	1000	1000	1000
Shock Limit	g	100000	10000	20000	5000	10000	5000
Frequency Response	Hz (+/- 1dB)	1 to 10000	1 to 10000	1 to 15000	1 to 20000	1 to 10000	1 to 12000
Temp	°C	-55 to 177	-184 to 400	-73 to 260	-55 to 260	-73 to 177	-55 to 260
Hermetic Seal		No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
Mounting		Thread	Thread	Thread	Thread	Adhesive	Screw

Citace k tabulkám

[https://www.endevco.com/?search-class=DB\\_CustomSearch\\_Widget-db\\_customsearch\\_widget&widget\\_number=preset-1&active-1=1&all-2=Products&cs-all-0=Piezoelectric+Accelerometers&search=Search](https://www.endevco.com/?search-class=DB_CustomSearch_Widget-db_customsearch_widget&widget_number=preset-1&active-1=1&all-2=Products&cs-all-0=Piezoelectric+Accelerometers&search=Search)




### 3.2.3 Snímače vibrací firmy Metra Mess- und Frequenztechnik

Německá firma MMF, se zastoupením pro Českou republiku firmou DEWETRON Praha, spol. s.r.o. nabízí několik vhodných typů, viz Tabulka 3-4 a Tabulka 3-5. Pro tuto aplikaci se nejlépe hodí snímače vibrací, které zobrazuje Tabulka 3-4, zvláště pak typ KS93.

Citace:

[http://www.mmf.de/standard\\_accelerometers.htm](http://www.mmf.de/standard_accelerometers.htm)[http://www.mmf.de/miniature\\_accelerometers.htm](http://www.mmf.de/miniature_accelerometers.htm)

Tabulka 3-4 Přehled snímačů vibrací firmy MMF

model		KS56	KS57	KS93
				
<b>Output</b>		Charge	Charge	Charge
<b>Sensitivity</b>	pC/g	18	18	5
<b>Weight</b>	grams	23	23	2.7
<b>Measuring range</b>	g	±4000	±4000	±6000
<b>Linear frequency range (±3 dB)</b>	Hz	17000	17000	25000
<b>Temperature range</b>	c	-30 .. 250	-30 .. 250	-20 .. 150
<b>Socket</b>		UNF 10-32, axial	UNF 10-32, radial	M3 socket, radial

Tabulka 3-5 Přehled snímačů vibrací firmy MMF

model		KD37	KD38	KD41	KD42
					
<b>Output</b>		Charge	Charge	Charge	Charge
<b>Sensitivity</b>	pC/g	60	60	100	100
<b>Weight</b>	grams	45	45	60	65
<b>Measuring range</b>	g	5000/-1000	5000/-1000	1000/-300	1000/-300
<b>Linear frequency range (±3 dB)</b>	Hz	15000	15000	11000	11000
<b>Temperature range</b>	c	-35 .. 150	-35 .. 150	-35 .. 150	-35 .. 150
<b>Socket</b>		UNF 10-32, radial	UNF 10-32, axial	UNF 10-32, radial	UNF 10-32, axial

### 3.2.4 Snímače vibrací firmy Noliac

Dánská firma Noliac, vyrábějící širokou paletu snímačů, měničů a zesilovačů nabízí pro tuto aplikaci vhodné snímače vibrací, které zobrazuje Tabulka 3-6. Typy MH118 a MH119 jsou pro tuto aplikaci velmi vhodné.

Tabulka 3-6 Přehled snímačů vibrací firmy Noliac

Parameter <sup>1</sup>	Unit	MH118	MH119	MH128	MH129
Accelerometer type	-	piezoelectric	piezoelectric	piezoelectric	piezoelectric
Output	-	charge/voltage	charge/voltage	charge/voltage	charge/voltage
Design	-	Ring Shear®	Ring Shear®	Ring Shear®	Ring Shear®
Charge sensitivity	pC/ms <sup>-2</sup>	1	1	3.16	3.16
Capacity	pF	400	400	400	400
Mass	g	12	15	21	25
Transverse sensitivity (max.)	%	2	2	2	2
Resonance frequency (mounted 180g)	kHz	32	32	25	25
Max. shock acceleration	kms <sup>-2</sup>	40	40	20	20
Min. leak resistance (at room temp.)	<b>G</b>	10	10	10	10
Magnetic sensitivity	ms <sup>-2</sup> /T	1.2	1.2	2	2
Temperature transient sensitivity <sup>2</sup>	ms <sup>-2</sup> /K	0.25	0.25	0.2	0.2
Temperature range	C	-40 to 250	-40 to 250	-40 to 250	-40 to 250
Material	-	AISI 304	AISI 304	AISI 304	AISI 304
Sensing element	-	piezoelectric	piezoelectric	piezoelectric	piezoelectric
Seismic mass	g	3.3	3.3	10	10
Centre of seismic mass gravity <sup>3</sup>	mm	6	12	8.5	14
Connector	-	coaxial 10-32 UNF	coaxial 10-32 UNF	coaxial 10-32 UNF	coaxial 10-32 UNF
Outlet	-	axial	radial	axial	radial
Mounting thread	-	M5	M5	M5	M5

**Dimensions:**  
(not in scale)

<sup>1</sup> Typical parameters obtained in accordance with relevant parts of ISO 5347 and ISO 16063 standards.

<sup>2</sup> LFF (low frequency filter) = 3 Hz

<sup>3</sup> From mounting surface at central axis.

Citace: [http://www.noliac.com/High\\_temperature\\_accelerometers-8081.aspx](http://www.noliac.com/High_temperature_accelerometers-8081.aspx)

### 3.3 Konečný výběr

Vhodné snímače jsou vybrány od firmy Brüel & Kjær typy 4384 a 4393, od firmy Endevco Meggitt je to typ 2224C, od firmy MMF je zvolen typ KS93 a od firmy Noliac jsou to typy MH118 a MH119. Pro konečný výběr bude přihlédnuto k dostupnosti snímače vibrací, jelikož kromě typu KS93 se od sebe vybrané snímače v konečném měřítku příliš neliší.

## 4 Konkurenční produkty a přehled možných řešení

Zde je vybráno několik možných konkurenčních produktů. Nicméně některé uvedené přístroje nejsou úplně přímými konkurenty vyvíjeného produktu. Tabulky s parametry přístrojů a obrázky přístrojů byly převzaty z webových stránek prodejců, respektive výrobců zařízení.

### 4.1 Přehled konkurenčních produktů a jejich parametry

#### 4.1.1 Přístroje firmy Brüel & Kjær

Zde se jedná o přístroj umožňující plné řízení vibračních testů. Nižší varianta, která je zde uvedena obsahuje 2 nebo 4 vstupní kanály pro měření vibrací a 1 výstupní kanál pro řízení vibrací. Přístroje obsahují dvojité, paralelní 24bitové ADC a DSP technologie s LAN rozhraním, frekvenční rozsah je od stejnosměrné složky do 46 kHz. Vstupní dynamický rozsah obou typů je 130 dB a vyznačují se velmi rychlou zpětnovazební smyčkou. Tabulky se specifikací byly převzaty z webových stránek výrobce.



Obrázek 4-1 Řídící jednotka B&K, typ 7541



Tabulka 4-1 Vlastnosti vstupních kanálů řídicí jednotky B&amp;K typu 7541 a typu 7542

## Specifications – Input Channels

	Type 7541	Type 7542
Input Channels	2 or 4	4, 6 or 8
Input Connectors	4 × BNC	8 × BNC
Frequency Range	DC to 46 kHz with 54 cutoff frequencies	
A/D Conversion	2 × 24 bit	
Data Transfer	32 bit	
Input Voltage Range	±20 V <sub>peak</sub>	
Input Signal Coupling	<i>Differential:</i> Signal ground is "floating" (500 kΩ re: chassis) <i>Single-ended:</i> Signal ground is connected to chassis ("grounded")	
Input Impedance	<i>Differential:</i> 1 MΩ <i>Single-ended:</i> 500 kΩ	
Absolute Maximum Input	±40 V <sub>peak</sub> without damage	
High-pass Filters	<i>AC Coupling:</i> Analog high-pass filters, -3 dB at 0.3 Hz and -0.1 dB at 0.7 Hz Digital high-pass filters, user programmable	
Absolute Amplitude Precision (1 kHz, 1 V <sub>input</sub> )	0.5% FS	
Spurious-free Dynamic Range re Full-scale Input (Input terminated by 50 Ω or less) Spurious-free Dynamic Range is defined as the ratio of the rms full-scale amplitude to the rms value of the largest spurious spectral component (non-harmonic))	130 dB typical	
Harmonic Distortion (All harmonics plus noise)	-100 dBfs (DC to 1 kHz) typical	
Crosstalk (Between any two channels of a module)	Less than -100 dB typical	
Channel-to-Channel Match (10 V <sub>peak</sub> input range)	<i>Maximum Gain Difference:</i> 0.1 dB typical <i>Maximum Phase Difference:</i> < ±1.0 degree, up to 20 kHz	
Common Mode Rejection (in 10 V <sub>peak</sub> input range)	>90 dB typical	
Anti-aliasing Filter (At least 90 dB attenuation of those frequencies which can cause aliasing)	<i>Filter Type:</i> 3rd order Butterworth <i>-3 dB at Slope:</i> 47 kHz, -18 dB/octave	
Supply for DeltaTron/ICP®/CCLD	4 to 5 mA from 21 V source	
Charge Conditioning	10000 pC and 49000 pC with two stages	
Analog Special Functions	<i>Analog Self-test:</i> Functional check <i>Transducers:</i> Supports IEEE 1451.4-capable transducers with standardised TEDS (Type 7542 only: up to 30 m cable length) <i>Versions and Templates Supported:</i> Contact Brüel & Kjær for a complete list	
Fault Detection	<i>CCLD Fault:</i> Detection of cable break or short-circuit + detection of CCLD transducer working point fault	

Tabulka 4-2 Vlastnosti řídicí jednotky B&amp;K, typu 7541 a typu 7542

		Typ 7541	Typ 7542
Vstupní kanály		2 nebo 4	4,6,8 až 64 v sestavě 8 jedn.
Výstupní kanály		1	2
Připojení vstupů	AC	ano	ano
	DC	ano	ano
	CCLD	ano	ano
	Charge	ne	ano
	TEDS	ne	ano
Digitální vstup/výstup		4/4	8/8
Analog. kontrolní výstup		ne	8 vstupů / 2 výstupy
LCD display		ne	ano
Samostatný chod (bez PC)		ne	ano
Zálohovací baterie		ne	ano
Vnitřní paměť		4 GB	4 GB

Citace:

<http://mereni-a-analyza-signalu-hluku-a-vibraci.spectris.cz/produkty/vibracni-zkouseni-a-testovani/ridici-systemy/>

<http://www.bksv.com/doc/bu3083.pdf>

#### 4.1.2 Přístroj firmy Voltcraft

Přístroj VBM-100 slouží k mechanickému měření strojů a zařízení. Jedná se o ruční měřicí přístroj, který se dodává včetně snímače vibrací a obsahuje integrovanou měřicí ústřednu. Dle slov prodejce je z měření vibrací možno usuzovat na znaky stavu zařízení, jako je synchronní chod, poruchy vyrovnaní příp. uvolněné díly. Tento měřicí přístroj usnadňuje údržbu a provoz. Technické parametry uvádí Tabulka 4-3.



Obrázek 4-2 Přístroj Voltcraft, typ VBM-100

Tabulka 4-3 Technické parametry přístroje Voltcraft, typ VBM-100

<b>Technické parametry</b>	
<b>Rozměry</b>	(D x Š x V) 200 x 68 x 30 mm
<b>Kalibrovatelné podle</b>	-
<b>Další technické parametry</b>	Rozsah měření zrychlení: 0,5 až 199 m/s <sup>2</sup> ; 0,05 až 20,39 G; 2 až 656 ft/s <sup>2</sup> Rozsah měření přesahu vibrací: 0,001 až 1,999 mm; 0,001 až 0,078 inch.
<b>Rozsah měření</b>	0,5 až 199,9 mm/s; 0,05 až 19,9 cm/s; 0,02 až 7,87 palců/s km/h
<b>Základní přesnost</b>	±5 %
<b>Frekvence měření</b>	10 Hz až 1 kHz
<b>Napájení</b>	Baterie 9 V
<b>Hmotnost</b>	350 g

Citace:

<http://www.e-voltcraft.cz/pristroj-k-mereni-vibraci-vbm-100.k101368>

#### 4.1.3 Přístroj firmy Aura a.s.



Obrázek 4-3 Přístroj firmy Aura a.s., typ MV-5 (MV-5L)

Přístroj MV-5 nebo MV-5L jsou ruční přenosné měřicí přístroje určené pro měření vibrací v průmyslu. Měřená veličina je zrychlení, rychlost nebo výchylka vibrací. Speciální varianta přístroje L je určena také ke sledování stavu ložisek pomocí zrychlení na vyšších frekvencích. Přístroj měří efektivní (True RMS) a špičkové hodnoty vibrací, orientačně také frekvenci. Disponuje nastavitelnou šířkou frekvenčního pásma od 1 Hz do 10 kHz,

(varianta L od 3 Hz do 10 kHz). Umožňuje uložení naměřených hodnot do paměti přístroje, je napájen z 9 V baterie a umožňuje komunikaci přes USB-2.0 s počítačem - přenos hodnot, archivace hodnot, pochůzkové měření. Technické parametry přístrojů uvádí Tabulka 4-5. Přístroj se dodává se snímačem vibrací, viz Tabulka 4-5.

Tabulka 4-4 Technické údaje přístrojů firmy Aura a.s., typ MV-5 a MV-5L

<b>Technické údaje</b>		
<b>Snímač</b>		akcelerometr SV128B, SV162
parametry snímače		viz kalibrační list akcelerometru
<b>Měřicí přístroj</b>		MV-5, MV-5L (* - údaj platí jen pro MV-5)
<b>Frekvenční rozsahy</b>	Hz	1*, 3, 10, 30 ...100, 1000, 10 000
	Hz	10...1000 (podle ČSN ISO 2954)
<b>Měřicí rozsahy</b>		
zrychlení a	m/s <sup>2</sup>	1.99, 19.9, 199
rychlost v	mm/s	19.9, 199
výchylka s	µm	199, 1990
frekvence při a, v, s	Hz	1...1990
<b>Detektory</b>		efektivní hodnota, špička-špička, frekvence
<b>Měření stavu ložisek (jen MV-5L)</b>	m/s <sup>2</sup>	1.99, 19.9, 199 (300Hz – 10kHz)
<b>Chyba zobrazeného údaje</b>		5% z měřicího rozsahu +/- 1digit
<b>Paměť pro naměřené hodnoty</b>		192 měření
<b>Napájení</b>		9V akumulátor nebo destičková baterie 9V
rozsah napájecího napětí	V	7,5...12
příkon	mW	typ. 90, max. 200 s podsvitem displeje
doba provozu	h	cca. 8
doba nabíjení	h	10 ... 12
<b>Rozměry</b>		
měřicí přístroj	mm	175 x 75 x 35
pouzdro soupravy	mm	207 x 160 x 50
<b>Hmotnost soupravy</b>	kg	0,9

Tabulka 4-5 Technické údaje přístrojů firmy Aura a.s., typ MV-5 a MV-5L

<b>Pracovní podmínky soupravy MV-5, MV-5L</b>		
Prostředí		normální, bez agresivních par
Referenční teplota	°C	22
Pracovní teploty - přístroje / snímače	°C	+5 až +40 / - 25 až +125
Referenční vlhkost	%	10 až 80
Tlak vzduchu	kPa	86 až 106
Pracovní poloha přístroje a snímače		libovolná

Citace: [http://www.auranet.cz/eshop/index.php?route=product/product&product\\_id=53](http://www.auranet.cz/eshop/index.php?route=product/product&product_id=53)

#### 4.1.4 Přístroje firmy Lutron

Dle prodejce je přístroj VB-8200 přenosný měřicí přístroj s odděleným profesionálním vibračním senzorem (dodávaný včetně). Disponuje pamětí pro aktuální, min, max. a špičkovou hodnotu a izolovaným výstupem na RS 232, software pro záznam a vyvolání dat lze dokoupit. Zobrazení je volitelné jak okamžitá hodnota rychlosti ve dvou rozsazích nebo zrychlení též ve dvou rozsazích. Technické parametry přístroje zobrazuje



Obrázek 4-4 Přístroj firmy Lutron, typ VB-8200

Tabulka 4-6 Technické parametry přístroje Lutron, typ VB-8200

<b>Frekvenční rozsah</b>	10 Hz až 1 kHz
<b>Měřicí rozsahy</b>	
<b>Zrychlení</b>	20, 200 m/s
<b>Rychlost</b>	200, 2000 mm/s
<b>Zobrazení</b>	LCD displej 61 x 34 mm
<b>Kalibrace</b>	159 Hz, 10 m/s ±5%
<b>Vzorkování</b>	0,5 s
<b>Napájení</b>	9V alkalická destičková baterie
<b>Spotřeba</b>	6 mA
<b>Rozměry</b>	180 x 72 x 32 mm
<b>Hmotnost přístroje</b>	230 g
<b>Hmotnost senzoru</b>	38 g

Citace: <http://eshop.micronix.cz/merici-technika/neelektricke-veliciny/vibrace/lutron-vb-8200-rs232.html>

### 4.1.5 Přístroj firmy Areva

Přístroj firmy Areva, typu NetdB PRO-117/EXT se pravděpodobně nejvíce blíží svým charakterem k vyvíjenému zařízení. Obsahuje 4 kanály s 24 bitovými Delta-Sigma ADC s vzorkovací frekvencí 52kHz, to umožňuje využít frekvenční pásmo od stejnosměrných signálů až po frekvenci 20 kHz. Dalšími vstupy jsou vstup pro měření otáček a vstup externího spouštění. Přístroj umožňuje paralelní záznam a zpracování v reálném čase. Import a export dat probíhá přes TCP/IP příkazy na otevřené softwarové platformě a USB. Přístroj podporuje rychloměry v ADC datovém toku pro synchronizaci měření. Nedílnou součástí dodávky je software. Parametry přístroje uvádí Tabulka 4-7 a Tabulka 4-8.

Tabulka 4-7 Technické parametry přístroje Areva, typ NetdB PRO-117/EXT, hardware

<b>Analog input channels:</b>	4, single ended, simultaneous
<b>Channel input connectors:</b>	BNC with high rigidity frame
<b>Analog output channels:</b>	1 (BNC connector)
<b>Digitization:</b>	24 bits linear
<b>Maximum Sampling Rate:</b>	52.734kHz
<b>Minimum Sampling Rate:</b>	195.3Hz
<b>Tacho channels:</b>	1 (31 bits)
<b>Maximum Input Frequency:</b>	380kHz

Tabulka 4-8 Technické parametry přístroje Areva, typ NetdB PRO-117/EXT, V/V

<b>Input impedance:</b>	1MΩ
<b>Input range:</b>	10V rms (-15V to +15V), 1V rms (-1.5V to +1.5V),
<b>Maximum allowable voltage:</b>	±20V (power off), ± 30V (power on)
<b>Overvoltage protection:</b>	±40V
<b>Sensor power supply:</b>	IEPE



Obrázek 4-5 Přístroj firmy Areva, typ NetdB PRO-117/EXT

## 4.2 Shrnutí

V tomto přehledu bylo uvedeno několik přístrojů odlišných konstrukcí. Vyvíjené zařízení bude konstrukcí nejbližší poslednímu zmíněnému typu, i když se přesně nejedná o systém měření vibrací s nábojovými zesilovači, ale spíše univerzální měřicí kartu. Vyvíjené zařízení nebude obsahovat displej zobrazující měřenou veličinu přímo na těle přístroje. Přístroj bude plně funkční pouze po připojení k PC.

## 5 Testovací indikační jednotka

V této kapitole jsou nastíněny některé varianty navrhovaných řešení. Je brán v potaz fakt, že přístroj je navrhován pro frekvenční pásmo, které je využíváno v audio technice. Proto jsou v navrhovaných řešeních použity prvky, jako jsou USB externí zvukové karty a audio kodeky. Jelikož se jedná o přístroj, který bude použit v průmyslu, musí také software pro PC splňovat určitá kritéria. Software musí být funkční na různých operačních systémech a musí být také zajištěna zákaznická podpora. Z toho důvodu je výhodnější použít hotová řešení, případně vývoj software pro PC přenechat odborné firmě.

### 5.1 Koncepte indikační jednotky

#### Řešení s oddělenou částí předzesilovačů

Tato koncepce představuje nejjednodušší možnost realizace zadaného přístroje. Přístroj by se poté skládal z několika oddělených částí, případně v jednom pouzdru. Byla by zde část, která by obsahovala nábojové zesilovače a předzesilovače. Další část by tvořila externí zvuková karta, nebo například digitalizační karta (např. od firmy National Instruments z řady přístrojů USB Data Acquisition). Jako nezbytná část by byl napájecí zdroj, který by byl realizován pomocí USB sběrnice ze zvukové karty nebo digitalizační karty, nebo bylo možné použít řešení pomocí baterie.

#### Řešení s mikroprocesorem

Nabízí se také řešení, kde bude hlavním prvkem mikroprocesor. Ten by měl umožnit analogově digitální převod a odesílání měřených dat. Napájecí zdroj, nábojové zesilovače, předzesilovače a mikroprocesor by potom byli na jedné desce tištěného spoje. Tato koncepce se z hlediska návrhu přístroje jeví jako nevhodnější řešení. Nicméně je toto řešení pro tuto aplikaci zbytečně komplikované, je zde nutnost programovat mikroprocesor a ožívání celého systému by bylo příliš náročné. Navíc je zde požadavek vyvíjet aplikaci pro PC, která by komunikovala s přístrojem.

## Řešení s audio kodekem

Řešení s audio kodekem kombinuje předchozí řešení. Napájecí zdroj, nábojové zesilovače, předzesilovače a audio kodek mohou být umístěny na jedné desce tištěného spoje. Toto řešení nevyžaduje vyvíjet software pro zpracování dat navíc komunikace přístroje s PC je již vyřešena ovladačem pro zvukové karty. Toto řešení má proti řešení s oddělenou částí předzesilovačů hlavní výhodu v tom, že vstupní obvody ADC převodníku lze přizpůsobit požadované aplikaci lépe, zvláště pak pro velmi nízké frekvence. Tato koncepce již byla použita v praxi a osvědčila se.

## 5.2 Vlastnosti zařízení

Jak již bylo napsáno v úvodu této práce, zařízení musí být především spolehlivé, elektromagneticky odolné a levné. Proto zde nastávají určité komplikace vycházející ze zvolené koncepce, které jsou rozepsány ve výše zmíněných bodech.

### 5.2.1 Počet vstupů

Jako optimální se jeví 3 vstupy pro každou z ortogonálních os, nicméně z hlediska levného audio kodeku jsou k dispozici pouze dva. V tom případě lze uvažovat pevně o 2 vstupech. Tyto vstupy lze použít následovně:

1. Nezávisle měřicí vstupy.
2. Nezávislé vstupy měřící každý jinou veličinu – lze měřit např. vibrace a otáčky, případně jiné veličiny.
3. Měřící oba stejnou veličinu, ale s rozdílným zesílením předzesilovačů. To je vhodné například pro velký dynamický rozsah měřené veličiny.

### 5.2.2 Vzorkovací frekvence

Šířka pásma pro měření efektivní hodnoty vibračního zrychlení je definována normou ČSN ISO 2954:2012 a to od 0,2 Hz do 20 kHz přičemž mezní frekvence jsou definovány zadáním na 2 Hz a 2000 Hz. Dle vzorkovací věty lze použít pro vzorkování vzorkovací frekvenci minimálně dvojnásobnou té, která je v daném signálu nejvyšší. Při předpokladu výskytu signálu s frekvencí 20 kHz je minimální vzorkovací frekvence 40 kHz. Většina audio kodeků má maximální vzorkovací frekvenci 48 kHz, nicméně frekvenci 20 kHz není nutné uvažovat z hlediska výchozích charakteristik dané normami ČSN ISO 2954:2012 a RTCA/DO-160C, což dokazují i parametry konkurenčních výrobků.

### 5.2.3 Počet bitů ADC

Pokud se uvažuje řešení s levným audio kodekem, který disponuje 16 bitovým ADC pro



každý kanál, lze uvažovat, že efektivní počet bitů je minimálně 13 bit pro každý kanál. Poté vychází při plném rozkmitu vstupního signálu ( $2V_{P-P}$ ) kvantizační chyba 0,01 %. Chyba se samozřejmě zvyšuje s klesající hodnotou rozkmitu vstupního signálu a se zvyšující se frekvencí (uvažuje harmonický vstupní signál). Nemá tedy význam žádat ADC s vyšším rozlišením.

### 5.2.4 Elektromagnetická kompatibilita

V průmyslu se vyskytuje mnoho rušivých vysokofrekvenčních signálů, například od frekvenčních měničů, nebo od také od vysokorychlostních točivých strojů. I když se předpokládá, že data z indikační jednotky budou zpracovány číslicovou filtrací, složky rušení se mohou projevit jako modulace na měřený signál. Nábojový zesilovač musí být navržen tak, aby se rušivé vysokofrekvenční signály nedetekovaly.

Jako další problém se jeví výskyt případných zemních proudových smyček zemních větví. Tento problém odpadá při použití notebooku provozovaného na baterie. Nicméně při současném dobíjení notebooku z rozvodné sítě, nebo při použití stolního PC se nelze tomuto problému vyhnout bez nutných opatření. Jako možné řešení se jeví bateriové napájení indikační jednotky, nebo její napájení DC/DC měničem, současně s použitím optočlenů pro oddělení komunikace s PC. Nebo lze takto oddělit pouze některé části zařízení a to především nábojové zesilovače od audio kodeku, případně jiného ADC.

Stínění a další potřebné zajištění elektromagnetické kompatibility budou aplikovány. Dále budou aplikovány doporučení na vyhovění požadavků normy ČSN EN 61000-6-2.

### 5.2.5 Další vlastnosti

Zařízení lze doplnit konektorem, který poskytne analogový výstup ve formě napětí na výstup mimo ADC. Tak bude zařízení schopno alespoň minimálního provozu bez použití PC.

Pokud bude použit audio kodek, lze využít výstupní kanály tohoto čipu, například pro zpětnovazební řízení vibrační zkoušky, nebo pro autokalibraci.

## 5.3 Zvolená koncepce

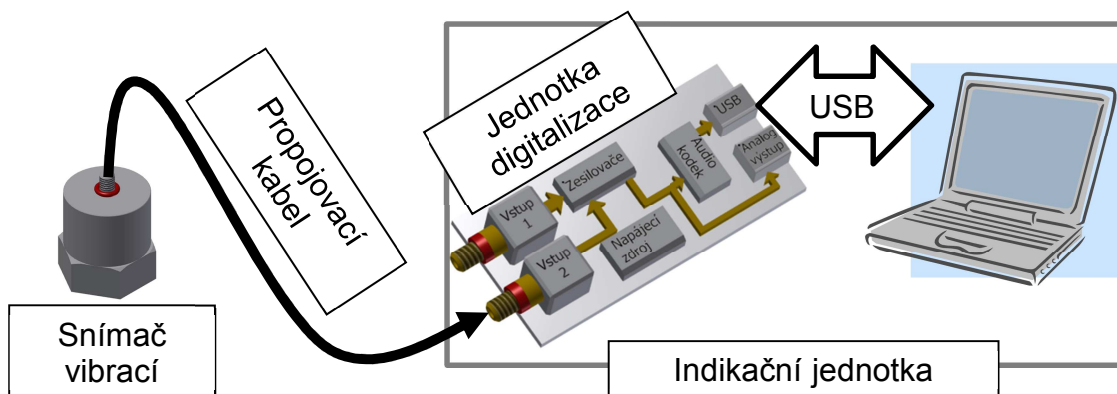
Po posouzení všech aspektů byla vybrána koncepce s audio kodekem, blokové schéma viz Obrázek 5-1. Především pro dobrou dostupnost integrovaného obvodu, 2 měřicí kanály, velkou rozlišovací schopnost ADC, dostatečnou vzorkovací frekvenci, levný návrh indikační jednotky a v neposlední řadě možnost využití specializovaného software pro zpracování dat.

Tato koncepce dovoluje vyrobit indikační jednotku na jedné desce plošného spoje. Tím je dán základ pro miniaturizaci a levné výrobní a vývojové náklady finálního zařízení. Tato

koncepte se skládá z následujících funkčních bloků:

- Senzor vibrací (Akcelerometr seismického typu)
- Propojovací kabel
- Indikační jednotka:
  - Jednotka digitalizace
    - Měřicí zesilovače
    - Audio kodek s komunikačním rozhraním
  - PC

Propojení funkčních bloků zobrazuje Obrázek 5-1. Indikační jednotkou je v tomto dokumentu označena jednotka digitalizace.

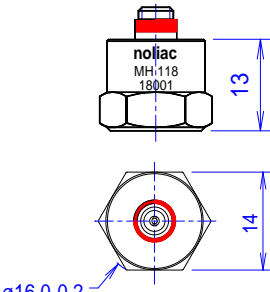


Obrázek 5-1 Zvolená koncepce

## 5.4 Senzor vibrací

Z hlediska návrhu zařízení se nejprve musí zvolit senzor vibrací a podle jeho parametrů se odvodí další části zařízení. Snímač vibrací byl vybrán dle požadavků uvedených v kapitole 3. Konečný výběr této kapitoly uvedl několik senzorů vibrací, kde jako nejvýhodnější akcelerometr byl zvolen MH118 resp. MH119. Výhodou zvoleného akcelerometru je nábojová citlivost  $10 \text{ pC/g}$  ( $1 \text{ pC/ms}^{-2}$ ), tím je zaručena možnost využít všechny snímače vibrací z konečného výběru kapitoly 3.3 na rozsahu vibrační rychlosti:  $0 - 25 \text{ mm/s}$ . Zvolený akcelerometr byl poskytnut firmou Noliac Systems s. r. o.

Tabulka 5-1 Parametry senzoru vibrací MH118

Parameter <sup>1</sup>	Unit	MH 118
Accelerometer type	-	piezoelectric
Output	-	charge/voltage
Design	-	Ring Shear®
Charge sensitivity	pC/ms <sup>-2</sup>	1
Capacity	pF	400
Mass	g	12
Transverse sensitivity (max.)	%	2
Resonance frequency (mounted 180g)	kHz	32
Max. shock acceleration	kms <sup>-2</sup>	40
Min. leak resistance (at room temp.)	GΩ	10
Magnetic sensitivity	ms <sup>-2</sup> /T	1,2
Temperature transient sensitivity <sup>2</sup>	ms <sup>-2</sup> /K	0,25
Temperature range	°C	-40 to 250
Material	-	AISI 304
Sensing element	-	piezoelectric
Seismic mass	g	3.3
Centre of seismic mass gravity <sup>3</sup>	mm	6
Connector	-	coaxial 10-32 UNF
Outlet	-	axial
Mounting thread	-	M5
<b>Dimensions:</b> (not in scale)  <sup>1</sup> Typical parameters obtained in accordance with relevant parts of ISO 5347 and ISO 16063 standards. LFF (low frequency filter) = 3 Hz From mounting surface at central axis.		

## 5.5 Obvod ADC

Obvod ADC je realizován audio kodekem s USB rozhraním. Po průzkumu trhu byl zvolen integrovaný obvod PCM2902 od firmy Texas Instruments. ADC disponují 16 bitovým rozlišením, maximální vzorkovací frekvence je 48 kHz.

Zvolený obvod je napájený ze sběrnice USB a obsahuje dva integrované regulátory napětí:

- 3.3 V ( $V_{CC1}$  – Internal analog power supply for codec) a
- 1.65 V ( $V_{COM}$  – Common for ADC/DAC ( $V_{CC1/2}$ )).

Tato napětí slouží prioritně pro napájení integrovaných Sigma-delta ADC, ale lze je současně použít pro napájení periferních obvodů při zatížení proudem 10 mA/pin.

### 5.5.1 Parametry ADC<sup>8</sup>:

Rozlišení:	8, 16 Bitů
Audio data kanál:	1, 2
Vzorkovací frekvence ( $f_S$ ):	8, 11.025, 16, 22.05, 32, 44.1, 48 kHz
Vstupní napětí:	$0.6 V_{CCCI(P-P)}$ (pro $V_{CCCI} = 3.3$ V je $1.98 V_{(P-P)}$ ) <sup>9</sup>
DC předpětí:	$0.5 V_{CCCI}$
Antialiasingový filtr:	-3 dB / 150 kHz
Vstupní impedance:	30 k $\Omega$
Frekvenční rozsah:	$0.454 f_S$ Hz
Frekvence maximálního útlumu:	min. $0.583 f_S$ Hz
Zkreslení v propustném pásmu:	max. $\pm 0.05$ dB
Maximální útlum DPF:	min. -65 dB
Zpoždění ( $t_d$ ):	$17.4/f_S$ s
HPF <sup>10</sup> a jeho frekvenční odezva:	-3 dB na $0.078 f_S/1000$ .
Napájecí napětí:	4,35 – 5,25 V
Napájecí proud:	max. 67 mA
Ztrátový výkon:	max. 352 mW, typ. 280 mW

---

<sup>8</sup> Další parametry jsou k dispozici v datasheetu produktu PCM2900C, z www stránek <http://www.ti.com/>

<sup>9</sup> Parametry integrovaného regulátoru napětí (Internal power-supply voltage,  $V_{CCCI}$ ): min.: 3.1 V<sub>DC</sub>, typ.: 3.3 V<sub>DC</sub>, max.: 3.5 V<sub>DC</sub>

<sup>10</sup> Audio kodek je z důvodů potlačení stejnosměrné složky vybaven hornofrekvenční propustí 1. řádu. Detailní rozbor chování toho integrovaného filtru je uveden v Bakalářské práci [5].

## 5.6 Měřící zesilovače

Pro případ testovacího vzorku byla uvažována verze systému s jedním měřícím piezoelektrickým snímačem zrychlení, kde signál ze snímače vibrací měří nábojový zesilovač a pro nízké hladiny vibrací a respektive pro případnou možnost použít jiný snímač vibrací je signál také zesílen v druhém stupni invertujícím zesilovačem.

### 5.6.1 Nábojový zesilovač

Pro měření náboje generovaného snímačem vibračního zrychlení je zvolen nábojový zesilovač. Oproti jednoduchému impedančnímu oddělení přináší výhodu eliminace parazitních kapacit přívodního kabelu, kapacit snímače vibrací a kapacity vstupu indikační jednotky.

Použitá koncepce vychází z nábojového zesilovače, popsaného v publikaci [2], nebo v Bakalářské práci [5].

Jako klíčový parametr pro návrh nábojového zesilovače slouží nábojová citlivost (charge sensitivity), která je u zvoleného snímače vibrací  $1 \text{ pC/ms}^{-2}$ . Měřené zrychlení lze vyjádřit vztahy (5-1) a (5-2):

$$a(t) = \frac{d}{dt} V \cdot \sin(\omega t), \quad (5-1)$$

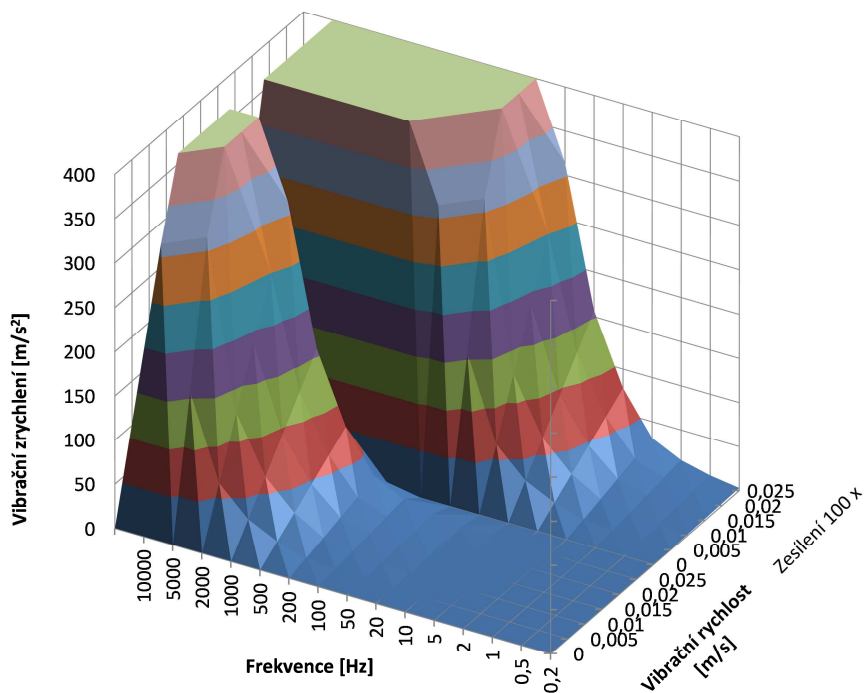
$$a(t) = V \cdot \omega \cdot \cos(\omega t), \quad (5-2)$$

Kde  $V$  je vibrační rychlost [m/s]. Pro ilustraci Obrázek 5-2 zobrazuje rozsah zrychlení dle zadané vibrační rychlosti: 0 – 25 mm/s. Uvažuje se frekvenčním spektrum od frekvence 0,02 Hz do frekvence 10 000 Hz, pro nezesílený a 100 násobně zesílený vstupní signál.

Největší teoreticky uvažované zrychlení je 314,16 m/s<sup>2</sup> to pro zvolený akcelerometr znamená maximální generovaný náboj 314,16 pC<sub>(RMS)</sub>, nebo 888,58 pC<sub>(P-P)</sub>.

Z obvodu PCM2902 je zadáno vstupní napětí a to jako 1,98 V<sub>(P-P)</sub>, které musí být stejnosměrně posunuto o 1,65 V. Pro dostatečnou rezervu je stanoveno největší uvažované zrychlení odpovídající 70 % maximálního vstupního napětí. Pro návrh nábojového zesilovače se tedy určuje rozkmit náboje 888,58 pC rovný rozkmitu 1,4 V na uvažovaném frekvenčním spektru 2 Hz až 2 kHz.

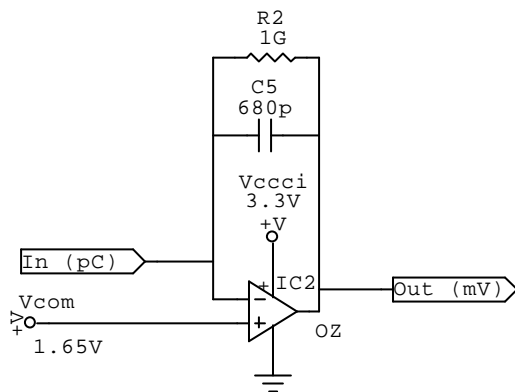
## Vztah mezi vibrační rychlostí a zrychlením



Obrázek 5-2 Vztah mezi vibrační rychlostí a zrychlením na dané frekvenci (bez zesílení a ekvivalent 100 násobně zesílenému zrychlení)

## Model nábojového zesilovače

Schéma nábojového zesilovače zobrazuje Obrázek 5-3. Základní uvažovaný přenos je dán vztahem (5-3), při předpokladu zesílení operačního zesilovače alespoň  $10^5$ , svodového odporu přívodního kabelu větší než  $20 \text{ G}\Omega$ . Odvození viz publikace [2], nebo Bakalářská práce [5].



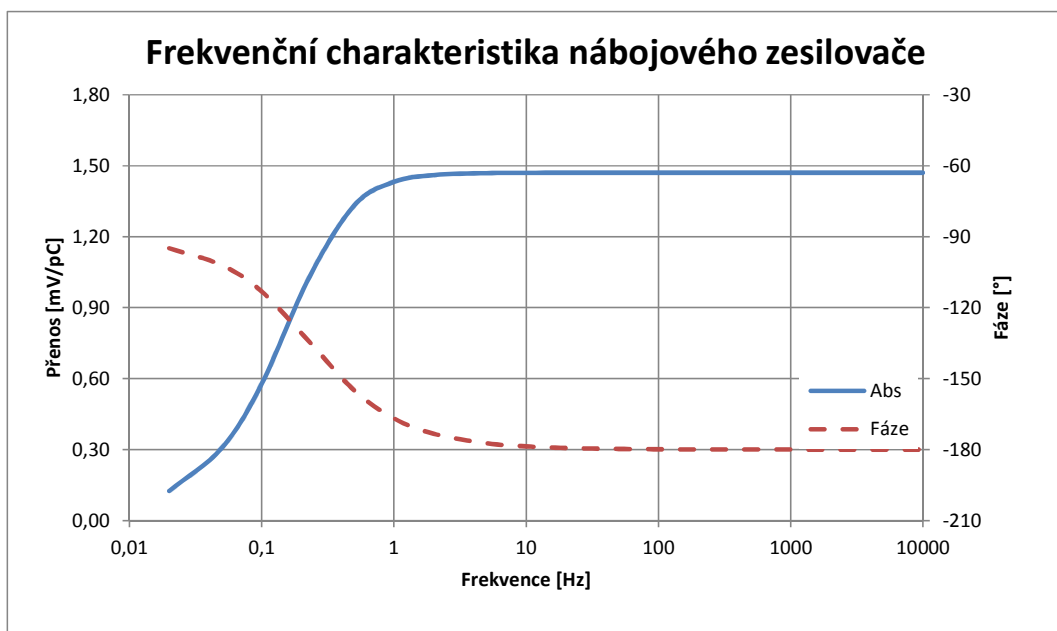
Obrázek 5-3 Schéma nábojového zesilovače

$$H_{CH} = \frac{V_0}{Q} = - \frac{1}{C_5 \left( 1 + \frac{1}{j\omega R_2 C_5} \right)} \quad (5-3)$$

Požadovaný přenos je v absolutní hodnotě roven  $H_{CH} = 1,4/888,58 = 1,58 \text{ mV/pC}$  při frekvenci 80 Hz. Tato hodnota odpovídá hodnotě kondenzátoru  $C_5 = 634,7 \text{ pF}$ . Pro testovací indikační jednotku je použit kondenzátor s nejbližší hodnotou z řady E6, tj. 680 pF. Poté je přenos roven  $H_{CH} = 1,47 \text{ mV/pC}$  při frekvenci sinusového signálu 80 Hz.

Pro definovaný přenos ve frekvenčním spektru 2 Hz až 2 kHz a pro omezení vlivu stejnosměrné složky měřeného signálu je definován zpětnovazební rezistor  $R_2 = 1 \text{ G}\Omega$ , tento rezistor také zaručuje dostatečnou ochranu proti stavům v saturaci vybíjením kapacity  $C_5$ .

Výslednou frekvenční charakteristiku nábojového zesilovače zobrazuje Obrázek 5-4, pokles -3 dB je na frekvenci  $f_d = 0,23 \text{ Hz}$ .



Obrázek 5-4 Frekvenční charakteristika nábojového zesilovače [mV/pC]

Parametry definující použitý operační zesilovač:

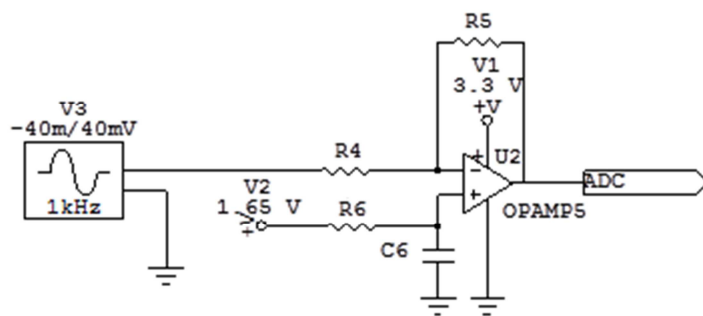
- Napájecí napětí: 3,3 V
- Vysoké zesílení: 1000 V/mV
- Nízko šumový, nízko příkonový, určený pro měřicí aplikace,
- Cenově dostupný v miniaturním pouzdru,

Je použit operační zesilovač AD8515 od firmy Analog Devices. Jedná se o nízkošumový „rail-to-rail“<sup>11</sup> operační zesilovač navržený pro nízkopříkonové aplikace do mobilních zařízení a speciálních aplikací pro měřicí přístroje jako rozhraní k senzorům, speciálně pro hlasové kodeky.

### 5.6.2 Zesilovač nízkých hladin signálu

Z důvodu logaritmické frekvenční závislosti měřeného zrychlení a potřeby velkého dynamického rozsahu je použit zesilovač výstupního napětí z nábojového zesilovače. Obrázek 5-2 slouží pro ilustraci potřeby použití zesilovače měřené veličiny.

Základ tvoří použitý operační zesilovač AD8515. Zesílení je zvoleno 100 násobné, tomu odpovídají rezistory R5, R4 a R6 viz Obrázek 5-5.



Obrázek 5-5 Schéma zesilovače nízkých hladin signálu

### 5.6.3 Opatření proti rušení a zajištění EMC

Elektromagnetická kompatibilita je posuzována z dvou hledisek:

- Elektromagnetické rušení přístrojem
- Odolnost přístroje proti elektromagnetickému rušení.

V případě nízko příkonového měřicího systému napájeného po sběrnici USB lze vyzařování elektromagnetického rušení téměř vyloučit, nicméně mohou nastat případy, kdy vlastní funkcí přístroje je ovlivňována měřená veličina, tomu lze předejít vhodným návrhem. Avšak implementaci opatření odolnosti proti elektromagnetickému rušení nelze vyloučit.

<sup>11</sup> Výstupní napětí OZ u takovéto konstrukce dosahuje téměř limitů napájecího napětí.



### 5.6.3.1 Návrh opatření zajišťující bezproblémovou funkci indikační jednotky

Všechna zmíněná opatření, kromě oddělovacího<sup>12</sup> a blokovacích kondenzátorů zobrazuje Obrázek 5-6.

#### Přivedení referenčního napětí na vstupy operačních zesilovačů

Vzhledem k tomu, že použitý operační zesilovač má asymetrické napájení 3,3V a vstupní signál je symetrický vzhledem k zemi, je nezbytné posunout pracovní bod zesilovače. To je realizováno konstantním stejnosměrným napětím 1,65 V přivedeným na neinvertující vstupy obou operačních zesilovačů. Toto opatření musí být provedeno tak, že na oba vstupy jsou připojena referenční napětí přes součástky stejných hodnot (uvažujeme-li např. invertující zesilovač, tak rezistor propojující zdroj signálu s invertujícím vstupem bude použit i pro neinvertující vstup a rezistor o hodnotě odporu jako rezistor ve zpětné vazbě bude použit k uzemnění na stávající zem). Více informací viz [7].

#### Omezení stejnosměrné složky vstupního signálu

Omezení stejnosměrné složky signálu je realizováno vstupním kondenzátorem v sérii.

#### Omezení vlivu vysokofrekvenční energie

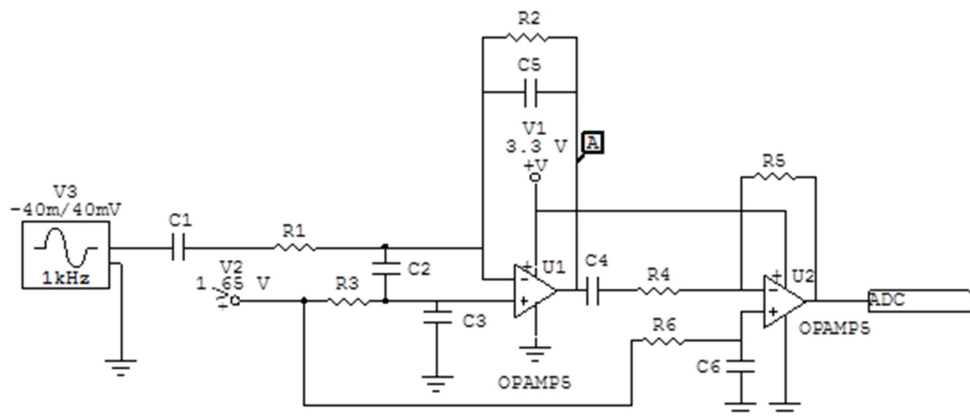
Pro omezení působení vysokofrekvenční energie je v sérii za oddělovacím kondenzátorem zařazen rezistor R1, ten spolu s kondenzátorem C2 vytvoří integrační článek, který potlačí vstupní signály o frekvenci nad 1 MHz. Použitý kondenzátor plní navíc funkci ochrany proti detekci vysokofrekvenční energie z rádiových vysílačů (frekvence v řádech jednotek GHz), ale i z jiných průmyslových zdrojů rušení. Více o VF rušení viz publikace [6]. Tyto signály jsou detekovány operačními zesilovači, proto se zavádí mezi vstupní svorky operačních zesilovačů kondenzátor, který jejich funkci v měřeném spektru frekvencí neovlivní, ale v rámci 1–2 GHz signálů vytvoří pro tyto signály zkrat, operační zesilovač (vnitřní polovodičová struktura) poté nedetekuje změny potenciálu a nevytváří na výstupu nízkofrekvenční obálku rušivých vf signálů.

### 5.6.4 Model nábojového zesilovače

Pro testování zapojení nábojového zesilovače včetně opatření EMC byl sestaven model v programu Circuit Maker 2000, tento model zobrazuje Obrázek 5-6.

---

<sup>12</sup> Program Circuit Maker 2000 neumožňuje simulaci s dvěma kondenzátory v sérii

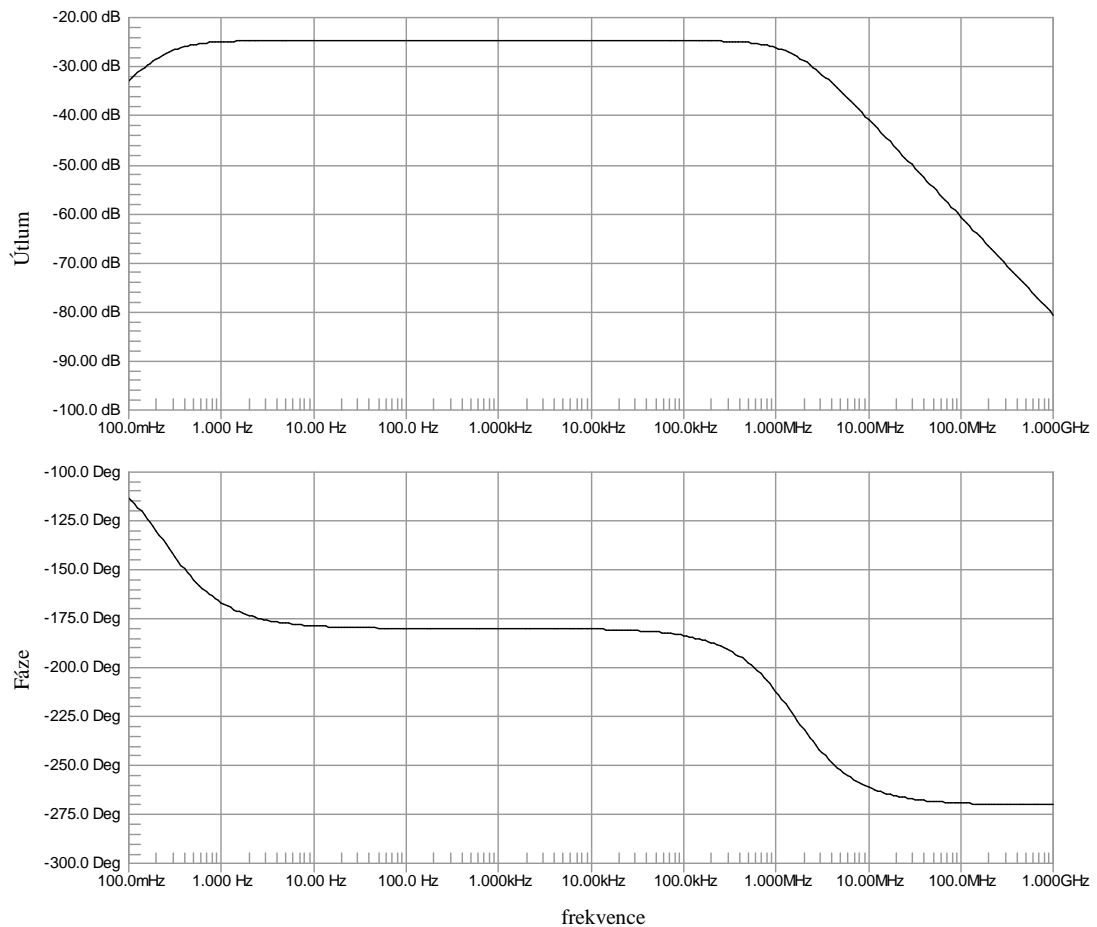


Obrázek 5-6 Model nábojového zesilovače k ověření opatření proti rušení

### 5.6.5 Frekvenční charakteristika modelu

Frekvenční charakteristika byla měřena funkcí „AC analysis“. Vstupem je Generátor V3 a výstupem bod označený symbolem: „A“ ve čtverečku.

Obrázek 5-7 zobrazuje mezní frekvence použitých opatření. Do frekvence 0,23 Hz se uplatňuje konfigurace nábojového zesilovače odpovídající oblasti nízkých kmitočtů. Poté následuje rovná charakteristika až po frekvenci 1,57 MHz, kdy se uplatní vstupní útlum vstupního integračního článku. Frekvenční charakteristika modelu je pouze informativní, slouží pro ověření mezních frekvencí, jelikož model není buzen zdrojem náboje, nýbrž zdrojem napětí, které je kondenzátorem C1 transformováno na náboj, proto měřítko útlumu modelu neodpovídá skutečnosti. Tvar frekvenční charakteristiky odpovídá zapojení, které zobrazuje Obrázek 5-6.

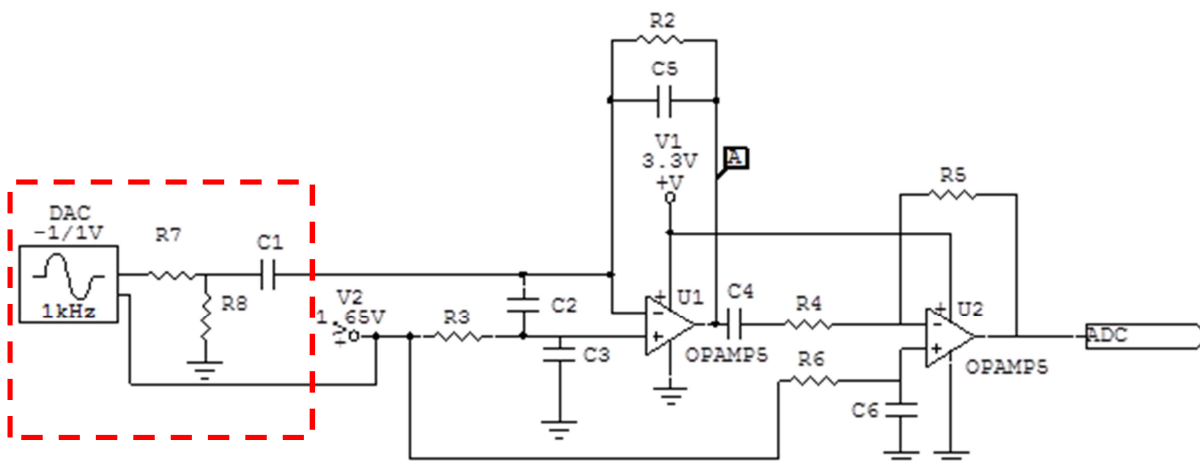


Obrázek 5-7 Frekvenční charakteristika nábojového zesilovače – informativní AC simulace.

Výstupem z měřicího zesilovače U2 je 100 násobně zesílený signál s opačnou fází než v bodu „A“.

### 5.6.6 Další obvody indikační jednotky

Použitý Audio kodek je vybaven dvěma 16 bitovými DAC, ty lze použít pro případnou autokalibraci zařízení. Obvod je realizován děličem napětí (rezistory R7, R8) a kondenzátorem C11. Model pro kanál kontroly indikační jednotky zobrazuje Obrázek 5-8. Frekvenční charakteristika zdrojového signálu je tímto obvodem omezena po horní frekvenci  $f_h = 15,71$  kHz.



Obrázek 5-8 Autokalibrační obvod (schéma v přerušovaném rámečku)

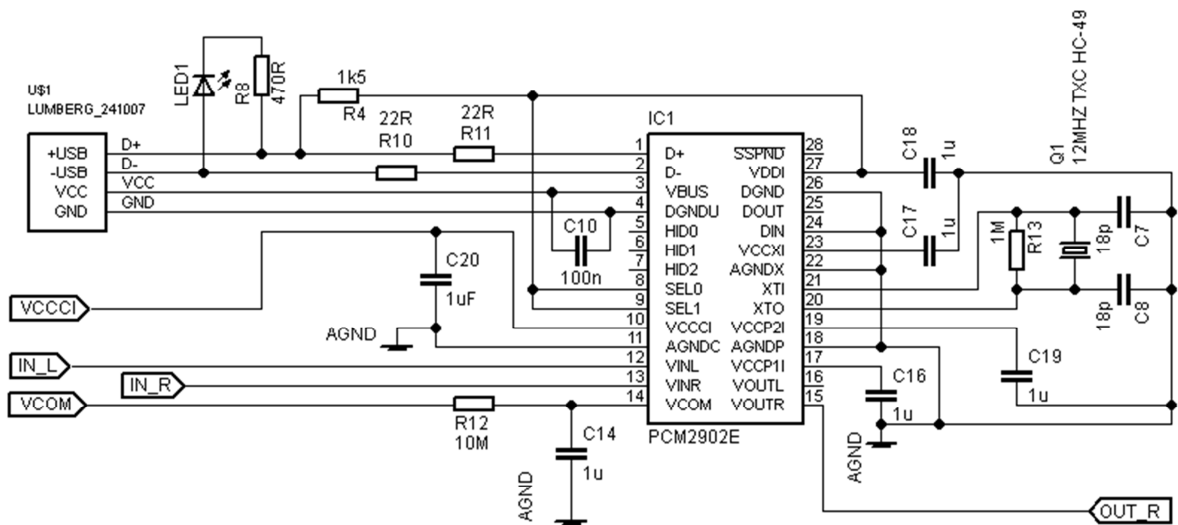
## 5.7 HW indikační jednotky

Návrh hardwaru indikační jednotky byl proveden v programu EAGLE 6.4.0 od společnosti CadSoft. Indikační jednotka je navržena co možná nejmenší, jako vhodná velikost byla zvolena velikost paměťového disku USB o rozměrech: 15 mm x 50 mm. Pro návrh stínění a konektoru byl použit software Autodesk Inventor 2011 LT.

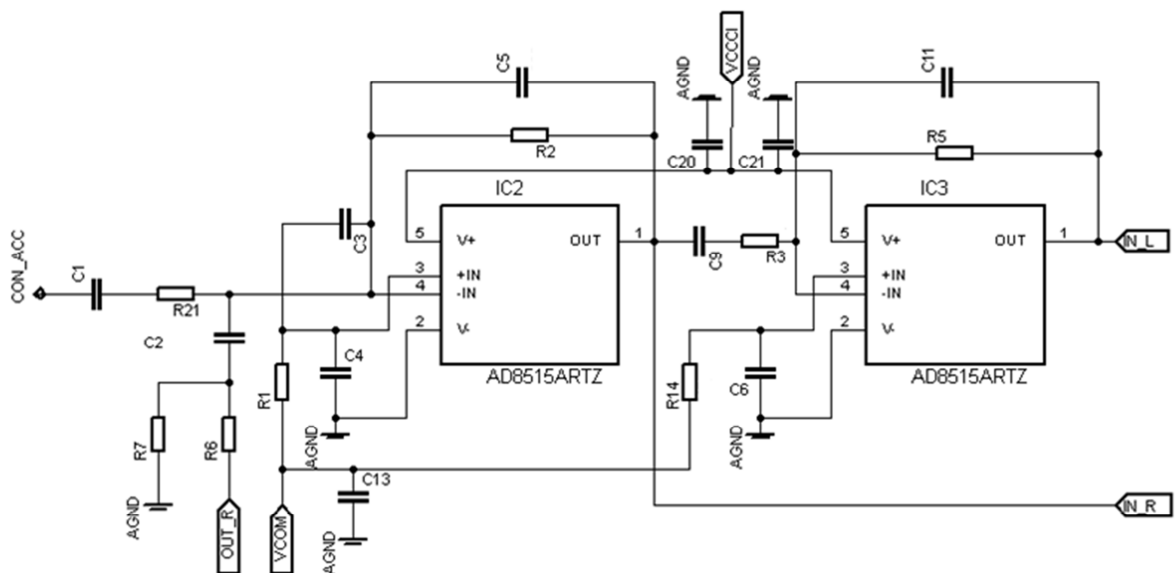
### 5.7.1 Schéma indikační jednotky

Schémata, která zobrazují Obrázek 5-9 a Obrázek 5-10 jsou základem pro výrobu plošného spoje. Oproti modelu jsou přidány na napájecí vstupy blokovací kondenzátory (C21 a C20) a pro referenční napětí VCOM je použit kondenzátor C13. Jediným analogovým vstupem do indikační jednotky je pin CON\_ACC, který slouží pro připojení propojovacího kabelu s akcelerometrem.

Pro obvod PCM2902 výrobce uvádí doporučené schéma zapojení. Po úpravě o indikaci napájení LED, bylo také upraveno zapojení pinů pro verzi integrovaného obvodu bez S/PDIF. Rezistorem R12 se omezuje výstupní proud VCOM pinu, který slouží jako napěťová reference 1.65V pro operační zesilovače.



Obrázek 5-9 Periferní součástky obvodu PCM2902



Obrázek 5-10 Měřící zesilovače a autokalibrační obvod

## 5.7.2 Deska plošného spoje

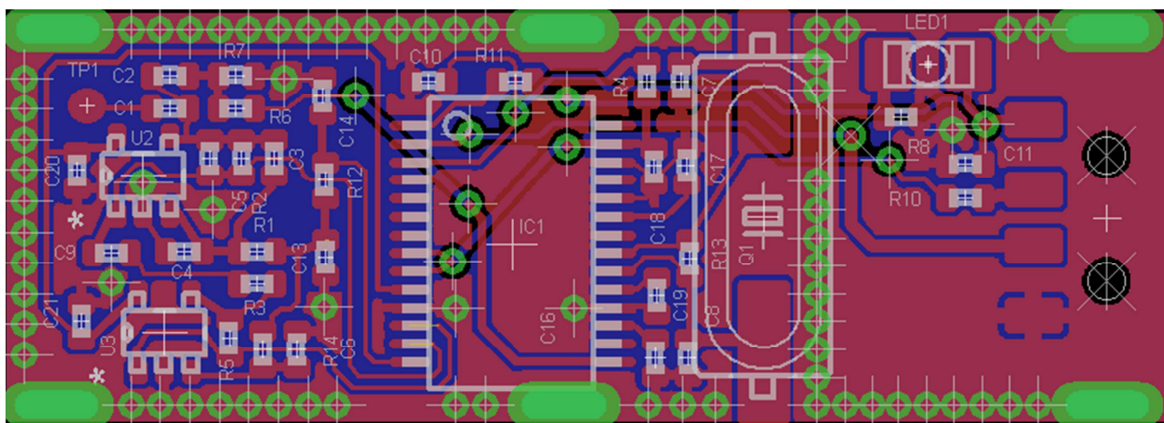
Deska plošného spoje byla zvolena dvouvrstvá, součástky SMD jsou jen z jedné strany. USB konektor je zvolen LUMBERG 2410 07, jeho pozici fixují dva otvory, navíc byly otvory pro připájení konektoru oddáleny od sebe, tak že konektor je s deskou svázan ještě pevněji.

Pasivní součástky jsou zvoleny o velikosti pouzdra 0402<sup>13</sup>. LED je navržena jako 1206,

<sup>13</sup> Velikost součástek je 0,039 in x 0,020 in (1,0 mm x 0,5 mm)

nicméně se používá velikosti 0603<sup>14</sup> osazená o 90° bokem. Celkový návrh je řešen tak, že obvody s nejvyšší frekvencí (12 MHz) jsou umístěny vpravo a směrem doleva jsou osazeny součástky pracující na nižších frekvencích (měřicí zesilovače) – viz Obrázek 5-11. Cílem návrhu bylo dokonale odstínit měřicí zesilovače, proto jsou po obvodu desky umístěny prokovené otvory, které slouží jako stínění také z bočních hran, spodní strana slouží až na několik propojení jako stínění.

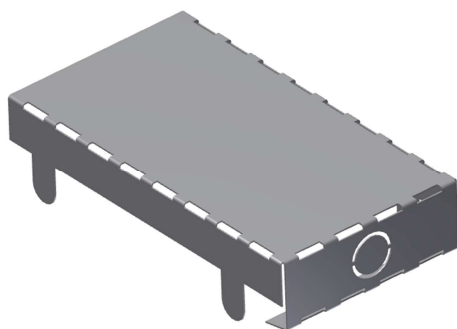
Návrh je určen pro osazování SMT, prototyp byl osazen ručně. Pro pájení byla použita měkká pájka. Deska byla vyrobena ve formě několika kusů na panelu firmou Printed s.r.o.



Obrázek 5-11 deska plošného spoje – verze 711-001-V0A

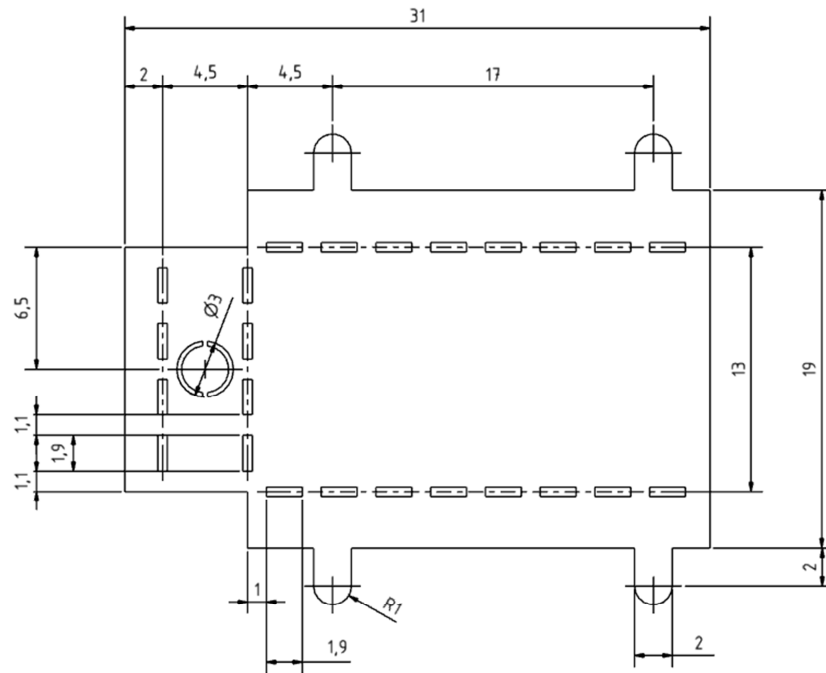
### 5.7.3 Stínění

Stínění je vyřezáno z pocínovaného plechu o tloušťce 500 µm laserem. Dále je stínění zformováno do požadovaného tvaru – viz Obrázek 5-12 a Obrázek 5-13.



Obrázek 5-12 Trojrozměrný model stínění

<sup>14</sup> Větší plocha kontaktů odvádí lépe teplo od LED.

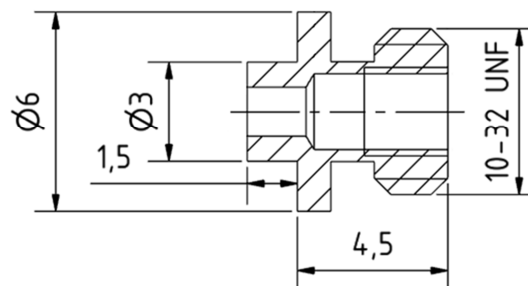


Obrázek 5-13 Rozměry stínění

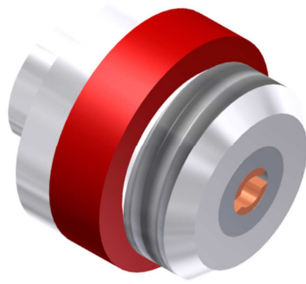
#### 5.7.4 Vstupní konektor

Konektor je použit sériově vyráběný 102 Panel Plug navržený pro zařízení používající „Microdot“ systém konektory s 10-32 UNF závitem. Teplotní rozsah je:  $-40$  až  $+150$  °C. Konektor a stínění slouží zároveň jako zemnicí svorka pro propojovací kabel.

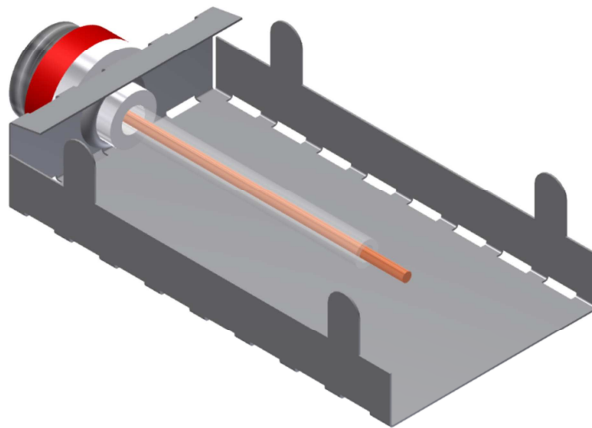
Konektor byl poskytnut firmou Noliac Systems s.r.o. Pro Indikační jednotku byl konektor upraven: vnější průměr určený k vsazení do přístroje byl zmenšen a konektor byl zkrácen – viz Obrázek 5-14. Konektor je připájen ke stínění měkkou pájkou po vnitřním obvodu ke stínění – viz Obrázek 5-16. Model konektoru zobrazuje Obrázek 5-15.



Obrázek 5-14 Řez pláštěm modifikovaného konektoru „102 Panel Plug“



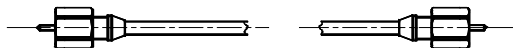
Obrázek 5-15 Model modifikovaného konektoru „102 Panel Plug“



Obrázek 5-16 Stínění včetně konektoru s kabelem pro připojení na DPS

### 5.7.5 Propojovací kabel SK132

Propojovací kabel byl poskytnut firmou Noliac Systems s.r.o. Jedná se o nízkošumový, 1m dlouhý koaxiální kabel, na obou stranách zakončený koaxiálním konektorem „Microdot“ se závitem UNF 10-32. Kabel se používá pro připojení piezoelektrických senzorů vibrací a tlaku. Teplotní rozsah:  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Náčrt kabelu zobrazuje Obrázek 5-17.



Obrázek 5-17 Kabel SK132 s Microdot konektory



## 6 Definice testů dle požadavků norem

### 6.1 ČSN 2954:2012 kapitola: 1.1 Obecné požadavky

1. Požadavky bodů: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 jsou řešeny průběžně v kapitole 9.
2. Bod 4 – Definice splněna: Měřicí Sestava se skládá ze snímače zrychlení, propojovacího kabelu a indikační jednotky.
3. Bod 13 – Napájení je realizováno sběrníci USB: Požadované napájení je 5 V<sub>DC</sub>, rozsah: 4,35 V až 5,25 V, je dán použitým integrovaným obvodem PCM 2902, maximální spotřeba se uvádí 352 mW, (včetně zesilovačů, které jsou v činnosti a svítící LED, se maximální spotřeba stanovuje na 375 mW)
4. Body 10 až 13 nebylo možné realizovat. Kalibrovaná je indikační jednotka a snímač zrychlení odděleně.

### 6.2 ČSN 2954:2012 kapitola: 1.2 Požadavky na snímač vibrací a propojovací kabel

1. Snímač vibrací je seismického typu, výstup nezávisí na orientaci vzhledem k zemské gravitaci.
2. Tento typ senzoru se šroubuje na měřený předmět šroubem M5, nebo lze použít Magnetickou příchytku „Magnetic Clamp 11“ od firmy Noliac Systems s. r. o., která je určená jako příslušenství k vybranému akcelerometru MH118.
3. Příčná citlivost pro tento typ akcelerometru je 2 %, splňuje tedy podmínku na 10 %.
4. Výrobce udává maximální možné impulzní zrychlení: 40 km·s<sup>-2</sup>, podmínka trojnásobku nejvyššího možného zrychlení je dodržena ( $a_{\max} = 315,71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  při frekvenci 2 kHz).
5. Efektivní hmotnost snímače vibrací je 35g, snímač lze použít pro kmitající hmotnosti o hmotnosti minimálně 350g.
6. Impulzní zrychlení 40 km·s<sup>-2</sup> je vyšší než limitních  $3 \times 315,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 947,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .
7. Ekvivalentní vstupní veličina:
  - a. vlastního rušení brumem a šumem
  - b. vnějšího rušení pro rušivá pole

c. buzení o velikosti stanovené níže

Nesmí ovlivnit měření o více než 5 % z indikované hodnoty v rozsahu 30 až 100 % z hodnoty při plném rozsahu stupnice.

- Citlivost použitého akcelerometru na magnetické pole je  $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{T}$  (intenzita  $H$  ve vzduchu je daná vztahem  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ ), kde  $\mu_r = 1$ . Platí tedy, že při intenzitě  $H = 10^2 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$  se generuje náboj úměrný zrychlení  $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

- Tento test již provedl výrobce snímače zrychlení, neprovádí se.<sup>15</sup>

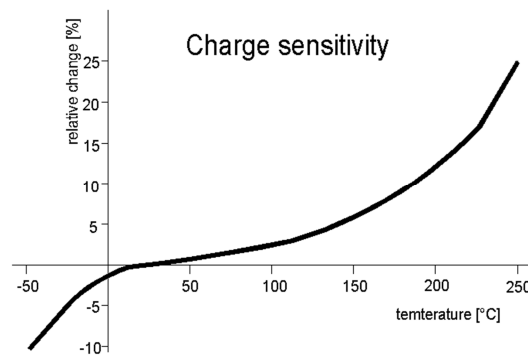
- Snímač může mít vodivé spojení s měřeným objektem.
  - Požadavek na test sestavy akcelerometru s indikační jednotkou zemním proudem o efektivní hodnotě 100 mA (při frekvenci 50 Hz a 60 Hz) tekoucí od zemnění svorky snímače vibrační skrze zemnicí svorku sestavy indikátoru.
- Citlivost na hluk
  - Test provedl výrobce snímače zrychlení s neměřitelnou hodnotou, test se neprovádí.

8. Teplotní přechodová citlivost akcelerometru je  $0,25 \text{ ms}^{-2}/\text{K}$ . Senzor je funkční v teplotním rozsahu od  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  až do  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>16</sup>. Změna nábojové citlivosti senzoru v závislosti na teplotě okolí zobrazuje Obrázek 6-1 poskytnutý výrobcem senzoru. Z uvedeného obrázku je patrné, že toleranci  $\pm 10 \%$  změny citlivosti odpovídá teplotní rozsah  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

---

<sup>15</sup> Test se neprovádí se také z důvodu, že i při nízkých frekvencích a nízkých hladinách vibrací (např. frekvence 1 Hz a při zrychlení  $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , které odpovídá vibrační rychlosti  $0,0015 \text{ m/s}$  ( $0,04 \%$  rozsahu zesíleného kanálu) je chyba od magnetického pole dle výrobce 1 %).

<sup>16</sup> Zde je nutné upozornit na možnost zničení senzoru vibrací. Pokud nastane skoková změna teploty, hrozí depolarizace piezokeramiky. Senzor se musí zahřát zkratovaný, nebo připojený k nábojovému zesilovači při vložení do vysoké teploty (doporučuje se již do teplot nad  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



Obrázek 6-1 Relativní změna nábojové citlivosti snímače zrychlení v závislosti na teplotě

9. Rozsah teploty snímače vibrační a propojovacího kabelu je v rozsahu od  $-40\text{ °C}$  do  $+250\text{ °C}$  aniž dojde k jejich poškození.
10. Maximální mez impulzního snímače zrychlení je  $40\text{ km}\cdot\text{s}^{-2}$ .
11. Maximální vlhkost pro kabel ani snímač zrychlení výrobce neuvádí, krytí senzoru je IP20.
12. Citlivost na mechanické namáhání základny snímače výrobce neuvádí. Bylo umožněno tuto citlivost změřit. Výsledná nábojová citlivost na mechanické namáhání základny je zkouškou provedené dle normy ISO 5347-13 stanovena na:  $2,3\cdot 10^{-3}\text{ ms}^{-2}/\mu\epsilon$ .
13. Střední doba mezi poruchami se neudává. Doporučená doba mezi kalibracemi se stanovuje na 1 rok.
14. Principem měření je zajištěno, že přesnost měření není ovlivněna délkou kabelu ke snímači, viz [2].

### 6.3 ČSN 2954:2012 kapitola: 1.3 Požadavky na indikační jednotku

1. Body: 1, 3 jsou řešeny v kapitole 9.5.
2. Požadavek bodu 2 je řešen v kapitole 10.
3. Bod 4 – Pro účel kontroly je zaveden obvod tzv. kontrolní kanál.
4. Bod 5 – Provozní rozsah indikační jednotky je stanoven na:  $-20\text{ °C}$  až  $+70\text{ °C}$ <sup>17</sup>

<sup>17</sup> Limitem je použitý krystal pro řízení integrovaného obvodu PCM2902.

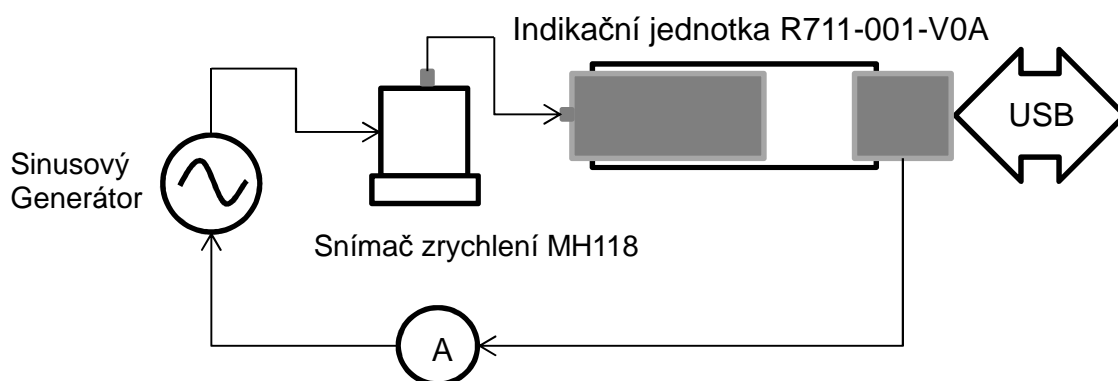
5. Bod 6 – Funkční prototyp lze provozovat do relativní vlhkosti 80 %, kdy nedochází ke kondenzaci vodních par, po navržení pouzdra se tento údaj změní.
6. Bod 7 – Indikační jednotka není určena do výbušného prostředí.

## 6.4 Testování měřicí sestavy

Zde jsou uvedeny testy definované předchozími kapitolami.

### 6.4.1 Test sestavy zemním proudem

Kapitola 6.2 definuje požadavek na test sestavy akcelerometru s indikační jednotkou zemním proudem o efektivní hodnotě 100 mA (při frekvenci 50 Hz a 60 Hz) tekoucí od zemnění svorky snímače vibrací skrze zemnicí svorku sestavy indikátoru (test je omezen na stínění USB konektoru, kvůli možnému poškození PC). Orientační schéma zobrazuje Obrázek 6-2.



Obrázek 6-2 Schéma testu zemním proudem

#### 6.4.1.1 Měřicí přístroje

##### Sinusový generátor

Brüel & Kjaer Sine/Noise generator Type 1054

- Kalibrovaný generátor šumu a sinusového signálu.
- Rozsah výstupních frekvencí: 0,2 Hz – 2,54 MHz

##### Ampérmetr

Multimetr Keithley 2000

- Zvolen mód měření střídavého proudu
- Rozsah: 100.0000 mA

#### 6.4.1.2 Průběh testu

Snímač zrychlení MH118 se připojí propojovacím kabelem k indikační jednotce a indikační jednotka se připojí do sběrnice USB. Počítač, který zpracovává data je doporučeno galvanicky oddělit od sítě, nebo použít napájení z baterie v případě notebooku. V počítači se spustí program na záznam zvuku, nebo specializovaný software pro zpracování měřených dat, například software DEWEsoft 7.0.3.

Aktivní vodič z generátoru je přiveden na stínění snímače zrychlení. Z USB konektoru je přiveden měřicí vodič do ampérmetru a z něj se smyčka uzavře zpět na stínění konektoru generátoru.

Na generátoru se nastavuje frekvence 50 Hz a příslušné napětí, takové, aby se dosáhlo požadované úrovně zemního proudu.

#### 6.4.1.3 Závěr testu

Indikační jednotka, tak jak je navržena, je hodnocena výsledkem: přístroj nevyhověl, ekvivalentní hodnota rušivého signálu byla stanovena 1,04 mA pro dosažení plné výchylky stupnice.

### 6.5 Opatření

Jediným spolehlivým řešením je galvanické oddělení. Nabízí se několik řešení:

1. Galvanicky oddělit snímač vibrací transformátorem,
2. Galvanicky oddělit měřicí zesilovače,
3. Galvanicky oddělit celou indikační jednotku galvanickým oddělením sběrnice USB.

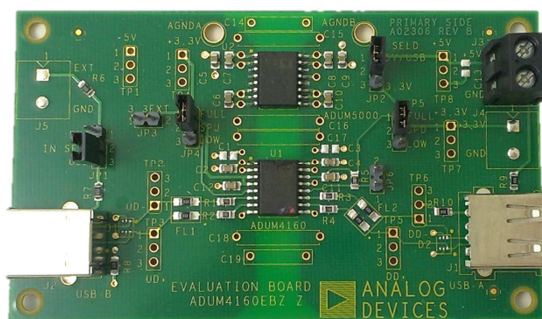
Měřicí transformátory jsou běžně konstruovaná zařízení, nicméně problém je v žádaném přenosu i na nízkých frekvencích (2 Hz). Dle simulací v programu Circuit Maker 2000 se nepodařilo najít vyhovující konfiguraci pro miniaturní transformátor s běžně dostupnými jádry.

Galvanicky oddělené měřicí zesilovače vyžadují galvanicky oddělené napájení, pro tento případ je možné použít DC/DC konvertor. V případě přidání rozměrné součástky, jako je DC/DC konvertor, na desku plošného spoje navržené velikosti, se jeví využít již vyzkoušené galvanické oddělení celé indikační jednotky.

## 6.6 Galvanické oddělení s vývojovou deskou ADUM4160

Pro případ testování byla pořízena vývojová deska (viz Obrázek 6-3) osazená integrovanými obvody ADUM4160 a ADUM5000 od firmy Analog Devices. Obvod ADUM5000 slouží jako DC/DC konvertor, z 5V na 5 V, nebo 3,3 V napájecí napětí pro obvod ADUM4160 a ostatní napájené obvody. Obvod ADUM4160 je plně kompatibilní se standardem USB2.0 v konfiguraci „Low speed“ a „Full speed“. Galvanické oddělení je řešeno vysokorychlostní CMOS technologií a mikro-transformátory. Celý systém je poté galvanicky oddělen a garantované izolační napětí je 2,5 kV<sup>18</sup>.

S vývojovou deskou již není splněna podmínka pro test dle kapitoly 6.4.1 a proto se test neprovádí.



Obrázek 6-3 Vývojová deska ADUM4160EBZ

## 7 Finální verze indikační jednotky

Po úspěšném testu galvanického oddělení s integrovanými obvody ADUM4160 a ADUM5000 bylo rozhodnuto o implementaci těchto obvodů na DPS indikační jednotky. Spolu s tím se provedlo několik modifikací, které nemají vliv na funkčním návrhu zesilovačů. Provedené simulace platí.

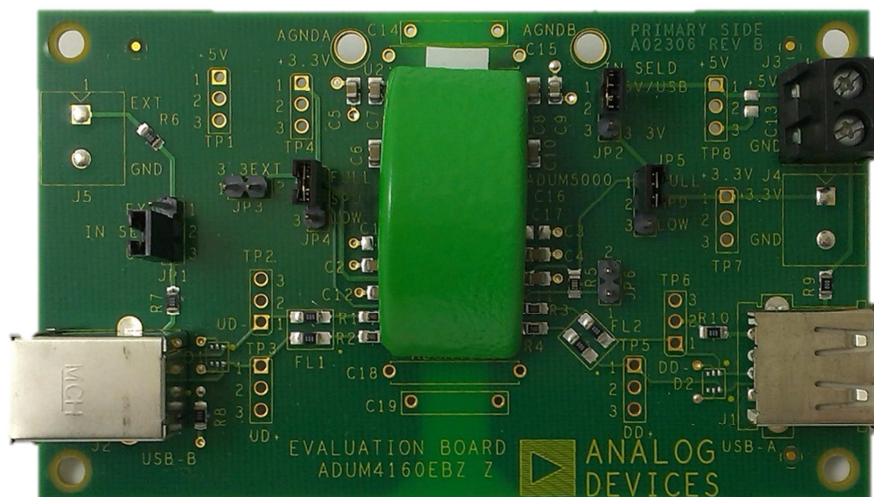
### 7.1 Testování proveditelnosti návrhu

Nejvhodnějším řešením pozice integrovaných obvodů na DPS pro jejich velikost a smysl galvanického oddělení je z obou stran plošného spoje. Pro toto řešení je třeba provést zkouška. Je zde možné riziko, že se oba obvody budou navzájem ovlivňovat případným elektromagnetickým rušením.

Byl sestaven jednoduchý test s rozříznutým feritovým jádrem (viz Obrázek 7-1),

<sup>18</sup> Platí pro konfiguraci s obvodem ADUM5000, při použití externího zdroje lze při použití pouze obvodu ADUM4160 izolační napětí zvýšit až na 5 kV.

feritové jádro bylo umístěno z obou stran DPS. Při testování s indikační jednotkou nebyly pozorovány žádné poruchy.



Obrázek 7-1 Zkouška elektromagnetické odolnosti galvanického oddělení

## 7.2 Přehled modifikací

Návrh desky plošného spoje zahrnuje následující modifikace:

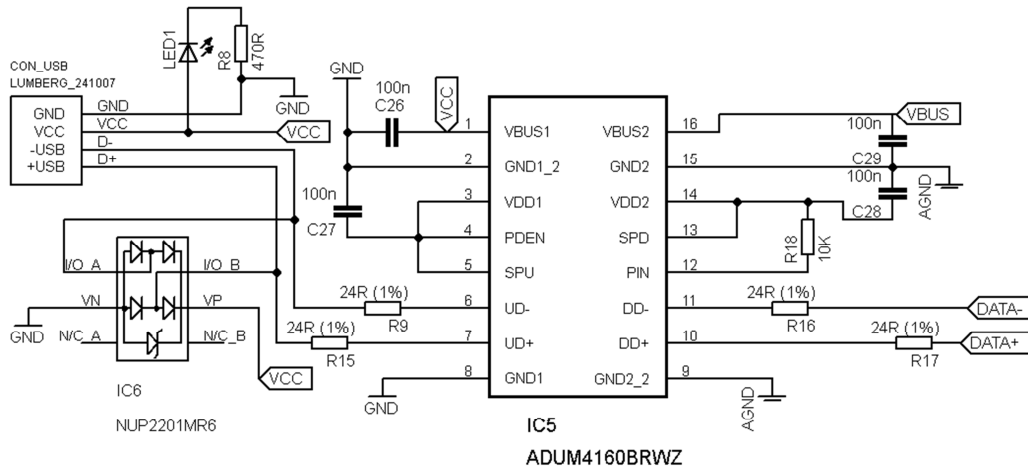
- Prodloužení DPS pro možnost osazení galvanickým oddělením
- Osazení integrovaných obvodů galvanického oddělení a jim přilehlých pasivních součástí
- Indikační jednotku je možno osadit obvodem NUP2201 pro eliminaci přepětí<sup>19</sup>.
- Změna pozice stínění
- Změna použitého USB audio kodeku za stejný typ 2900C<sup>20</sup>, DPS byla přepracována tak, aby odpovídala doporučení výrobce audio kodeku.
- DPS je navržena jako univerzální s možností realizace různých druhů zapojení definovaných v kapitole: 5.2.1 Počet vstupů.
- Bylo modifikováno stínění pro použití 2 vstupů/výstupů.

<sup>19</sup>Zajišťuje ochranu zařízení dle normy IEC 61000-4-2 Level 4 ESD Protection

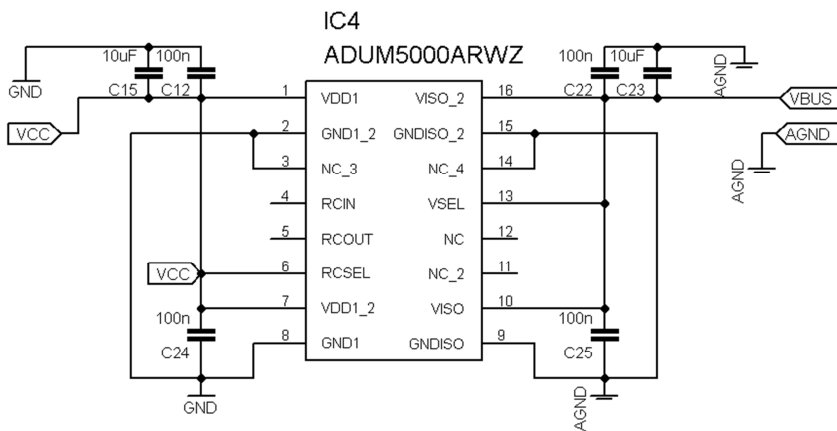
<sup>20</sup>Obvod PCM2902E byl nahrazen obvodem PCM2902C, změny se týkají podpory pro operační systém MS Windows 7. Dále byla vybrána verze PCM2900C, která neobsahuje S/PDIF rozhraní.

## 7.2.1 Schéma zapojení

Hlavní změnou je realizace galvanického oddělení, realizaci zobrazují Obrázek 7-2 a Obrázek 7-3.



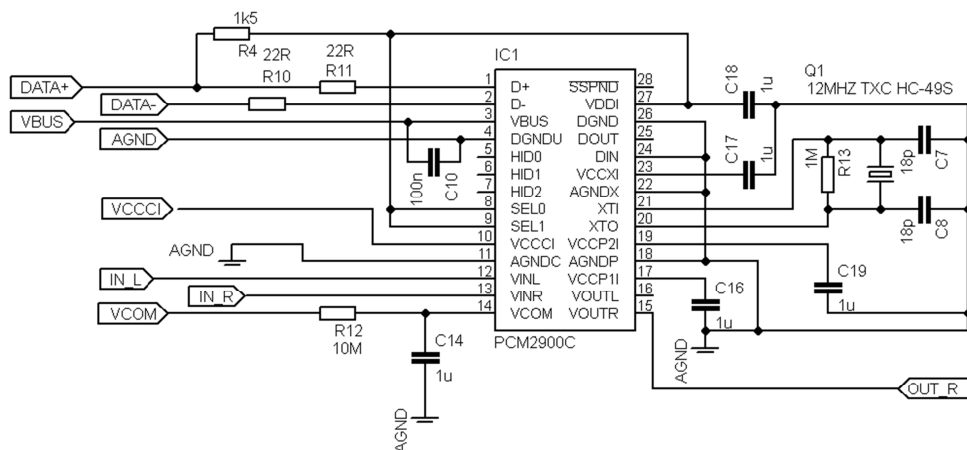
Obrázek 7-2 Galvanické oddělení datových vodičů USB a ochrana proti přepětí



Obrázek 7-3 DC/DC měnič oddělující napájení USB

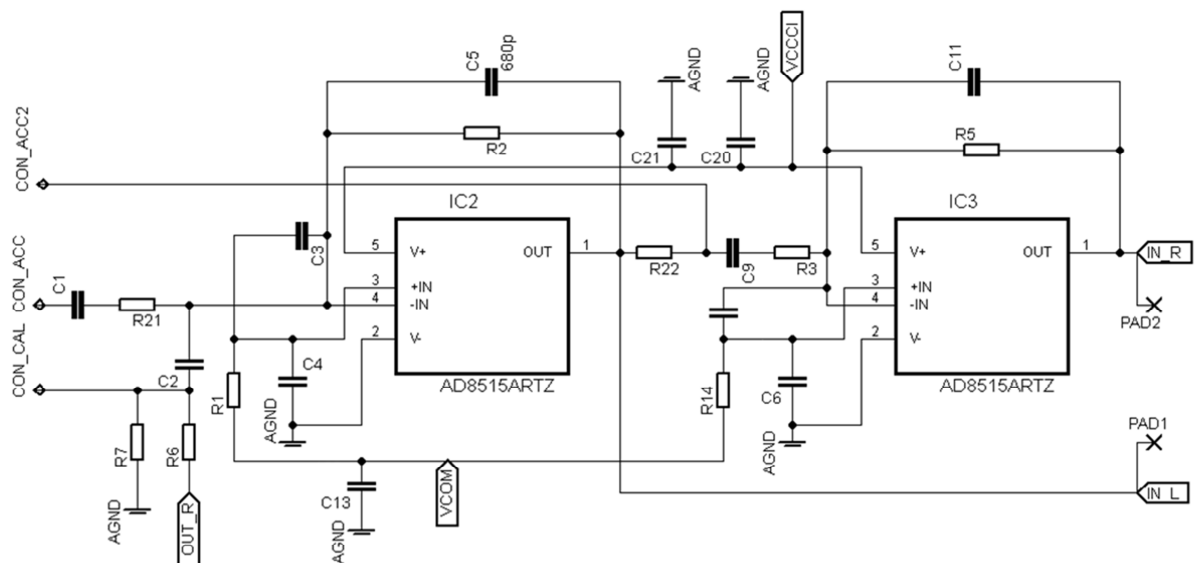
Obrázek 7-4 zobrazuje změněné schéma zapojení audio kodeku. Je změněn typ audio kodeku za PCM2900C, obvod s LED byl přesunut na stranu USB konektoru, viz Obrázek 7-2.





Obrázek 7-4 Změna schématu zapojení audio kodeku PCM2900C

Obrázek 7-5 zobrazuje modifikaci obvodů nábojového zesilovače. Oproti předchozí verzi jsou prohozeny vstupy od zesilovačů do ADC vstupů obvodu PCM2900C. Výstupy ze zesilovačů jsou vyvedeny na PAD1 a PAD2.



Obrázek 7-5 Modifikované schéma zesilovačů

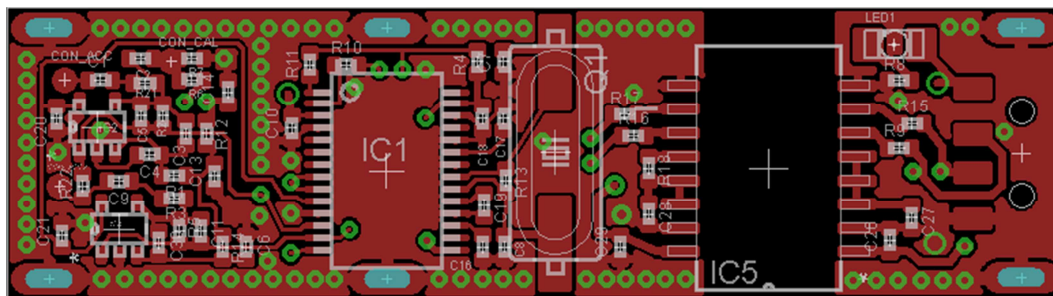
### 7.2.1.1 Modifikace pro koncové použití zařízení

1. Nábojový zesilovač + zesilovač 40 dB
  - Neosadí se: C30 a C11
2. Dva ekvivalentní nábojové zesilovače

- Neosadí se: R22
  - Modifikují se: R3 = R21, R5 = R14 = R1, C9 = C1
3. Výstupy PAD1 a PAD2 lze použít pro měření výstupních napětí zesilovačů digitalizovaných audio kodekem. Tyto výstupy mohou sloužit pro další využití indikační jednotky bez použití PC, nebo je možné jimi budít zesilovače, které budí akční členy (například vibrující stůl).
  4. Testovací bod CON\_CAL lze použít pro připojení sondy přesného kalibrovaného střídavého voltmetru pro kalibraci indikační jednotky.

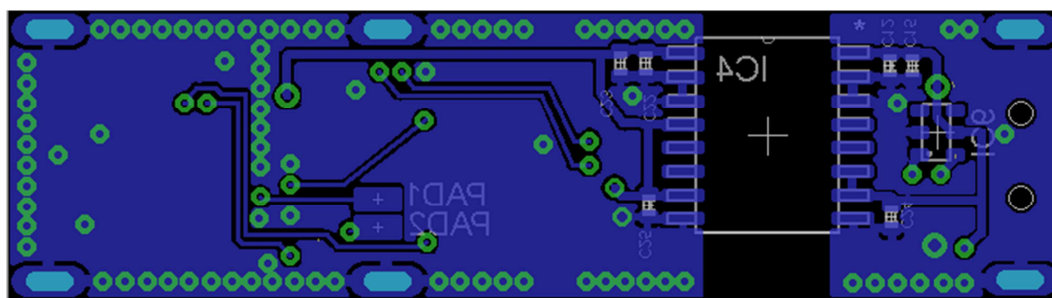
## 7.2.2 Deska plošného spoje

Deska plošného spoje je navržena dvou vrstvá, rozměry byly pozměněny na 15,5 mm × 56,25 mm, byly aplikovány doporučení výrobců použitých integrovaných obvodů. Mezera galvanického oddělení byla navržena co možná nejširší. Stínění prokovenými dírami bylo včleněno mezi měřicí zesilovače a audio kodek – viz Obrázek 7-6. Na spodní straně (viz Obrázek 7-7) byl osazen DC-DC konvertor (IC4), ochrana proti přepětí (IC6) a byly vyvedeny výstupy měřicích zesilovačů (PAD1 a PAD2). Na spodní straně bylo zadáno pro výrobce DPS v jiné vrstvě<sup>21</sup> značení desky včetně označení kanálů, PAD1 odpovídá CH1 (výstup z prvního nábojového zesilovače) a PAD2 odpovídá CH2 (výstup ze zesilovače 40 dB)



Obrázek 7-6 Horní (top) strana DPS

<sup>21</sup> Vrstva „Stop mask“ pro ponechání měděných plošek bez ochranné masky



Obrázek 7-7 Spodní (bottom) strana DPS

### 7.2.3 Konfigurace prototypové desky

Testovací indikační jednotka nese název R711-001-V0D, je vyrobena v konfiguraci dle bodu 1 v kapitole: 7.2.1.1 (nábojový zesilovač a zesilovač 40 dB).

## 8 Zkouška vlastností indikační jednotky

Takto se zkouší pouze první vyrobená indikační jednotka pro definici korekčních filtrů a přenosu kontrolního kanálu.

Kalibrace prototypu byla provedena upraveným software pro kalibraci snímačů zrychlení, popsaného v Bakalářské práci [8]. Software pracuje na principu vygenerování „WAV“ souboru. Tento soubor se přehrává do výstupního zařízení a zároveň se synchronně nahrává vstup do druhého „WAV“ souboru. Vzhledem k tomu, že se data nahrávají synchronně a je znám původ budícího signálu, je možnost pro kalibraci využít výhody synchronní detekce.<sup>22</sup>

Software byl modifikován o možnost nastavovat různé úrovně hlasitosti a tak automatizovaně generovat různou úroveň hladiny budícího signálu. Dále byl software rozšířen o RS-232 komunikační kanál pro komunikaci s přístrojem Keithley 2000.

Pro potřeby kalibrace indikační jednotky je nejprve nutné přesně znát hodnotu kapacity kondenzátoru C2 (viz Obrázek 7-5). Dále je nutné připojit sondu přesného kalibrovaného voltmetru do bodu CON\_CAL (viz Obrázek 7-5).

Přístroj je možné tímto způsobem kalibrovat s vysokou přesností. Od frekvence 2 kHz do frekvence 10 kHz lze tuto kalibraci použít bez požadavku na přesný fázový posuv.

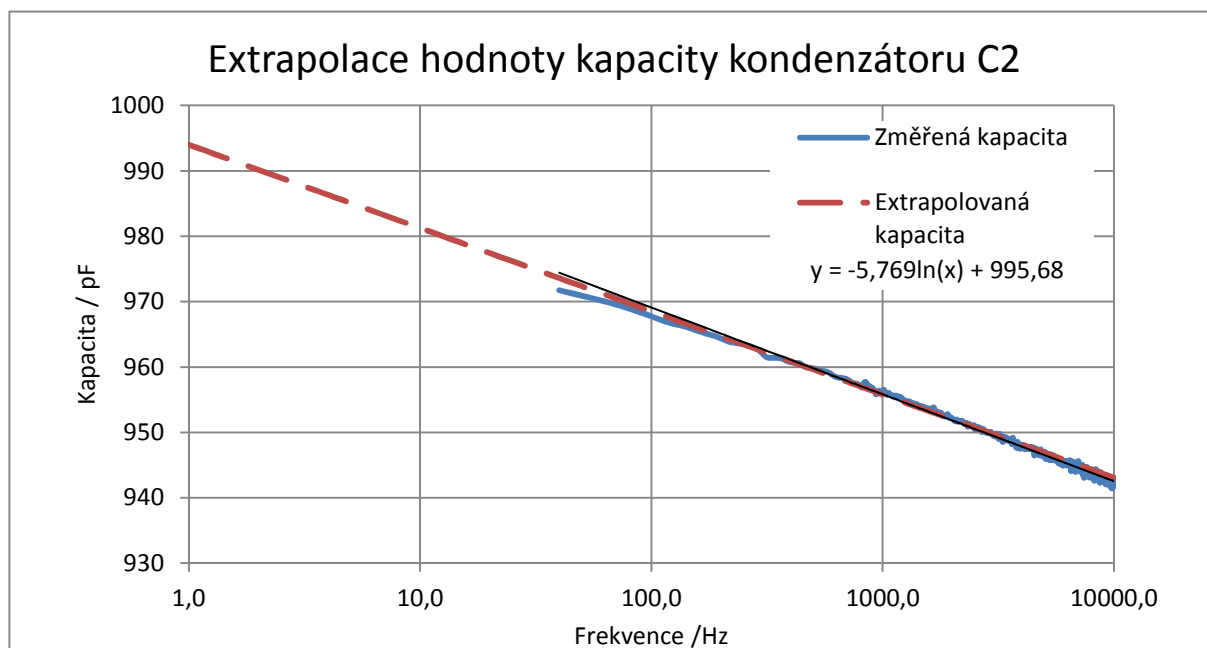
Pokud se bude uvažovat sériová výroba, tento kanál bude zachován, ale kalibrace se provede až na výstupu externím kalibrovaným generátorem za použití software DEWESoft s implementovanými filtry. Tento kanál bude sloužit především pro test citlivosti přístroje

<sup>22</sup> Více o použité synchronní detekci viz Bakalářská práce [8].

před zahájením měření.

## 8.1 Kalibrace kondenzátoru C2

SMD Kondenzátor C2 byl změřen kalibrovaným můstkem Agilent 4294A. Tento můstek změřil kapacitu kondenzátoru od frekvence 40 Hz do frekvence 10 kHz s přesností  $\pm 20$  ppm, dále byl průběh proložen logaritmickou funkcí<sup>23</sup> (viz Obrázek 8-1) pro orientační doplnění hodnot pro nízké frekvence.



Obrázek 8-1 Extrapolace hodnoty kapacity kondenzátoru C2

## 8.2 Použití přístroje pro kalibraci

### Multimetr

Keithley 2000

Multimetr použitý jako střídavý voltmetr a špičkový detektor

Stejnoseměrný voltmetr (detektor maximálních hodnot):

Rozsah:	Rozlišení:	Přesnost:
100.0000 mV	0,1 $\mu$ V	50 + 35

<sup>23</sup> Funkce MS Excel – Graf – Spojnice trendu.

1.000000 V      1,0  $\mu$ V      30 + 7

Přesnost:  $\pm$  (ppm z měřeného údaje + ppm z rozsahu), kde 10 ppm = 0,001 %.

Střídavý voltmetr:

Rozsah:      Rozlišení:      Přesnost pro frekvence:

		3 Hz - 10 Hz	10 Hz – 10 kHz
100,0000 mV	0,1 $\mu$ V	0,35 + 0,03	0,06 + 0,03
1,000000 V	1,0 $\mu$ V	0,35 + 0,03	0,06 + 0,03

Přesnost:  $\pm$  (% z měřeného údaje + % z rozsahu)

### Osobní počítač

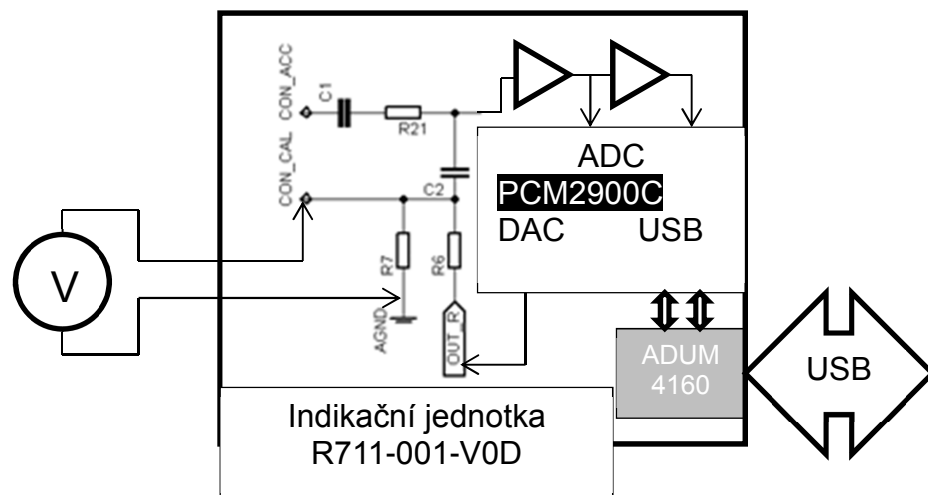
Notebook - HP ProBook 4520

- Operační systém: Windows 7, 64 bit

### Software pro analýzu naměřených dat

MS EXCEL – Software pro kalibraci snímačů zrychlení dle bakalářské práce [8], program byl modifikován pro potřeby kalibrace indikační jednotky.

## 8.3 Schéma měření



Obrázek 8-2 Schéma kalibrace prototypu R711-001-V0D

## 8.4 Průběh měření

### 8.4.1 Kalibrace v pásmu frekvencí od 1 Hz do 3.125 Hz

V pásmu těchto frekvencí se multimetr Keithley 2000 použije pro měření špičkové hodnoty harmonického napětí. Po nahrání vzorů se ze statistik měření z paměti vyčtou minimální a maximální hodnoty, jejich rozdílem se určí rozkmit a dále vypočte efektivní hodnota signálu<sup>24</sup>.

### 8.4.2 Kalibrace v pásmu frekvencí od 3.125 Hz do 31.25 Hz

V tomto pásmu se multimetr použije jako měřič střídavé efektivní hodnoty napětí. Měření probíhá v režimu „SLOW“ pro přesné měření na nízkých frekvencích.

### 8.4.3 Kalibrace v pásmu frekvencí od 31.25 Hz do 10 kHz

V tomto pásmu se multimetr použije jako měřič střídavé efektivní hodnoty napětí. Měření probíhá v režimu „MED“ pro přesné měření na nízkých frekvencích.

### 8.4.4 Pro všechny pásma frekvencí od 1Hz do 10 kHz

Pro získání údaje o budícím náboji nábojového zesilovače je třeba efektivní hodnotu napětí na dané frekvenci násobit s daným údajem kapacity pro danou frekvenci. Odměr vzorků multimetrem Keithley se spustí v definovaný čas, který je potřebný pro ustálení měřeného napětí.

Algoritmus v programu Excel poté vypočítá širokospektrou složku efektivní hodnoty v bitech a synchronní složku v bitech z deseti po sobě jdoucích period. Následně se z naměřených dat vykreslí frekvenční charakteristika pro danou amplitudu budícího napětí (náboje).

## 8.5 Výsledky kalibrace

Výsledkem kalibrace jsou frekvenční charakteristiky pro vzorkovací frekvenci  $f_{vz} = 44.1 \text{ kHz}$ <sup>25</sup>. Tyto charakteristiky jsou dále vyhodnoceny pro návrh korekčních filtrů a pro tabulku linearizace. Pro vyhodnocení parametrů korekčních filtrů byly naměřené

<sup>24</sup> Předpokladem je sinusový průběh měřené veličiny.

<sup>25</sup> Na této vzorkovací frekvenci je udáván nejlepší poměr celkového harmonického zkreslení včetně nespecifikovaného šumu „TOTAL HARMONIC DISTORTION + NOISE“ a Také nejlepší poměr signal/šum „SNR“ téměř 96 dB. Více viz Datasheet integrovaného obvodu PCM2900C, str. 11.

frekvenční charakteristiky porovnány s modelovou frekvenční charakteristikou.

### 8.5.1 Modelová frekvenční charakteristika

Tato charakteristika je dána modelem přenosu indikační jednotky. Měřicí řetězec se skládá z dvou dominantních přenosů: nábojového zesilovače a hornofrekvenční propusti eliminující stejnosměrnou složku měřeného signálu. Přenos je dán vztahem (8-1):

$$H(s) = H_{NZ}(s) \cdot H_{HPF}(s) = \quad (8-1)$$

$$= \frac{-1}{C_5 \left(1 + \frac{1}{R_2 \cdot C_5 \cdot s}\right)} \cdot \frac{s}{s + \omega_0} \cdot K_{bit/V} \cdot K_{Acc} \cdot K_{Kor} \quad (8-2)$$

$$H(s) = \frac{-1}{680 \cdot 10^{-12} \left(1 + \frac{1}{680 \cdot 10^{-3} \cdot s}\right)} \cdot \frac{s}{s + 21,61} \cdot \frac{2^{16}}{1,98} \cdot 10^{-12} \cdot K_{Kor} \quad (8-3)$$

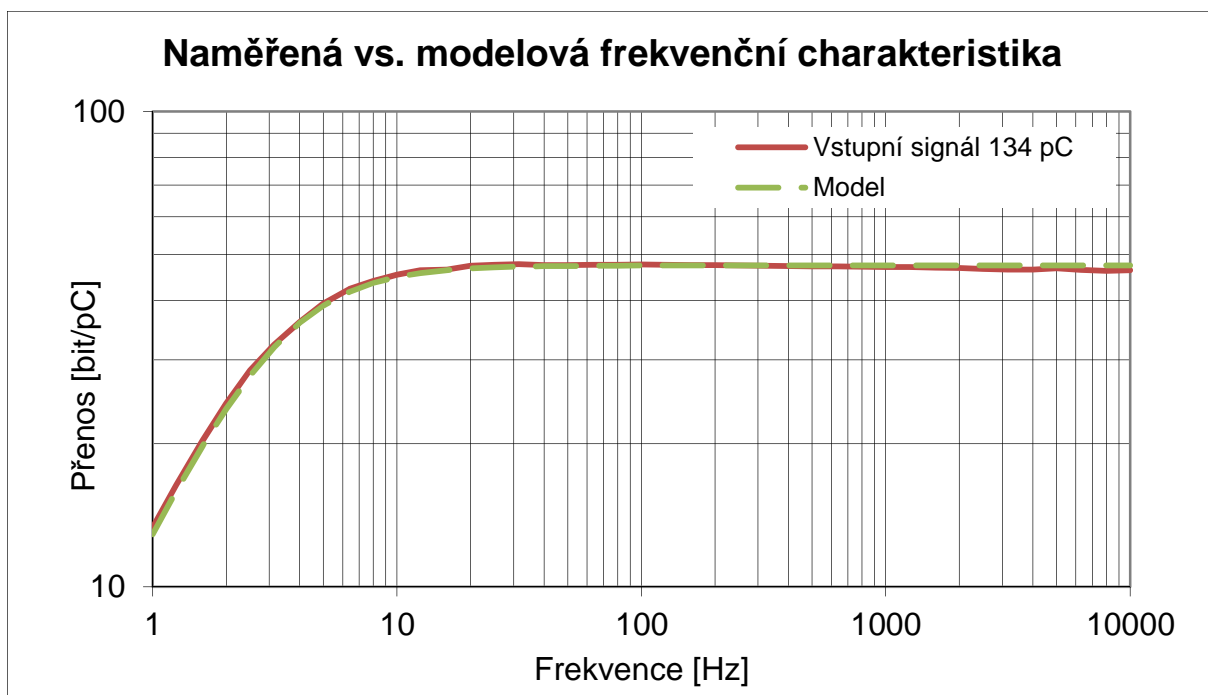
Kde  $R_2$  je hodnota zpětnovazebního odporu,  $C_5$  je hodnota kapacity integračního kondenzátoru (viz Obrázek 7-5) a  $\omega_0$  je mezní frekvence integrovaného HPF daná vztahem:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,078 \cdot f_{VZ}}{1000} \quad (8-4)$$

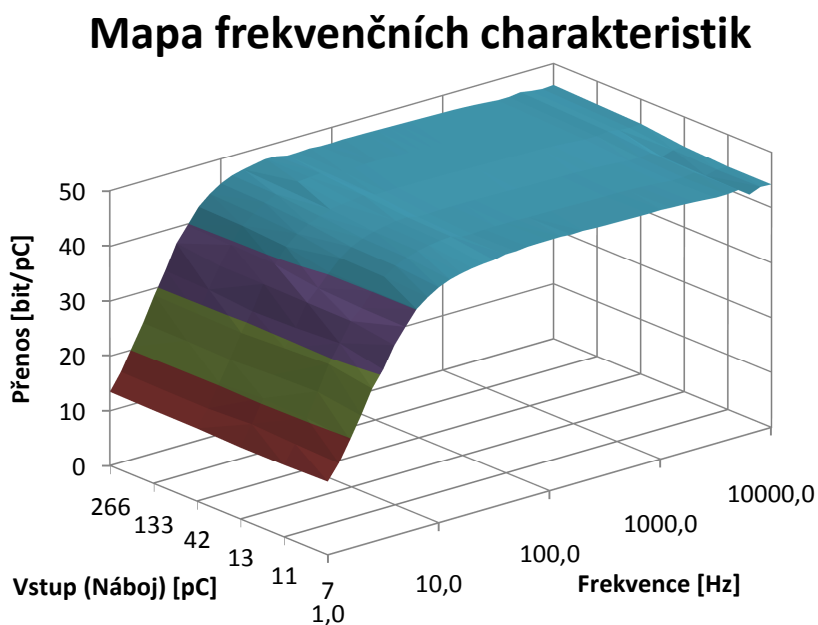
$K_{Kor}$  je konstanta, která se nastaví tak, aby modelová frekvenční charakteristika odpovídala změřené frekvenční charakteristice na dané amplitudě budícího signálu a příslušného kanálu.

Pro nalezení optimálního zesílení  $K_{Kor}$  modelové frekvenční charakteristiky bylo zvoleno kritérium minimalizace sumy čtverců odchylek od naměřené charakteristiky, ukázkové překrytí průběhů – viz Obrázek 8-3.

Tak se získá sada hodnot korekčních konstant pro vybrané amplitudy, které se dále využijí pro korekci linearit dynamického rozsahu, odchylky od linearit zobrazuje Obrázek 8-4.



Obrázek 8-3 Frekvenční charakteristika modelu a změřená frekvenční charakteristika

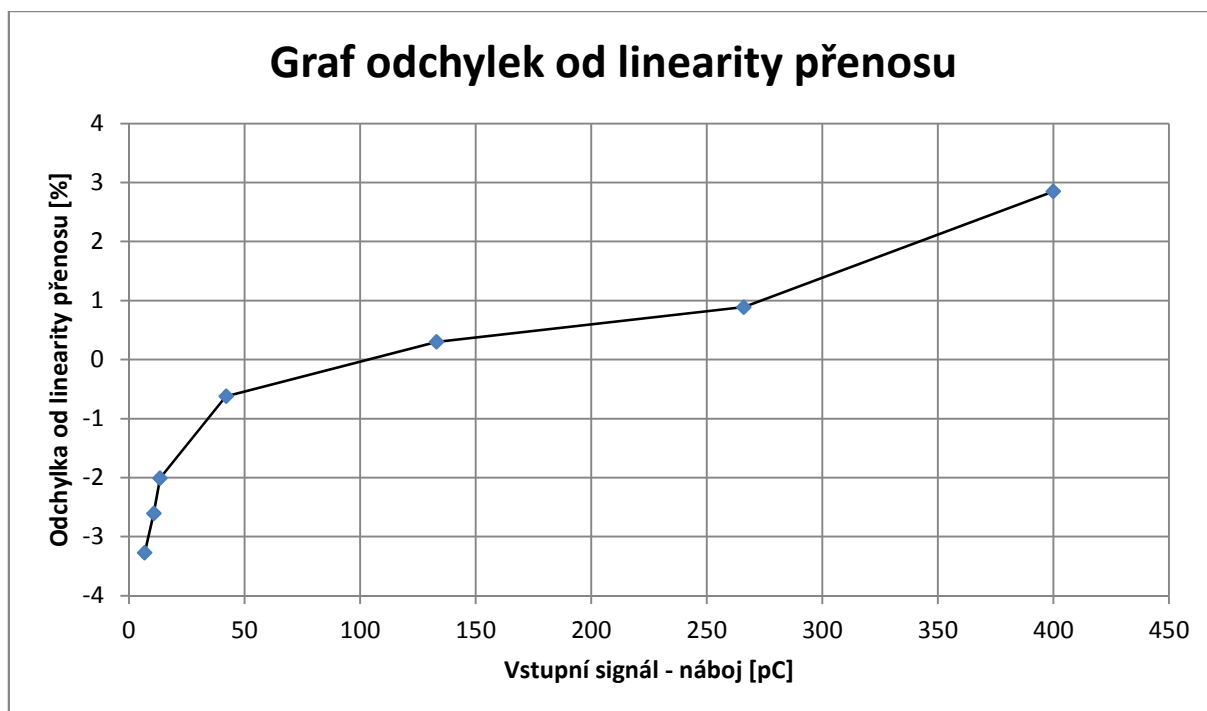


Obrázek 8-4 Mapa frekvenčních charakteristik

### 8.5.2 Linearita přenosu

Výslednou křivku odchylek od lineárního průběhu zobrazuje Obrázek 8-5. Průběh grafu bude zohledněn při návrhu software pro kompenzaci odchylky od linearity.





Obrázek 8-5 Graf odchylek od linearity přenosu (vztaženo k buzení nábojem 100 pC)

## 9 Softwarové prostředí

Softwarovým prostředím se rozumí uživatelsky nastavitelné prostředí osobního počítače.

### 9.1 Nastavení pro operační systém

Indikační jednotka, tak jak je navržena nevyžaduje speciální software, ani ovladače. Pro operační systémy MS Windows XP a novější jsou ovladače k dispozici ze serveru Microsoft, pro jejich instalaci postačí internetové připojení a instalovány jsou automaticky.

V operačním systému je nutné vybrat jako výchozí zvukové záznamové zařízení „USB Audio Codec“. Pro indikační jednotku pod operačním systémem Windows 7 je výchozí název záznamového zařízení „Řádek“<sup>26</sup>. V případě Windows XP je postup obdobný.

Následně je nutné nastavit ovladačem hlasitosti (pokud je k dispozici) hlasitost nahrávané stopy na maximum a zvolit výchozí formát záznam: 2 kanály, 16 bit, se vzorkovací frekvencí 44 100 Hz. Tím je nastavení v prostředí Windows dokončeno.

---

<sup>26</sup> Výrobce definovaný název pro integrovaný obvod PCM2900C lze změnit při výrobě série integrovaných obvodů.

## 9.2 Software DEWESoft

Pro zpracování měřených dat, implementaci korekčních filtrů a záznam měření byl vybrán software externího dodavatele (firma Dewetron). Software je určen především pro zpracování signálu z měřicích modulů firmy DEWETRON – PRAHA spol. s r. o. Software ve verzi 7.1.0 je k dispozici měření dat ze zvukové karty jako demoverze<sup>27</sup>. Použitá verze programu je k dispozici na internetových stránkách dodavatele:

<http://www.dewesoft.com/download>.

## 9.3 Stanovení nábojové citlivosti a rozsahu

Nábojová citlivost nábojového zesilovače je v základním nastavení stanovena vztahem (8-3) při frekvenci 80 Hz.

$$Q_{CH} = \frac{1}{680} = 1,471 \text{ pC/mV} \quad (9-1)$$

Program Dewesoft používá pro zvukové karty možnost přeškálování původních mezních hodnot zvukové karty, kdy limity jsou nastavené na + 5 V a -5 V, tyto limity neodpovídají reálnému použitému ADC, ale definují limitní hodnotu (ta je ve skutečnosti -0,99 V a +0,99 V pro použitý ADC). Pro kanál CH1 bylo pro hodnotu -5 V zvoleno 680 pC a pro hodnotu +5 V bylo zvoleno -680 pC. Tím je stanoven základní rozsah a zesílení.

Pro kanál CH2 bylo pro hodnotu -5 V zvoleno -6,59658 pC a byl zachován počátek. Těmito hodnotami jsou kanály shodně nastaveny a výstupem z kanálu je shodné číslo, které je úměrné velikosti vstupního náboje v pC. Kalibrací se určí pouze konstanta, kterou se daný kanál násobí.

Je ale důležité zmínit, že výstupními údaji z indikační jednotky jsou údaje vibračního zrychlení v jednotkách  $\text{m/s}^{-2}$ , údaje mohutnosti vibrací v jednotkách  $\text{mm/s}$  a údaje vibrační výchylky v  $\mu\text{m}$ . Při předpokladu použití indikační jednotky s jedním akcelerometrem, pro který se provede kalibrace, se parametr nábojová citlivost neudává, v případě nutnosti se určí ze zadaných kalibračních konstant.

---

<sup>27</sup> Pro komerční použití je nutné konzultovat s dodavatelem software podmínky použití.

## 9.4 Správa senzorů

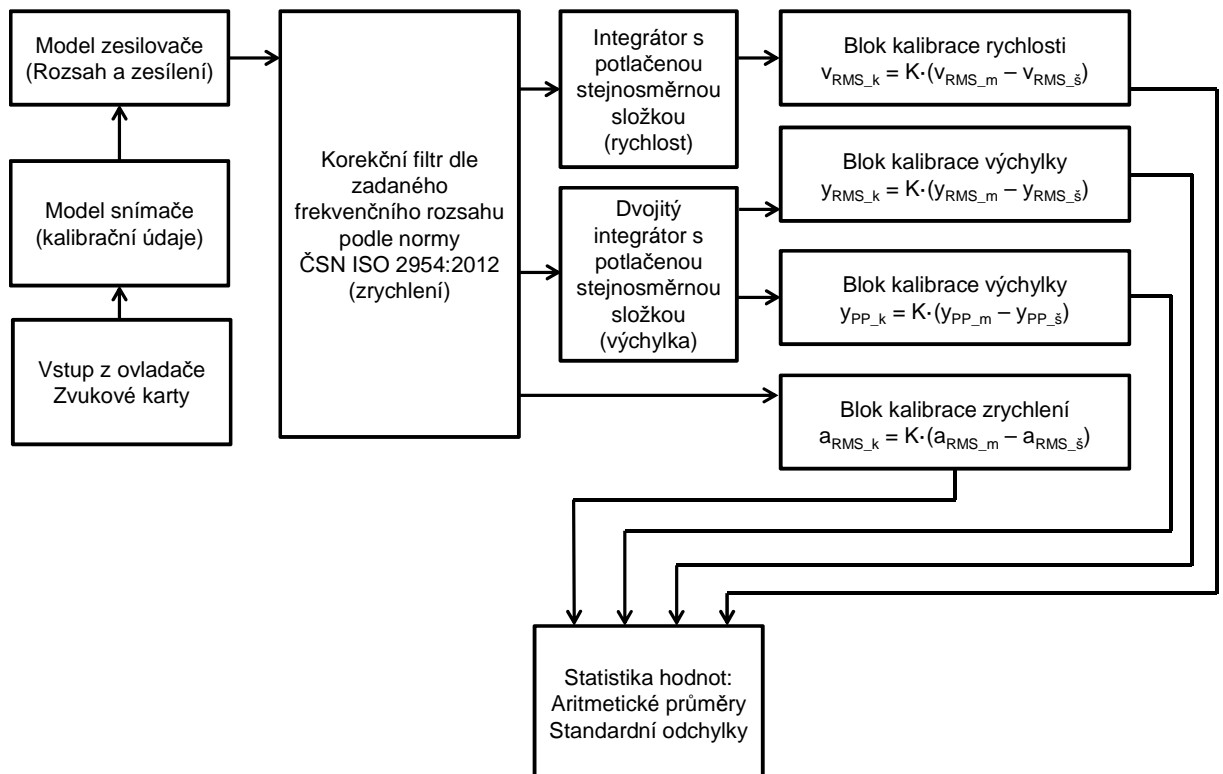
Program Dewesoft poskytuje databázi senzorů. Do této databáze se uloží frekvenční charakteristika a tabulka linearizace senzoru, případně další údaje o kalibraci senzoru, údaje o vstupní měřené veličině a výstupní veličině ze senzoru. Soubory s korekčními filtry jsou po kalibraci indikační jednotky nastavené pro měření s dodaným akcelerometrem dle této databáze senzorů.

## 9.5 Měřicí prostředí

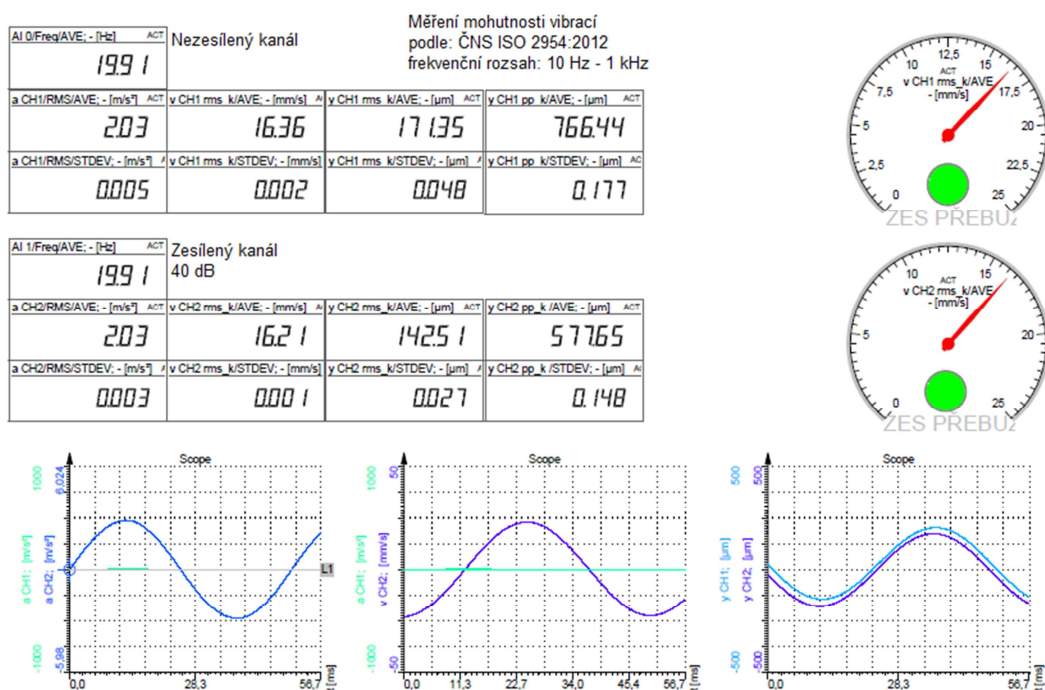
Pro měření byl vypracován měřicí algoritmus v prostředí programu Dewesoft, Obrázek 9-1 zobrazuje blokové schéma algoritmu pro zpracování signálu, tento kanál je aplikován pro každý měřicí kanál.

Dále byl algoritmus doplněn o indikaci přebuzení zesilovačů. Tento algoritmus hlídá vstupní signál a v případě, že se vyskytne i krátkodobý výskyt špičky v měřeném signálu, indikuje se na dobu 100 ms znamení o přebuzení vstupních zesilovačů.

Uživatelské prostředí tvoří displeje se statistickými údaji. Dobu průměrování je možné nastavit. Výstupem jsou zprůměrované hodnoty a standardní odchylky za jednotlivé časové úseky. K dispozici jsou také osciloskopy pro zobrazení průběhu všech veličin, indikace přebuzení a dle doporučení normy ČSN ISO 2954:2012 jsou k dispozici i ručkové ukazatele pro rychlý odečet měřené veličiny a orientační údaj o frekvenci signálu.



Obrázek 9-1 Blokové schéma měřicího algoritmu



Obrázek 9-2 Obrázek uživatelského prostředí (uvedené údaje před kalibrací)

Program Dewesoft nabízí také širokou možnost FFT filtrace s širokou paletou nastavení: řádkové rozlišení (až 16 384 čar), typ okna, typ zobrazované hodnoty (požadované výkonové spektrum) a průměrování. Tím je splněn požadavek pro použití dle normy RTCA/DO-160C.

## 9.6 Návrh korekčních filtrů

Pro použití indikační jednotky v celém frekvenčním pásmu do 2 Hz do 2 kHz je potřeba průběh frekvenčních charakteristik linearizovat. Pro korekci je použito IIR<sup>28</sup> filtrů. Ty jsou vybrány především pro možnost použití na výpočetně slabém PC. Dále lze použít např. FIR filtry, nebo FFT filtry. Vstupem pro frekvenční filtry je přenos daný normou ČSN ISO 2954:2012, nebo přenos daný modifikací této normy pro rozšířené frekvenční pásmo definované sadou norem ČSN ISO 10816 (všechny díly). Druhým vstupem je přenos definovaný frekvenční charakteristikou indikační jednotky – viz kapitola 8.5.1. Všechny filtry jsou sestaveny za pomoci programů Matlab a MS Excel.

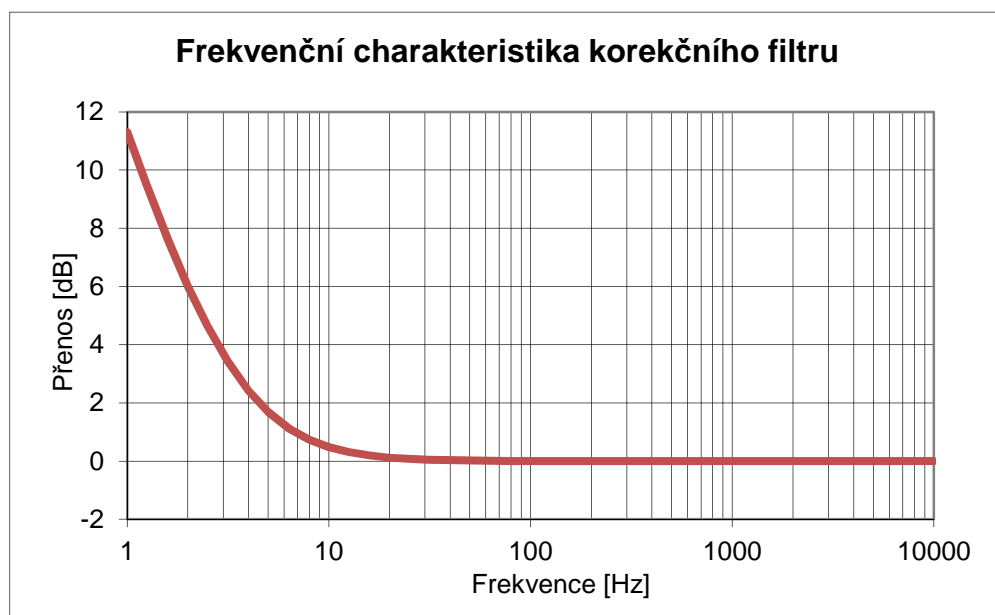
Modely filtrů jsou vypočítány ve spojitě časové oblasti v softwaru Matlab a funkcí c2d

<sup>28</sup> IIR filtr je filtr s nekonečnou impulsní odezvou, na rozdíl od FIR filtru, který má konečnou impulzní odezvu, více informací viz publikace Analogové a číslicové filtry [10].

za použití metody invariantní impulzní<sup>29</sup> odezvy se převedou na diskretní verzi. Takto získané filtry jsou implementovány v programu Dewesoft. Implementace probíhá vyčtením koeficientů filtru pomocí fvtool. Získané koeficienty se zkopírují do nastavení uživatelského filtru, tak jak předepisuje uživatelský manuál programu Dewesoft.

### 9.6.1 Model filtru v časově spojitě oblasti

Nejprve je třeba vypočítat přenos indikační jednotky, ten je dán vztahem (8-3). K získanému přenosu indikační jednotky  $H(s)$  se vypočítá inverzní přenos  $H_K(s) = 1/H(s)$ . Tím je definován linearizační filtr, který je základem pro všechny následující filtry. Průběh korekčního filtru zobrazuje Obrázek 9-3.



Obrázek 9-3 Základní korekční frekvenční charakteristika

Přenos korekčního filtru<sup>30</sup> uvádí následující vztah (9-2):

$$H_K(s) = \frac{-4,63 \cdot 10^{-10} s^2 - 2,33 \cdot 10^{-8} s - 3,33 \cdot 10^{-8}}{4,625 \cdot 10^{-10} s^2} \quad (9-2)$$

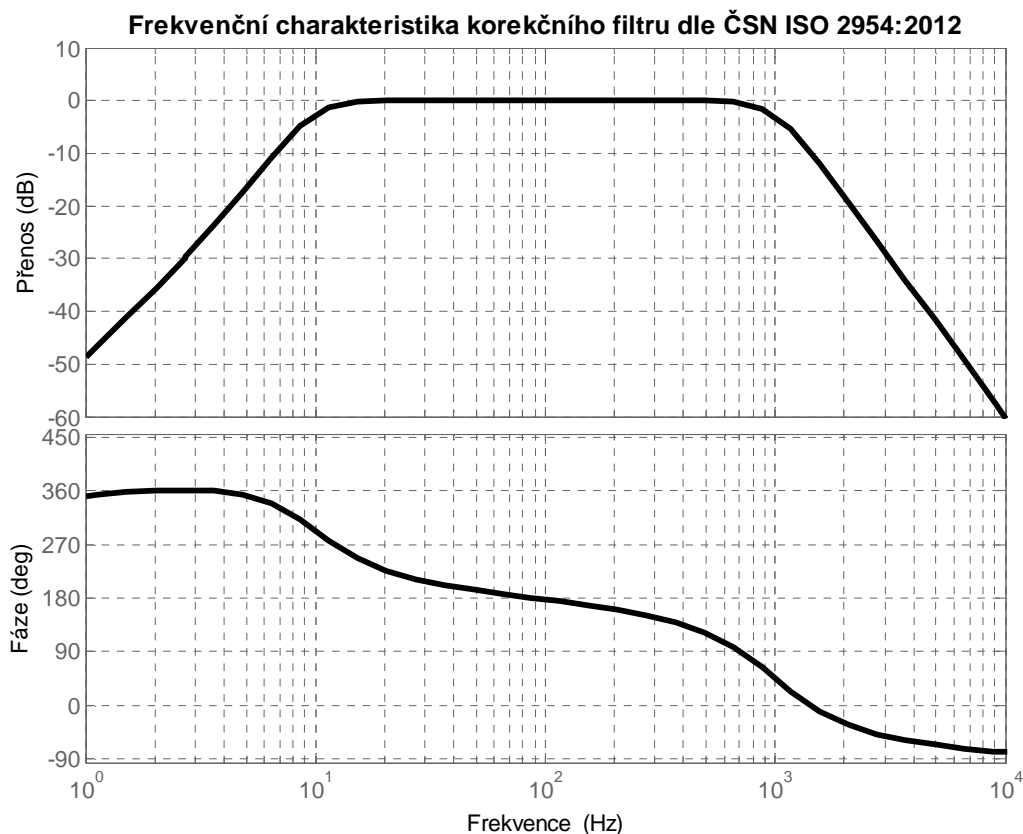
### 9.6.2 Filtr dle normy ČSN ISO 2954:2012

Uvedená norma [4] definuje frekvenční pásmo pro měření mohutnosti vibrací

<sup>29</sup> Převod z časově spojitě oblasti do časově diskretní je možný pouze touto metodou, jelikož jako jediná zachovává tvar frekvenční charakteristiky a polohy mezních frekvencí.

<sup>30</sup> Tento přenos nelze použít tak, jak uvádí vztah (10-1) bez zařazení filtru dolní propust, jelikož zesiluje nízkofrekvenční šum.

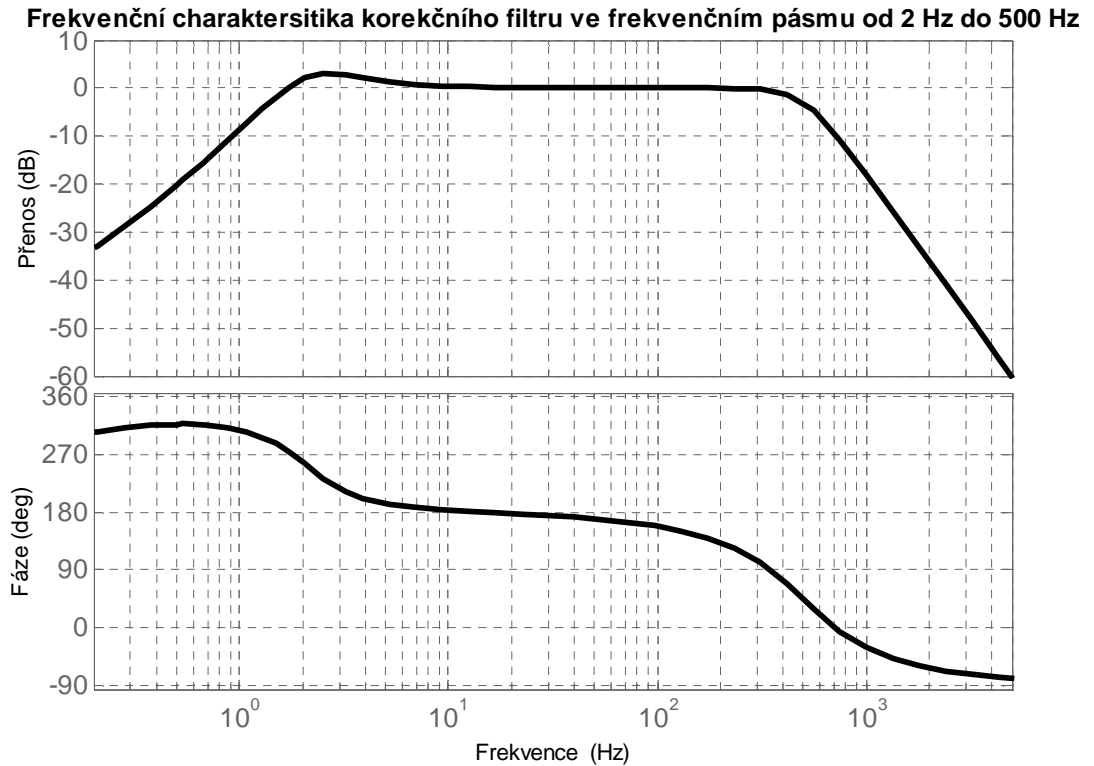
o mezních frekvencích 10 Hz a 1 kHz definovaným způsobem od frekvence 1 Hz do frekvence 10 kHz. Tuto charakteristiku definují vztahy (1-1) až (1-5) a je bezpodmínečně tento tvar dodržet. Výsledný přenos korekčního filtru zrychlení zobrazuje Obrázek 9-4. Korekční přenos se na frekvenční charakteristice projeví snížením útlumu na frekvenci 1 Hz, místo normou předepsaných -60 dB má definovaných -48,5 dB.



Obrázek 9-4 Frekvenční charakteristika korekčního filtru dle normy ČSN ISO 2954:2012

### 9.6.3 Filtr pro frekvence od 2 Hz do 500 Hz

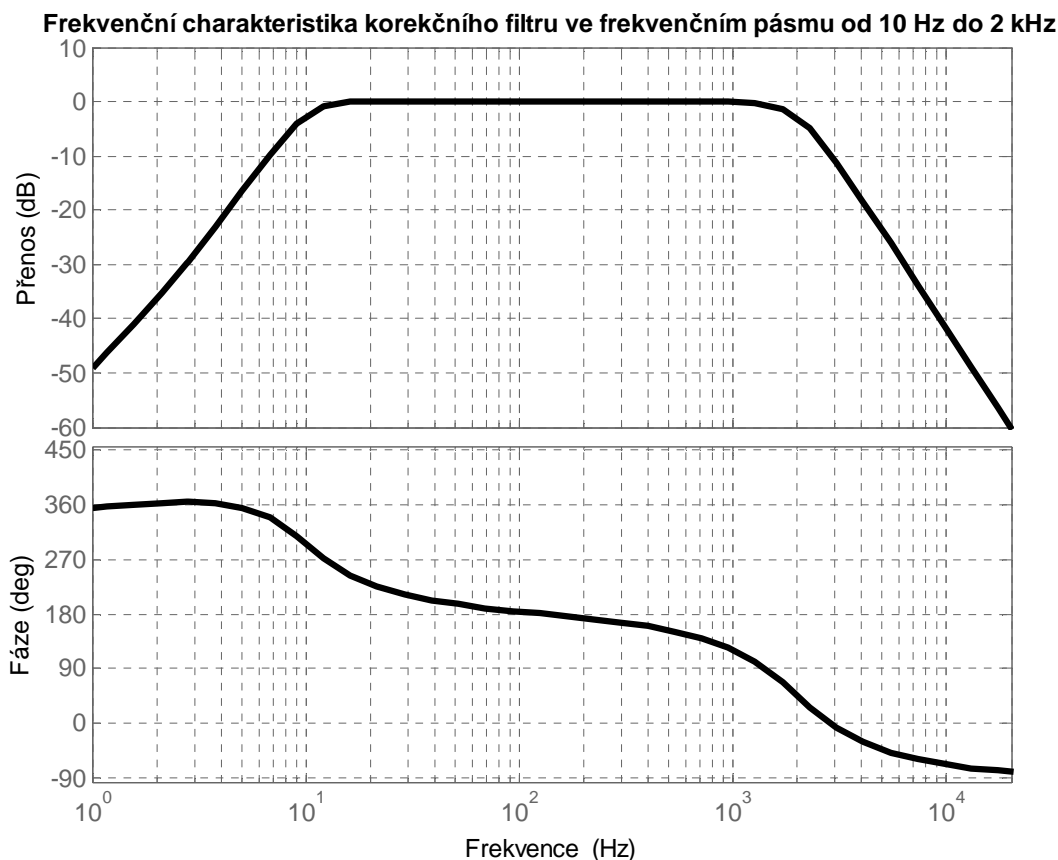
Pro splnění požadavku zadání a vyhovění normě ČSN ISO 10816 (částí 2 až 7) na možnost měření mohutnosti vibrací u různých typů strojů a pro splnění obecného zadání byl implementován filtr pro měření mohutnosti vibrací na frekvenčním pásmu od 2 Hz do 500 Hz. Průběh frekvenční charakteristiky korekčního filtru zobrazuje Obrázek 9-5, kde je patrný zásah korekčního filtru (maximum je 2,95 dB na frekvenci 2,5 Hz). Na frekvenci 0,2 Hz je přenos korigován korekčním filtrem dle vztahu (9-2), hodnota přenosu je -33,5 dB na místo vztahem (1-1) definovaných -60 dB.



Obrázek 9-5 Frekvenční charakteristika korekčního filtru s mezními frekvencemi 2 Hz a 500 Hz

#### 9.6.4 Filtr pro frekvence od 10 Hz do 2000 Hz

Tento filtr slouží pro možnost použít zařízení v souladu s poznámkami uvedenými v normě ČSN ISO 10816 (části 2 až 7) pro možnost použít zařízení pro diagnostické účely a pro splnění obecného zadání na požadovaný frekvenční rozsah měření do 2 kHz. Korekční přenos se na frekvenční charakteristice projeví snížením útlumu na frekvenci 1 Hz na definovaných -48,5 dB namísto normou předepsaných -60 dB.



Obrázek 9-6 Frekvenční charakteristika korekčního filtru s mezními frekvencemi 10 Hz a 2 kHz

### 9.6.5 Integrátory a odstranění šumu

Pro získání informace o rychlosti a výchylce měřeného signálu je normami ČSN ISO 2954:2012 a ČSN ISO 10816 (všechny části) dovoleno použít integrace měřeného zrychlení. Program Dewesoft poskytuje funkci jednoduchého integrátoru a dvojitého integrátoru. Integrátory poskytují možnost eliminace stejnosměrné složky měřeného signálu, která je použita pro potlačení nízkofrekvenčního šumu. Vstupem do integrátorů je korigovaný a znormovaný signál úměrný měřenému zrychlení, korekce a normování je tak provedena i pro hodnotu rychlosti a výchylky.

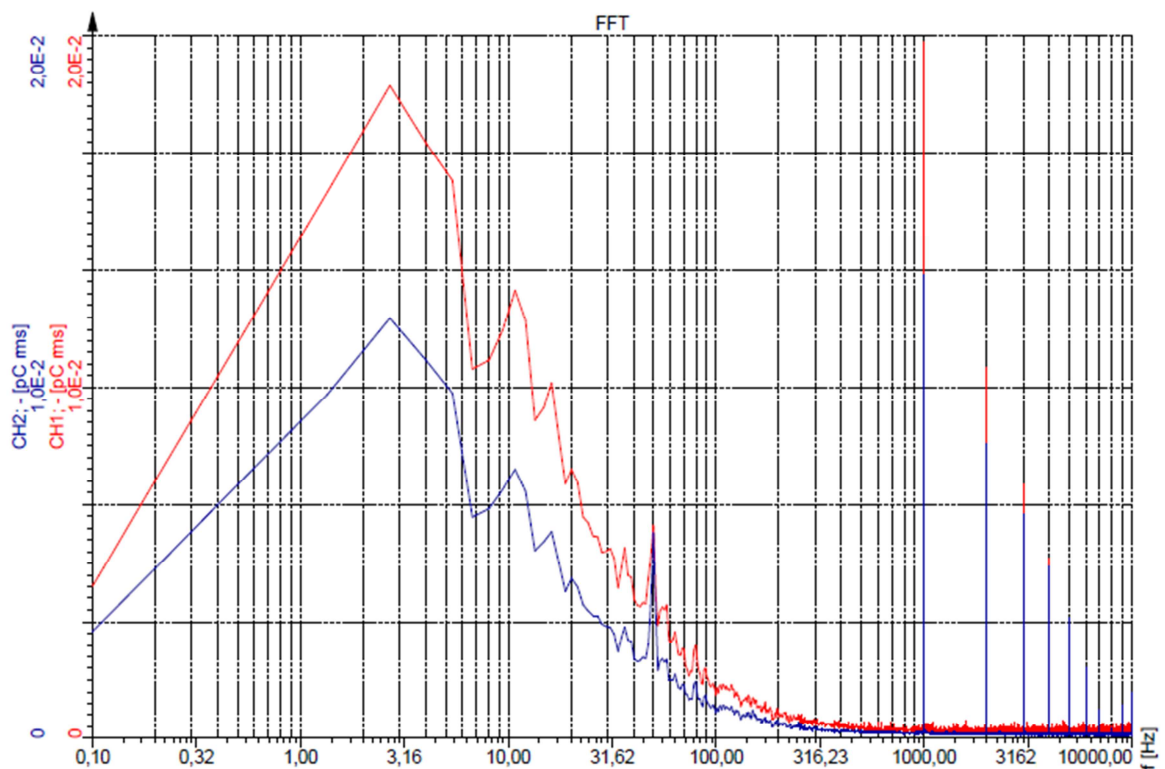
### 9.6.6 Vlastní šum indikační jednotky

Každé měření je zatíženo šumem, v této kapitole je nastíněno, jaký šum lze předpokládat a jak se negativně projeví na výsledných charakteristikách indikační jednotky. Jako hlavní zdroj šumu u nízkofrekvenčního obvodu s operačním zesilovačem lze označit tzv.  $1/f$  (blikavý šum operačního zesilovače), pro zapojení nábojového zesilovače je to případ šumu, který je ovlivněn zpětnovazebním rezistorem  $R_2$ , dle publikace [2] je šum tím vyšší, čím nižší je hodnota odporu zvoleného zpětnovazebního



rezistoru

Programem Dewesoft je možné získat základní přehled o vlastním rušení indikační jednotky. Při zapojení vstupní kapacity 1000 pF byla naměřena FFT analýza vlastního rušení, viz Obrázek 9-7. Z charakteristiky je patrný zvyšující se trend napětového<sup>31</sup> šumu rušení s klesající hodnotou frekvence. Tento šum je nutné eliminovat, nejjednodušším způsobem je změřit hodnotu šumu a tuto hodnotu od naměřené a (integrované) hodnoty odečíst. Jelikož se překrývá spektrum šumu a měřeného signálu bylo by vhodným řešením využít vlnkové transformace a rušení pomocí ní odfiltrovat, bohužel program Dewesoft tuto funkci neposkytuje.



Obrázek 9-7 Analýza vlastního šumu indikační jednotky

### 9.6.7 Volba filtru horní propust integrátorů

Vzhledem k přítomnému rušení v měřeném spektru frekvencí musí být integrátory doplněny o filtry typu horní propust. Vzhledem k povaze širokopásmového měření mohutnosti vibrací je obtížné nastavit zmíněný filtr horní propust pro vhodný útlum na nízkých frekvencích (pro splnění podmínek daných normou ČSN ISO 2954:2012) a zároveň pro dostatečný odstup signál/šum na vysokých frekvencích, kdy složka

<sup>31</sup> Operační zesilovač má vstupní unipolární architekturu, proudový šum se neuplatní

nízkofrekvenčního šumu je integrátorem zesílena a velmi tak ovlivňuje výpočet RMS hodnot výstupních veličin z integrátorů. Tento problém lze vyřešit vhodnou kombinací filtru horní propust a odečítáním příspěvku RMS hodnot nízkofrekvenčního šumu po integraci. Tato metoda vyžaduje cyklické testování řešení z důvodu povahy přítomného šumu. Programem Dewesoft je umožněn rychlý náhled na frekvenční charakteristiku hornofrekvenční propusti integrátoru a aktuální hodnotu výstupu z integrátoru.

## 10 Kalibrace

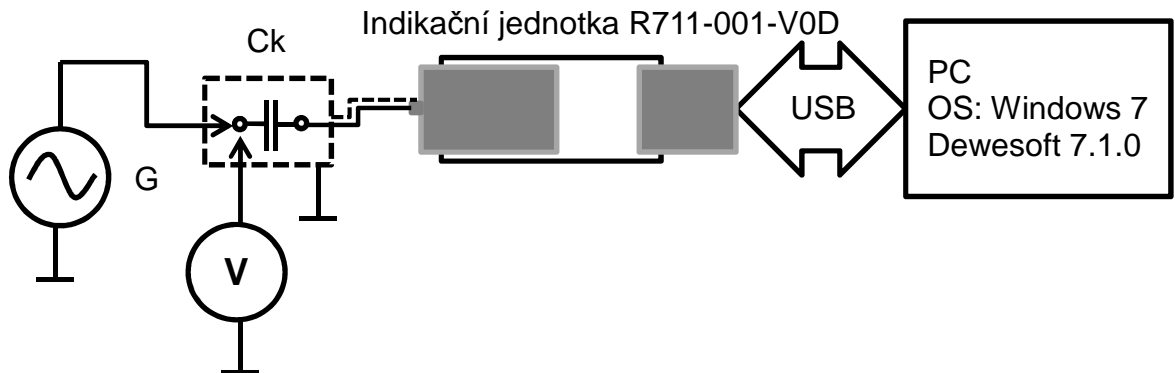
Poté co byly nastaveny jednotlivé filtry, byla indikační jednotka kalibrována. Hodnota kalibrační konstanty zaručí shodnou hodnotu výstupních veličin zrychlení, rychlosti a výchylky, jako vypočítané veličiny úměrné vstupnímu signálu na frekvenci 80 Hz. Odstraněním ekvivalentní hodnoty šumu se zlepší odstup signál/šum na vysokých frekvencích a tím se sníží chyba z rozsahu měřené veličiny.

Jelikož výstupními veličinami jsou údaje o zrychlení, rychlosti a výchylce vstupních vibrací, korekční konstantou se koriguje přenos celého systému tak, aby byl  $1 \text{ ms}^{-2}/\text{pC}$  pro měřené vibrační zrychlení [ $\text{ms}^{-2}$ ],  $1000 \text{ ms}^{-1}/\text{pC}\cdot\text{s}$  pro měření efektivní hodnoty rychlosti [ $\text{mm/s}$ ] a  $10^6 \text{ m}/\text{pC}\cdot\text{s}^{-2}$  pro měření efektivní hodnoty výchylky vibrací [ $\mu\text{m}$ ].

### 10.1 Postup kalibrace

Za pomoci přesného sinusového generátoru je generováno napětí, které se přes kalibrační přípravek (kalibrovaný kondenzátor) převede na náboj a tímto nábojem je buzen nábojový zesilovač. Hodnota napětí generátoru je měřena přesným kalibrovaným voltmetrem. Na straně osobního počítače je použita standardní aplikace proměření s kalibračními konstantami nastavenými na zesílení  $K = 1$  a ekvivalentními hodnotami šumu rovny nule. Schéma měření zobrazuje Obrázek 10-1. Zápis hodnot napětí, standardních odchylek a výsledné zpracování naměřených dat bylo provedeno v tabulkovém procesoru MS Excel.

Měření probíhalo na frekvencích definovaných normou ČSN ISO 266, v rozsahu požadavků danými normou ČSN ISO 2954:2012. Naměřené hodnoty byly odečteny po ustálení přechodových jevů.



Obrázek 10-1 Kalibrace indikační jednotky R711-001-V0D

## 10.2 Použité přístroje

### Sinusový generátor

Brüel & Kjaer Sine/Noise generator Type 1054

- Kalibrovaný generátor šumu a sinusového signálu.

Rozsah výstupních frekvencí: 0,2 Hz – 2,54 MHz

Rozlišení: 0,01 Hz

Frekvenční přesnost:  $\pm 1,192$  mHz

Amplitudová linearita a přesnost:

$\pm 0,1$  dB od 20 Hz do 20 kHz

$\pm 0,5$  dB od 2 Hz do 500 kHz

$\pm 1$  dB od 0,2Hz do 2,54 MHz

### Voltmetr

Keithley 2000

Multimetr je použitý jako střídavý voltmetr a špičkový detektor:

- Stejnosměrný voltmetr (detektor maximálních hodnot harmonického průběhu):

Rozsah:            Rozlišení:            Přesnost:

100.0000 mV    0,1  $\mu$ V            50 + 35

1.000000 V    1,0  $\mu$ V    30 + 7

Přesnost:  $\pm$  (ppm z měřeného údaje + ppm z rozsahu), kde 10 ppm = 0,001 %.

- Střídavý voltmetr:

Rozsah:        Rozlišení:    3 Hz - 10 Hz    10 Hz – 10 kHz

100,0000 mV    0,1  $\mu$ V        0,35 + 0,03    0,06 + 0,03

1,000000 V    1,0  $\mu$ V        0,35 + 0,03    0,06 + 0,03

Přesnost:  $\pm$  (% z měřeného údaje + % z rozsahu)

## Kalibrační přípravek

Kalibrovaný kondenzátor

Hodnota kapacity je stanovena pro frekvence od 0,1 Hz do frekvence 20 kHz, pro přesné kalibrace nábojových zesilovačů. Referenční kapacita pro frekvenci 100 Hz je stanovena:

$C_k = 995,7796$  pF, hodnota byla stanovena s rozšířenou nejistotou 2,81 pF pro koeficient rozšíření  $k_r = 2$ .

## Osobní počítač

Notebook - HP ProBook 4520

Operační systém: Windows 7, 64 bit, verze programu Dewesoft: 7.1.0

## 10.3 Naměřené frekvenční charakteristiky

Cílem kalibrace je stanovit kalibrační konstanty zesílení a šumu. Kritéria pro vyhovění použitých filtrů jsou následující:

- Vyhovění požadavkům na chybu z rozsahu měřené veličiny v daném frekvenčním spektru dle zadání pro měření efektivních hodnot zrychlení, efektivních hodnot rychlosti a efektivních hodnot výchylky.
- Splnění kritérií, která jsou daná normou ČSN ISO 2954:2012 na definovaný sklon frekvenčních charakteristik pro vibrační zrychlení a mohutnost vibrací.

### 10.3.1 Výpočet přenosů a chyby z rozsahu měřené veličiny

Pro stanovení efektivní hodnoty budícího náboje na dané frekvenci bylo použito

vztahu (10-1).

$$q_{RMS} = u_{RMS} \cdot C_k \quad (10-1)$$

Kde  $u_{RMS}$  je RMS hodnota budícího napětí a  $C_k$  je hodnota kapacity kondenzátoru pro frekvenci vstupního signálu. Kalibrace předpokládá snímač zrychlení o nábojové citlivosti  $1 \text{ pC/ms}^{-2}$ , proto bude tento vztah (10-1) sloužit také pro stanovení referenční hodnoty zrychlení.

Referenční hodnota efektivní rychlosti vibrací vychází z předpokladu, že je použit harmonický kalibrační signál napětí, pak lze odvodit vztah (10-2).

$$v(t) = \int a(t)dt = \int A \cdot \sin(\omega t)dt = \frac{-A \cdot \cos(\omega t)}{\omega} \quad (10-2)$$

Kde  $A$  je amplituda zrychlení úměrná budícímu náboji,  $\omega$  je úhlová frekvence budícího signálu. Z definice efektivní hodnoty je příspěvek od harmonických funkcí sinus a cosinus za dobu jedné periody shodný. Za těchto předpokladů lze pro efektivní hodnoty zrychlení a rychlosti formulovat zjednodušující vztah (10-3).

$$v_{RMS} = \frac{a_{RMS}}{\omega} \quad (10-3)$$

Stejným principem se odvodí zjednodušující vztah (10-4) pro stanovení referenční efektivní hodnoty výchylky vibrací.

$$y_{RMS} = \frac{v_{RMS}}{\omega} = \frac{a_{RMS}}{\omega^2} \quad (10-4)$$

Výsledné frekvenční charakteristiky jsou vypočítány dle vztahu (10-5).

$$H_x = 20 \cdot \log \frac{K(x_m - x_s)}{x_R} [dB] \quad (10-5)$$

Kde se  $x$  je efektivní hodnota příslušné veličiny (zrychlení, rychlost, nebo výchylka),  $H_x$  je hodnota relativního přenosu v decibelech,  $K$  je kalibrační konstanta,  $x_m$  je naměřená hodnota,  $x_s$  je efektivní hodnota nízkofrekvenčního šumu a  $x_R$  je referenční hodnota příslušné veličiny.

Relativní chyba z rozsahu měření je definována vztahem (10-6).

$$\delta_{x_M} = \frac{x_M - x_R}{M_x} 100\% \quad (10-6)$$

Kde  $x_M$  je naměřená a zároveň kalibrovaná efektivní hodnota příslušné veličiny,  $x_R$  je vypočítaná referenční efektivní hodnota příslušné veličiny daná efektivní hodnotou budícího náboje a  $M_x$  je měřicí rozsah. Všechny uvedené veličiny jsou vztaheny k frekvenci budícího signálu. Rozsah dané veličiny je ovlivněn dle vztahu (10-3) a (10-4), kde se  $a_{RMS}$  nahradí rozsahem pro měření efektivní hodnoty zrychlení. Chyba z rozsahu je sledována ve frekvenčním pásmu limitních frekvencí filtru.

### 10.3.2 Kalibrace ve frekvenčním pásmu od 10 Hz do 1 kHz

Měření probíhalo od frekvence 1 Hz do frekvence 10 kHz. Referenční frekvence pro kalibrační konstanty je 80 Hz. Uvedené hodnoty jsou efektivní hodnoty daných veličin, pokud není uvedeno jinak. Vztahy pro výpočet nejistot jsou uvedeny v kapitole 10.4.

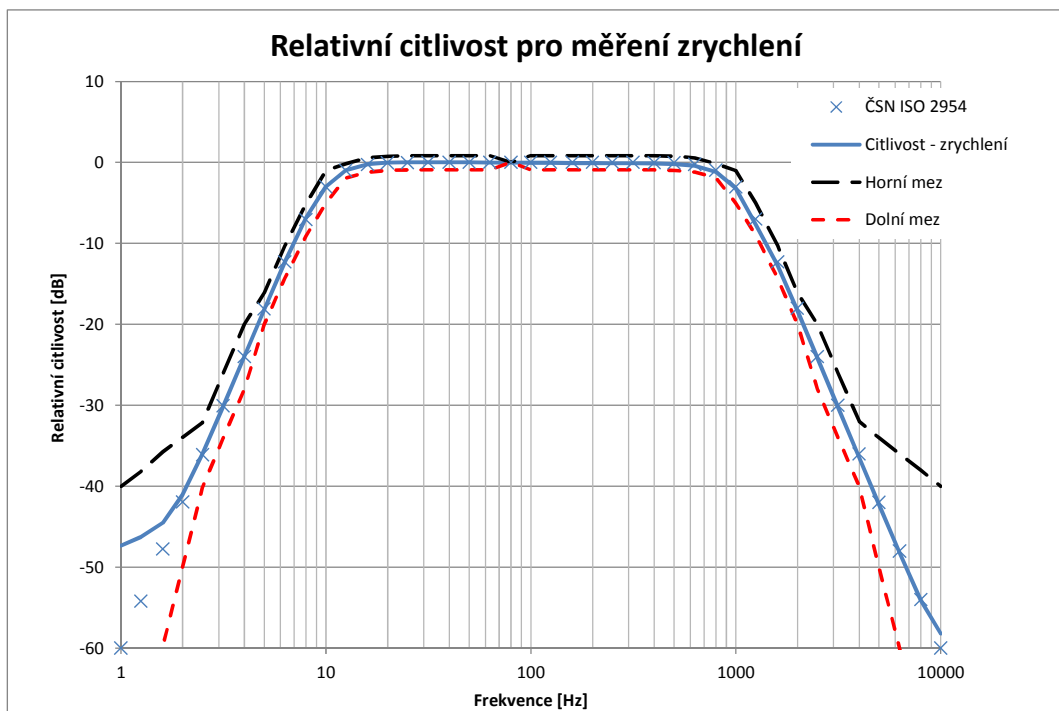
#### 10.3.2.1 Kanál CH1

Referenční hodnotou pro kalibraci kanálu CH1 indikační jednotky je zrychlení  $100 \text{ ms}^{-2}$ . Rozsah měřeného zrychlení je  $450 \text{ ms}^{-2}$ . Hodnota relativní nejistoty určení referenčního zrychlení byla stanovena na 0,88 %, tato hodnota je nejméně příznivou z celého souboru nejistot pro dané frekvenční pásmo.

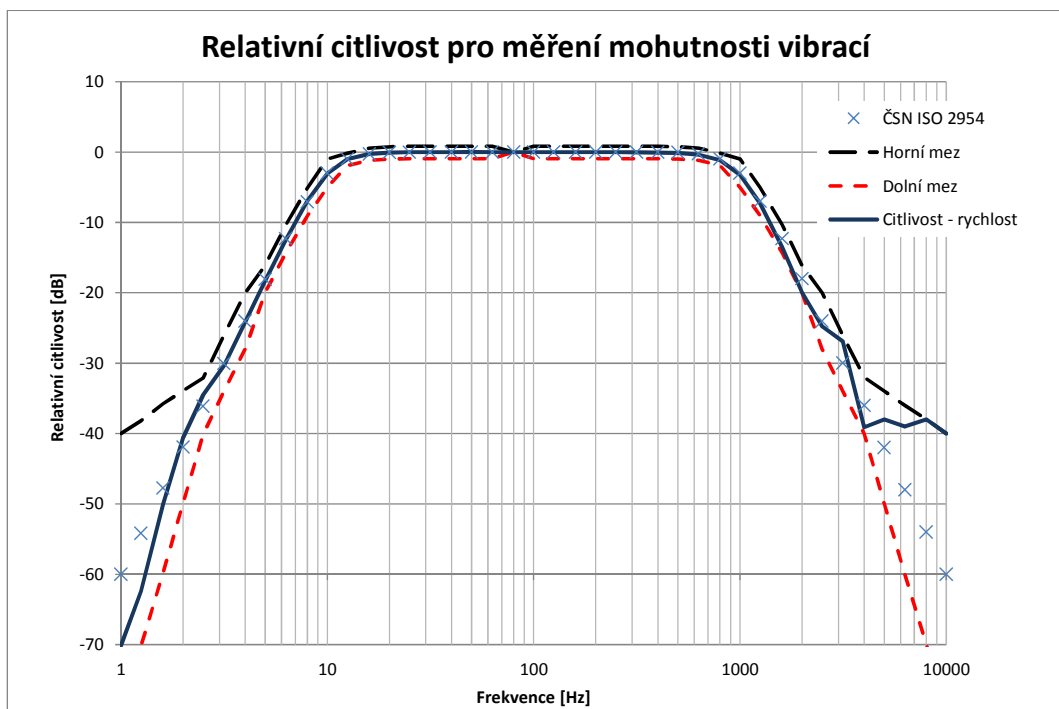
Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření zrychlení zobrazuje Obrázek 10-2. Maximální chyba z rozsahu je 0,13 % při frekvenci 12,5 Hz.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření rychlosti zobrazuje Obrázek 10-3. Zde je od frekvence 2,5 kHz patrný šum, který nepříznivě ovlivňuje výsledný tvar průběhu frekvenční charakteristiky. Maximální chyba z rozsahu pro měření efektivní hodnoty rychlosti je 0,07 % při frekvenci 800 Hz.

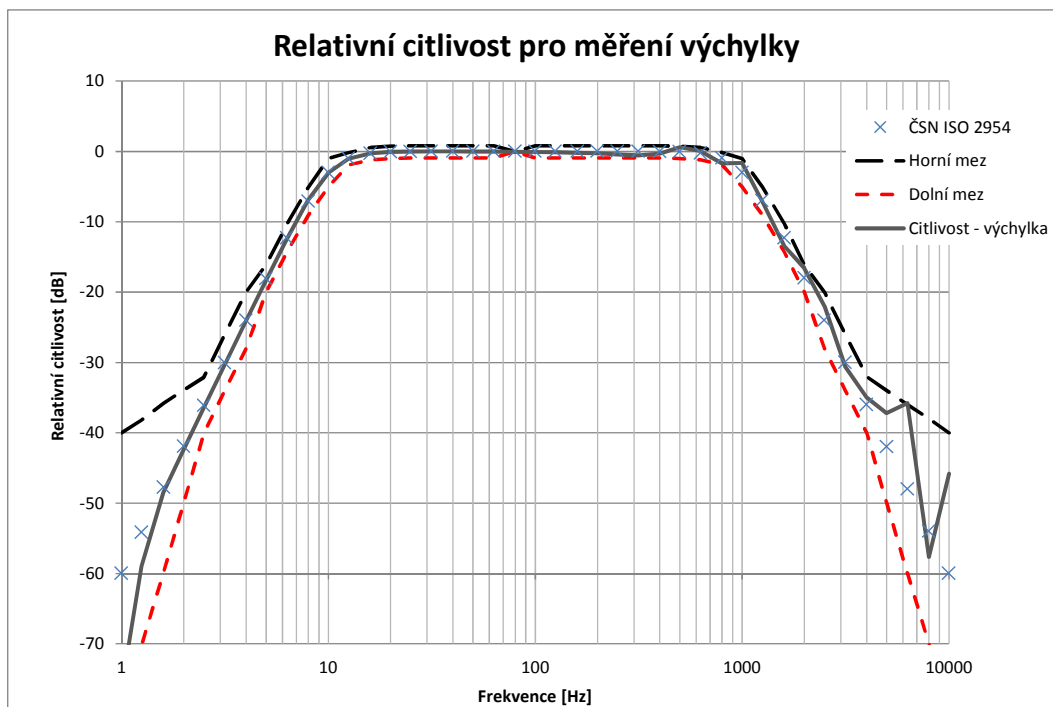
Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření výchylky zobrazuje Obrázek 10-4. Zde je od frekvence 500 Hz patrný vliv nízkofrekvenčního šumu, který nepříznivě ovlivňuje výsledný tvar frekvenční charakteristiky ve vyšších frekvencích. Maximální chyba z rozsahu pro měření efektivní hodnoty výchylky je 0,44 % při frekvenci 1000 Hz.



Obrázek 10-2 Relativní citlivost měření zrychlení – kanál CH1



Obrázek 10-3 Relativní citlivost měření rychlosti – kanál CH1



Obrázek 10-4 Relativní citlivost měření výchylky – kanál CH1

### 10.3.2.2 Kanál CH2

Referenční hodnotou pro kalibraci kanálu CH2 indikační jednotky je zrychlení  $2 \text{ ms}^{-2}$ . Rozsah měřeného zrychlení je  $4,5 \text{ ms}^{-2}$ . Tento kanál zesiluje signál z kanálu CH1 se zesílením 40 dB. Výsledné charakteristiky jsou tedy ovlivněny přítomným nízkofrekvenčním šumem z nábojového zesilovače. Měření probíhalo při referenčním zrychlení  $2 \text{ ms}^{-2}$ . Referenční frekvence pro stanovení konstant je 80 Hz. Hodnota relativní nejistoty určení referenčního zrychlení byla stanovena na 1,93 %, tato hodnota je nejméně příznivou z celého souboru nejistot pro dané frekvenční pásmo.

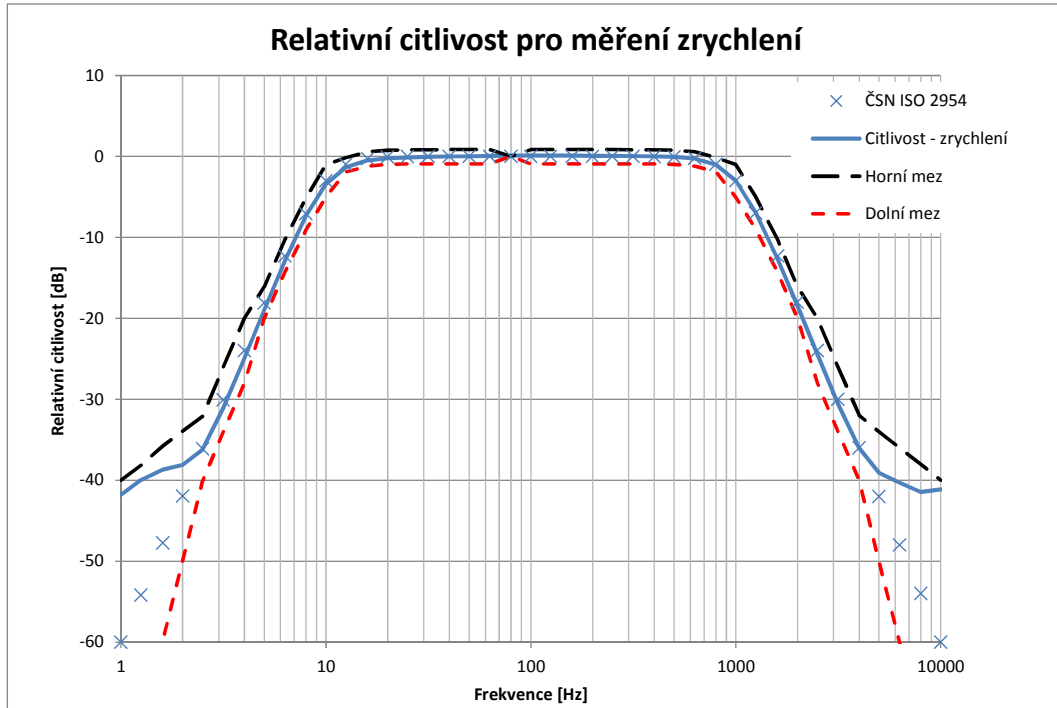
Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti pro měření zrychlení zobrazuje Obrázek 10-5. Maximální chyba z rozsahu měření zrychlení je 2,77 %, při frekvenci 12,5 Hz.

Frekvenční charakteristika relativní citlivosti pro měření efektivní hodnoty rychlosti vibrací je nad frekvencí 1000 Hz ovlivněna nízkofrekvenčním šumem – viz Obrázek 10-6. Tento kanál tedy nelze použít za přítomnosti nízkofrekvenčního šumu v plném frekvenčním spektru měření od 10 Hz do 1 kHz dle normy ČSN ISO 2954:2012 pro měření mohutnosti vibrací. Nicméně, lze jej použít pro detekci a upřesnění nízkých hladin rychlostí na diskretních frekvencích FFT analýzou, kde lze nízkofrekvenční šum lépe odfiltrovat. Maximální chyba z rozsahu měření mohutnosti vibrací je 1,05 % pro frekvenci 1000 Hz.

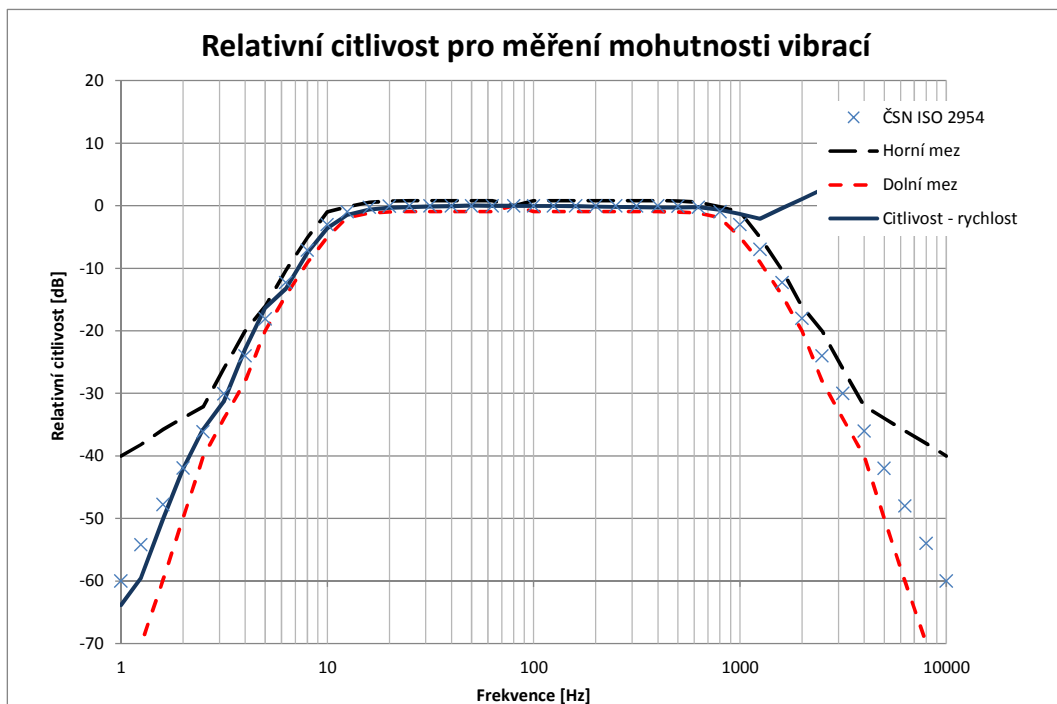
Frekvenční charakteristika relativní citlivosti pro měření efektivní hodnoty výchylky



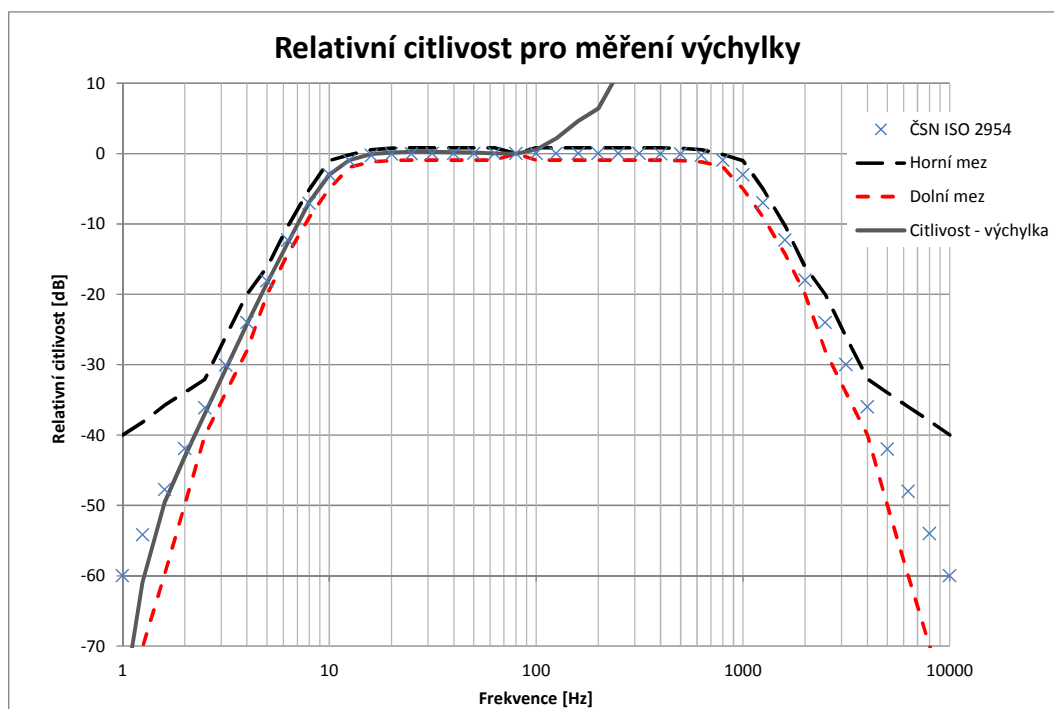
vibrační (Obrázek 10-7) je silně ovlivněna nízkofrekvenčním šumem již od frekvence 100 Hz. Platí tedy stejný závěr jako v předchozím případě pro měření mohutnosti vibrací. Maximální chyba z rozsahu měření výchylky je 0,47 % pro frekvenci 100 Hz.



Obrázek 10-5 Relativní citlivost měření zrychlení – kanál CH2



Obrázek 10-6 Relativní citlivost měření rychlosti – kanál CH2



Obrázek 10-7 Relativní citlivost měření výchylky – kanál CH2

### 10.3.2.3 Zhodnocení

Závěrem lze konstatovat, že kanál CH1 lze bez problémů použít pro měření mohutnosti vibrací a výchylky. Kanál CH2 lze použít pouze pro upřesnění hodnoty nízkých hladin signálu na diskretních frekvencích za pomoci FFT analýzy, jelikož měřenou veličinu silně ovlivňuje nízkofrekvenční šum z nábojového zesilovače.

## 10.3.3 Kalibrace ve frekvenčním pásmu od 10 Hz do 2 kHz

Měření probíhalo od frekvence 1 Hz do frekvence 20 kHz. Referenční frekvence pro kalibrační konstanty je 80 Hz. Uvedené hodnoty jsou efektivní hodnoty daných veličin, pokud není uvedeno jinak.

### 10.3.3.1 Kanál CH1

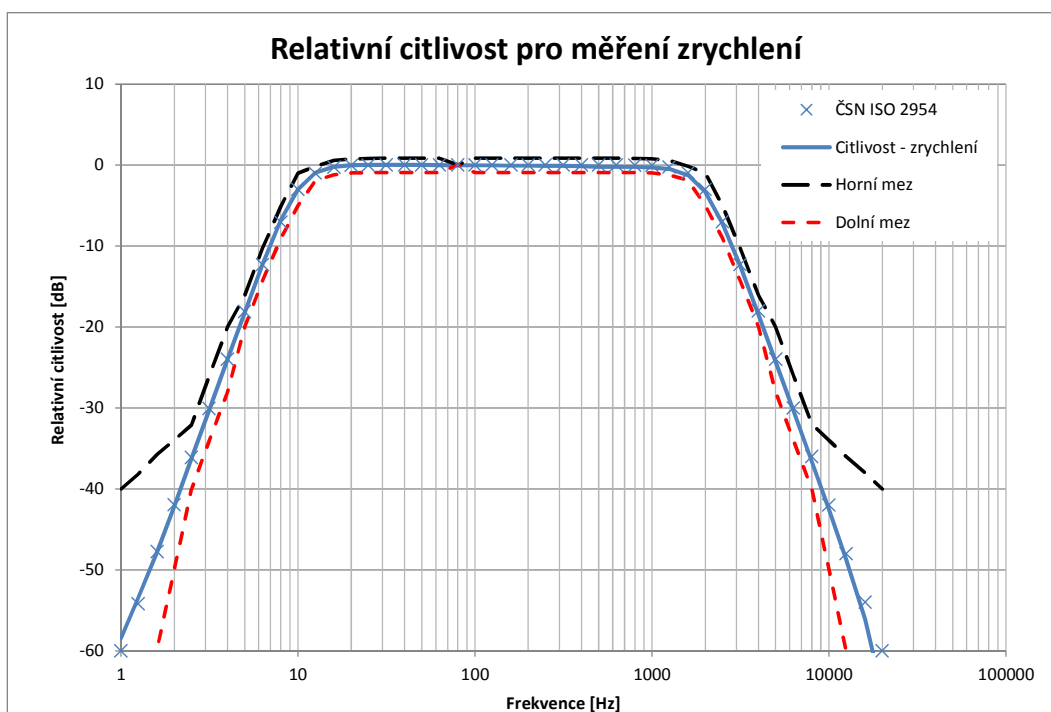
Referenční hodnotou pro kalibraci indikační jednotky je zrychlení  $400 \text{ ms}^{-2}$ . Rozsah měřeného zrychlení je  $450 \text{ ms}^{-2}$ . Hodnota relativní nejistoty určení referenčního zrychlení byla stanovena na 0,90 %, tato hodnota je nejméně příznivou z celého souboru nejistot pro dané frekvence.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření zrychlení zobrazuje Obrázek 10-8. Maximální chyba z rozsahu měření zrychlení je 0,74 % při frekvenci 1600 Hz.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření rychlosti zobrazuje Obrázek 10-9. Zde je patrné nesplnění podmínky dle normy ČSN ISO 2954:2012 na frekvenci 8 kHz,

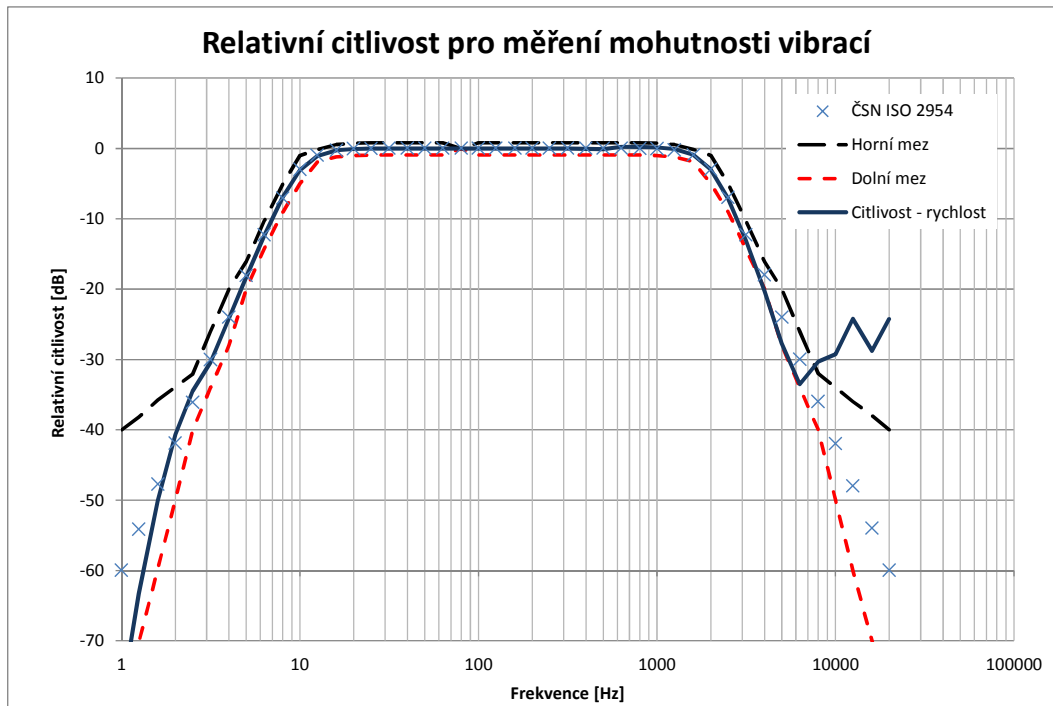
avšak stanovením dolního limitu hladiny mohutnosti vibrací na mez<sup>32</sup> 0,2 mm/s, lze tento filtr použít pro měření mohutnosti vibrací v definovaném pásmu hladin 0,2 mm/s až 25 mm/s. Maximální chyba z rozsahu měření mohutnosti vibrací je 0,41 % při frekvenci 630 Hz.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření výchylky zobrazuje Obrázek 10-10. Zde je opět patrné nesplnění podmínky dle normy ČSN ISO 2954:2012, stanovením dolního limitu hladiny výchylky vibrací na mez 3 μm, lze takto definovaný filtr použít pro měření výchylky vibrací dle ČSN ISO 2954:2012. Maximální chyba z rozsahu měření výchylky ve frekvenčním pásmu od 10 Hz do 1 kHz je 1,31 % na frekvenci 400 Hz, ve frekvenčním pásmu od 1 kHz do 2 kHz je 7,24 % na frekvenci 2000 Hz.

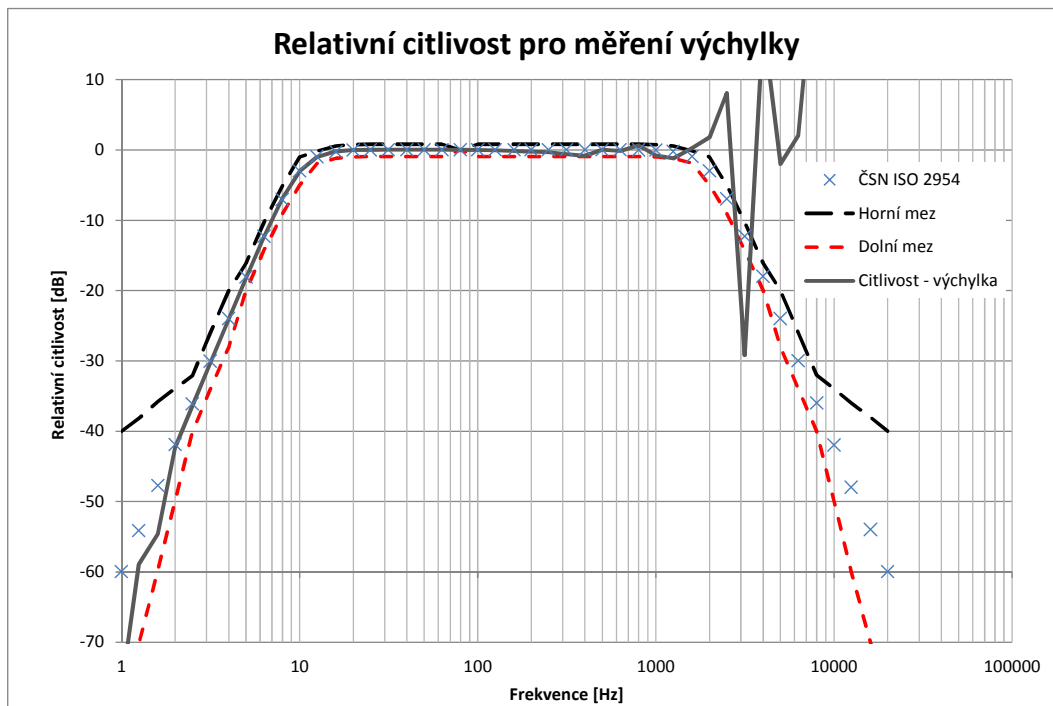


Obrázek 10-8 Relativní citlivost měření zrychlení – kanál CH1

<sup>32</sup> Uvedená úroveň mohutnosti vibrací a výchylky je menší než požadují jednotlivé části normy ČSN ISO 10816 pro úroveň mohutnosti vibrací v pásmu A (vibrace nově přejímaných strojů mají limit 4,46 mm/s) – více viz norma ČSN ISO 10816-1 [11], nebo detailněji v části 2 až 7 citované normy.



Obrázek 10-9 Relativní citlivost měření rychlosti – kanál CH1



Obrázek 10-10 Relativní citlivost měření výchylky – kanál CH1

### 10.3.3.2 Kanál CH2

Referenční hodnotou pro kalibraci kanálu CH2 indikační jednotky je zrychlení  $4 \text{ ms}^{-2}$ . Rozsah měřeného zrychlení je  $4,5 \text{ ms}^{-2}$ . Referenční frekvence pro stanovení konstant

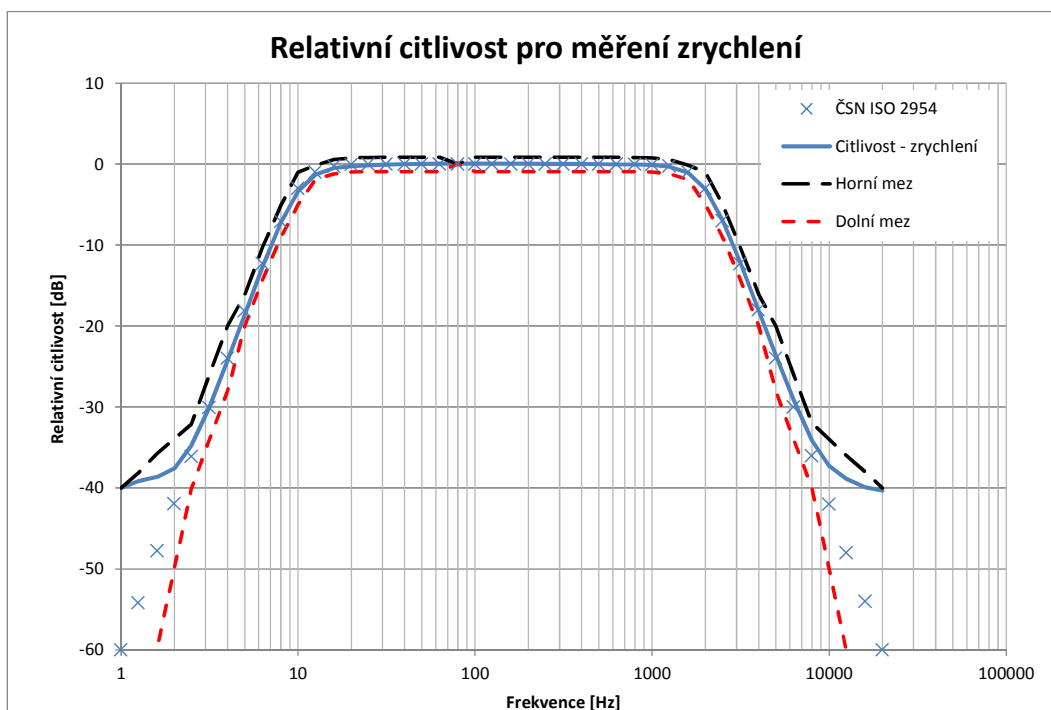
je 80 Hz. Hodnota relativní nejistoty určení referenčního zrychlení byla stanovena na 1,53 %, tato hodnota je nejméně příznivou z celého souboru nejistot pro dané frekvenční pásmo.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti pro měření zrychlení zobrazuje Obrázek 10-11. Maximální chyba z rozsahu měřeného zrychlení vibrací je 4,99 %, při frekvenci 12,5 Hz.

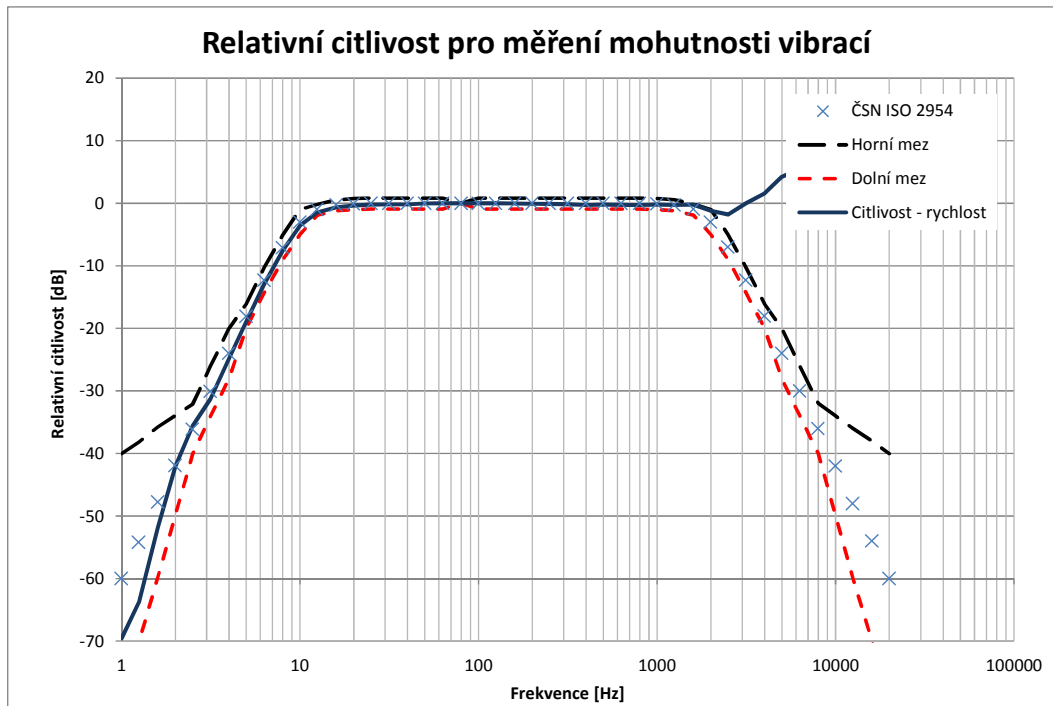
Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti pro měření mohutnosti vibrací zobrazuje Obrázek 10-12. Maximální chyba z rozsahu měření mohutnosti vibrací je 0,70 %, při frekvenci 12,5 Hz.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření výchylky zobrazuje Obrázek 10-13. Maximální chyba z rozsahu měření výchylky je 1,16 % při frekvenci 200 Hz.

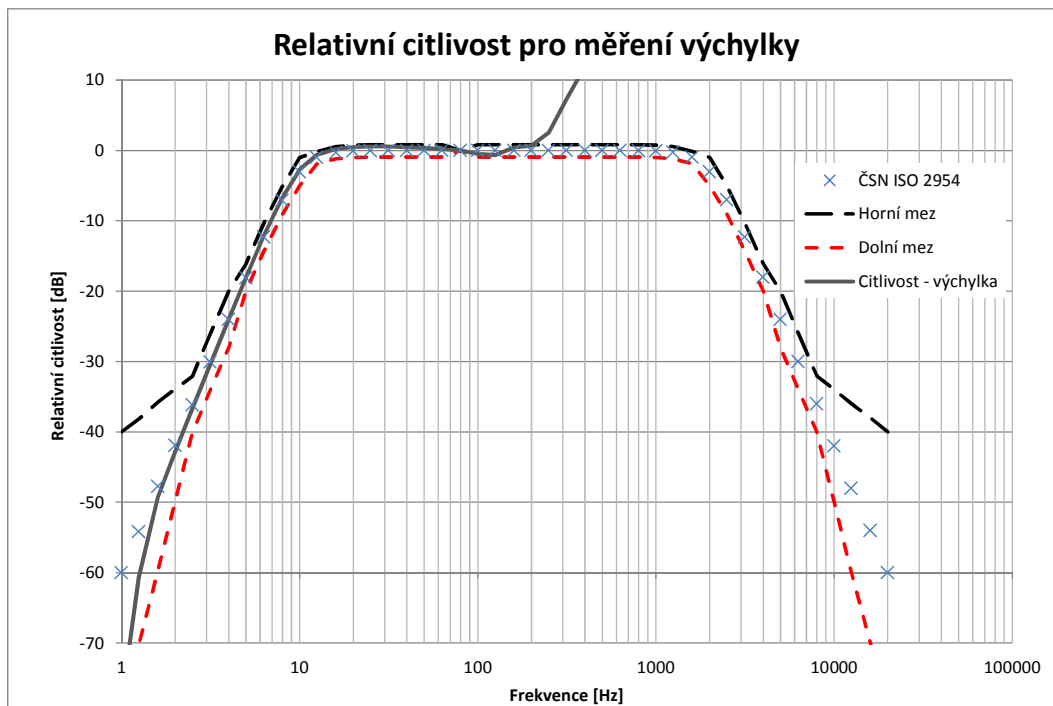
Kanál CH2 nelze použít pro měření mohutnosti vibrací dle normy ČSN ISO 2954:2012. Kanál je možné použít pro upřesnění nízkých hladin vibrací na diskretních frekvencích FFT analýzou.



Obrázek 10-11 Relativní citlivost měření zrychlení – kanál CH2



Obrázek 10-12 Relativní citlivost měření rychlosti – kanál CH2



Obrázek 10-13 Relativní citlivost měření výchylky – kanál CH2

### 10.3.3.3 Zhodnocení

Závěrem lze konstatovat, že kanál CH1 lze použít pro měření mohutnosti vibrací a výchylky po stanovení dolního limitu mohutnosti vibrací (0,2 mm/s) a dolního limitu

efektivní hodnoty výchylky (3  $\mu\text{m}$ ). Kanál CH2 lze použít pouze pro upřesnění hodnoty nízkých hladin signálu na diskretních frekvencích za pomoci FFT analýzy, jelikož měřenou veličinu silně ovlivňuje nízkofrekvenční šum z nábojového zesilovače.

### **10.3.4 Kalibrace ve frekvenčním pásmu od 2 Hz do 500 Hz**

Měření probíhalo od frekvence 0,2 Hz do frekvence 5 kHz. Referenční frekvencí pro stanovení kalibračních konstant je frekvence 80 Hz. Uvedené hodnoty jsou efektivní hodnoty daných veličin, pokud není uvedeno jinak. Korekční filtr byl optimalizován pro měření efektivní hodnoty rychlosti, aby bylo především vyhověno normě ČSN ISO 2954:2012.

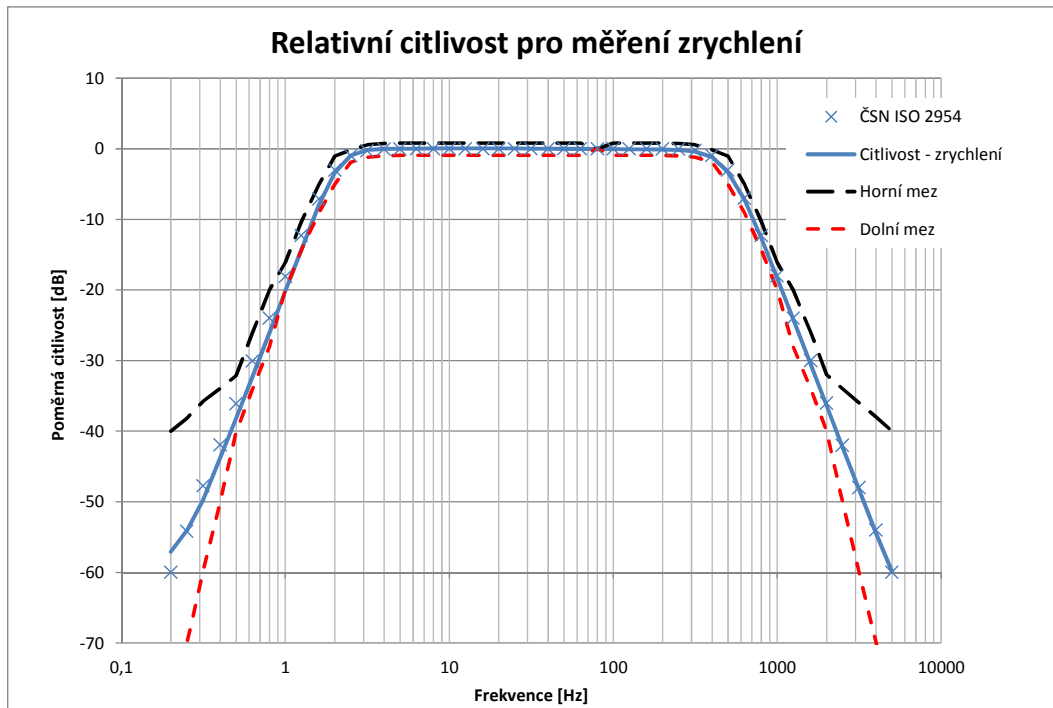
#### **10.3.4.1 Kanál CH1**

Referenční hodnotou pro kalibraci indikační jednotky je zrychlení  $400 \text{ ms}^{-2}$ . Rozsah měřeného zrychlení je  $450 \text{ ms}^{-2}$ . Hodnota relativní nejistoty určení referenčního zrychlení byla stanovena na 0,90 %, tato hodnota je nejméně příznivou z celého souboru nejistot pro dané frekvenční pásmo.

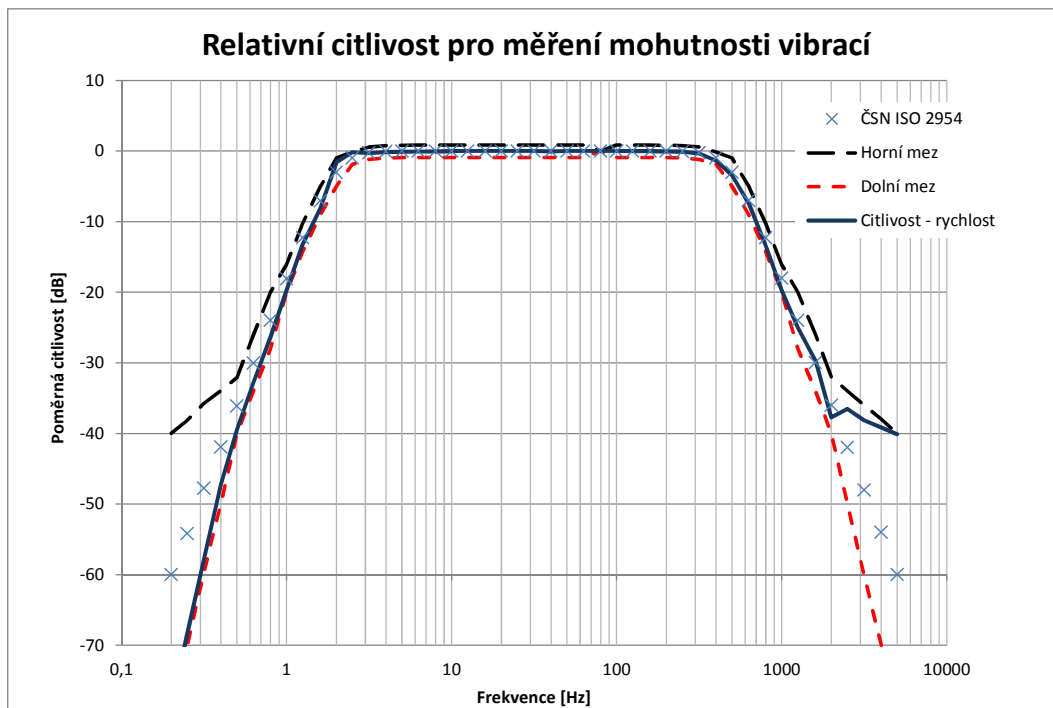
Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření zrychlení zobrazuje Obrázek 10-14. Maximální chyba z rozsahu měření zrychlení je 1,24 % na frekvenci 500 Hz pro frekvenční rozsah 10 Hz až 500 Hz. Pro frekvenční rozsah 2 Hz až 10 Hz je maximální chyba z rozsahu měření zrychlení rovna 4,28 %.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření rychlosti zobrazuje Obrázek 10-15. Tento průběh vyhovuje normě ČSN ISO 2954:2012. Maximální chyba z rozsahu měření rychlosti je 0,6 % na frekvenci 400 Hz při frekvenčním rozsahu 10 Hz až 500 Hz a 1,70 % na frekvenci 2,5 Hz na frekvenčním rozsahu od 2 Hz do 10 Hz.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti měření výchylky zobrazuje Obrázek 10-16. Efektivní hodnotu výchylky lze u takto nastaveného filtru považovat za informativní, problémem je nízkofrekvenční šum nábojového zesilovače. Ve frekvenčním pásmu od 2 Hz do frekvence 250 Hz je hodnota maximální chyby z rozsahu měřených výchylek 3,67 % na frekvenci 250 Hz.

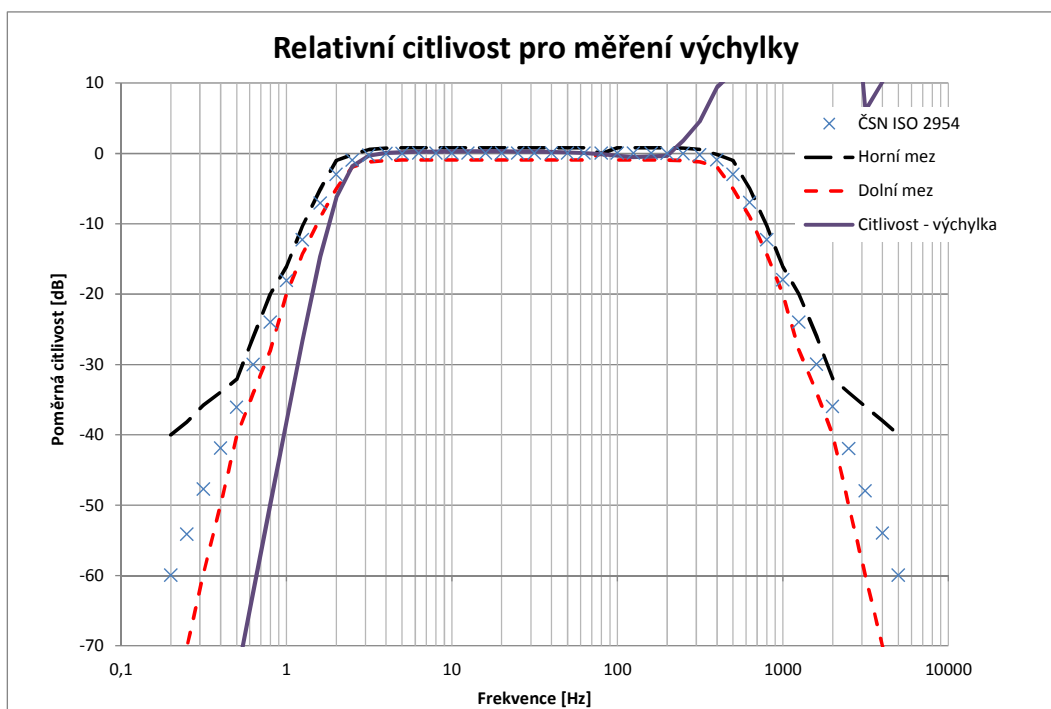


Obrázek 10-14 Relativní citlivost měření zrychlení – kanál CH1



Obrázek 10-15 Relativní citlivost měření rychlosti – kanál CH1





Obrázek 10-16 Relativní citlivost měření výchylky – kanál CH1

#### 10.3.4.2 Kanál CH2

Referenční hodnotou pro kalibraci kanálu CH2 indikační jednotky je zrychlení  $4 \text{ ms}^{-2}$ . Rozsah měřeného zrychlení je  $4,5 \text{ ms}^{-2}$ . Referenční frekvence pro stanovení konstant je 80 Hz. Hodnota relativní nejistoty určení referenčního zrychlení byla stanovena na 1,53 %, tato hodnota je nejméně příznivou z celého souboru nejistot pro dané frekvenční pásmo.

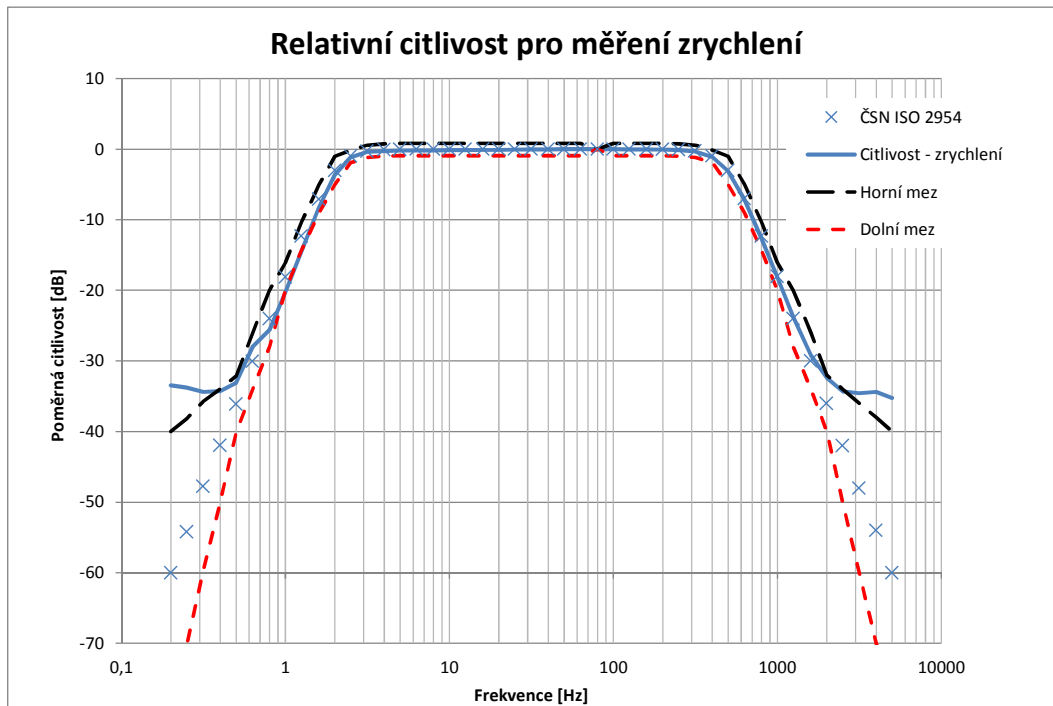
Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti pro měření zrychlení zobrazuje Obrázek 10-17. Maximální chyba z rozsahu měřeného zrychlení vibrací je 5,78 % při frekvenci 2 Hz. Pro frekvenční rozsah 10 Hz až 500 Hz je maximální chyba z rozsahu měřené mohutnosti vibrací 2,36 % při frekvenci 10 Hz.

Frekvenční charakteristiku relativní citlivosti pro měření mohutnosti vibrací zobrazuje Obrázek 10-18. Maximální chyba z rozsahu měření mohutnosti vibrací je 5 % při frekvenci 315 Hz na frekvenčním rozsahu od 2 Hz do 315 Hz.

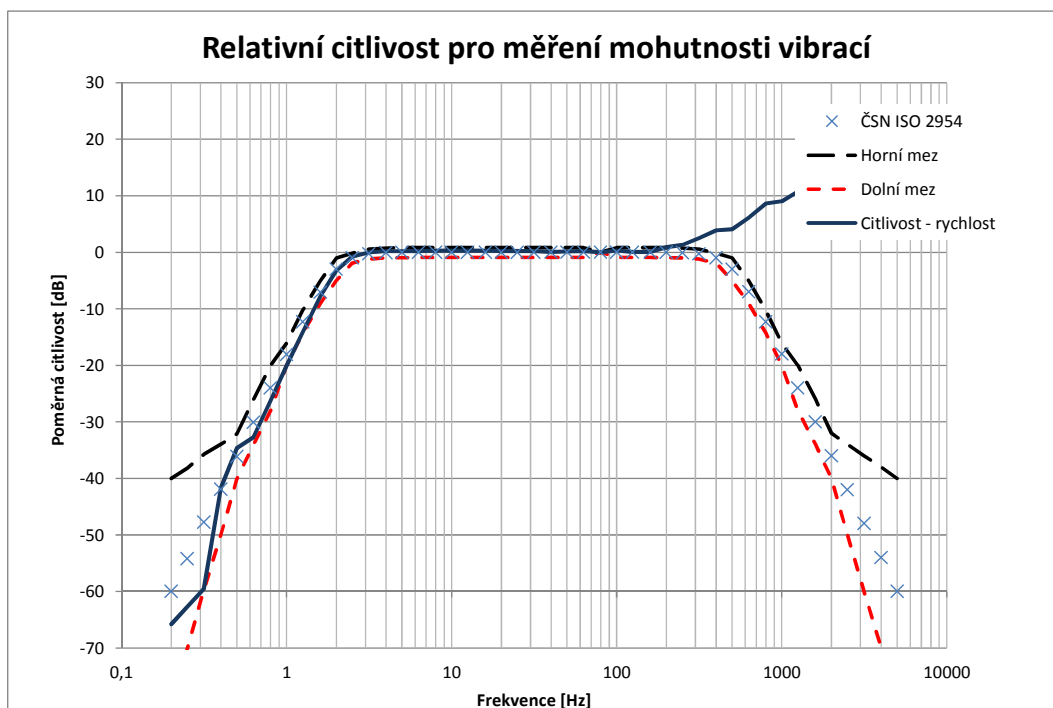
Frekvenční charakteristika relativní citlivosti měření výchylky se neuvádí, měření na tomto kanálu je zatíženo nízkofrekvenčním šumem. Nicméně informaci o výchylce lze použít na frekvenčním rozsahu od 2 Hz do 40 Hz, kdy maximální chyba z rozsahu měření výchylky je 5 % při frekvenci 40 Hz.

Kanál CH2 nelze použít pro měření mohutnosti vibrací dle normy ČSN ISO 2954:2012. Kanál je možné použít pro upřesnění nízkých hladin vibrací na diskrétních frekvencích

FFT analýzou.



Obrázek 10-17 Relativní citlivost měření zrychlení – kanál CH2



Obrázek 10-18 Relativní citlivost měření rychlosti – kanál CH2

### 10.3.4.3 Zhodnocení

Závěrem lze konstatovat, že kanál CH1 lze bez problémů použít pro měření mohutnosti vibrací dle ČSN ISO 2954:2012, nikoliv však měření výchylky, avšak zadání na chybu z rozsahu měření je v daném frekvenčním pásmu splněn. Kanál CH2 lze použít pouze pro upřesnění hodnoty nízkých hladin signálu na diskretních frekvencích za pomoci FFT analýzy, jelikož měřenou veličinu silně ovlivňuje nízkofrekvenční šum z nábojového zesilovače.

## 10.4 Nejistoty měření

Vztahy pro stanovení nejistot měření byly odvozeny dle publikace [3] a vypočítány dle vztahů v této kapitole.

### 10.4.1 Nejistota stanovení napětí na vstup kondenzátoru $C_k$

#### 10.4.1.1 Měření na frekvenčním pásmu od 0,2 Hz do 3,15 Hz

Nejistota typu A minimálních a maximálních hodnot se vypočítá dle vztahu (10-7).

$$u(u_{MAX(MIN)})_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2\right)}{n(n-1)}} \quad (10-7)$$

Kde  $x_i$  je  $i$ -tý prvek z maximálních (minimálních) hodnot,  $n$  je počet změřených hodnot.

Nejistota typu A pro efektivní hodnotu se vypočítá dle vztahu (10-8).

$$u(u_{RMS})_A = \sqrt{\frac{u(u_{MAX})_A^2}{8} + \frac{u(u_{MIN})_A^2}{8}} \quad (10-8)$$

Předpokladem platnosti vztahů (10-7) a (10-8) je harmonický signál budícího napětí.

Nejistota typu B je daná měřicím přístrojem Keithley 2000 a byla vypočítána dle vztahu (10-9)

$$u(u_{MAX(MIN)})_B = \frac{(30 \cdot x + 7 \cdot R) \cdot 10^{-6}}{\sqrt{3}} \quad (10-9)$$

kde  $x$  je průměrná hodnota z naměřených vzorků a  $R$  je rozsah voltmetru ve voltech. Nejistota typu B pro efektivní hodnotu se vypočítá dle vztahu (10-10).

$$u(u_{RMS})_B = \sqrt{\frac{u(u_{MAX})_B^2}{8} + \frac{u(u_{MIN})_B^2}{8}} \quad (10-10)$$

Kombinovaná nejistota vstupní efektivní hodnoty napětí se poté stanoví podle vztahu (10-11).

$$u(u_{RMS})_C = \sqrt{u(u_{RMS})_A^2 + u(u_{RMS})_B^2} \quad (10-11)$$

#### 10.4.1.2 Měření na frekvenčním pásmu od 3,15 Hz do 20 kHz

Nejistota typu A byla změřena jako standardní odchylka multimetrem Keithley 2000, poté byla přepočtena na nejistotu typu A podle vztahu (10-12).

$$u(u_{RMS})_A = \frac{STD(VAC)}{\sqrt{n}} \quad (10-12)$$

Kde  $STD(VAC)$  je statistická hodnota standardní odchylky vypočítané multimetrem Keithley a  $n$  je počet odměřů měřeného napětí.

Nejistota typu B byla vypočtena z dokumentace měřicího přístroje Keithley 2000. Z paměti statistik měřicího přístroje byla vyčtena průměrná hodnota, poté byla nejistota typu B vypočítána pro efektivní hodnotu napětí dle vztahu (10-13).

$$u(u_{RMS})_B = \frac{(0,35 \cdot x + 0,03 \cdot R) \cdot 10^{-2}}{\sqrt{3}} \quad (10-13)$$

Kde  $x$  je průměrná hodnota z naměřených vzorků a  $R$  je rozsah voltmetru ve voltech.

Kombinovaná nejistota byla pro všechny měřené hodnoty vypočítána dle vztahu (10-11).

Nejistota budícího náboje do vstupu operačního zesilovače se vypočítá dle vztahu (10-14).

$$u(q_{RMS}) = \sqrt{(C_K \cdot u(u_{RMS})_C)^2 + (u(C_K) \cdot u_{RMS})^2} \quad (10-14)$$

#### 10.4.2 Nejistota stanovení referenční hodnoty zrychlení

Nejistota určení referenčního zrychlení je dána vztahem (10-15).

$$u(a_{RMS}) = K_{CH} \cdot u(q_{RMS}) \quad (10-15)$$

Kde  $K_{CH}$  je převodní konstanta, zde je  $K_{CH} = 1 \text{ ms}^{-2}/\text{pC}$ .

### 10.4.3 Nejistota stanovení referenční hodnoty rychlosti

Nejistota určení referenční hodnoty rychlosti je dána vztahem (10-16).

$$u(v_{RMS}) = \frac{1}{\omega} \cdot u(a_{RMS}) \quad (10-16)$$

Kde  $\omega$  je úhlová frekvence, zde interpretována jako konstanta (Toto zjednodušení lze použít za předpokladu použití přesného generátoru sinusového signálu Bruel & Kjaer Type 1054, parametry tohoto generátoru uvádí kapitola 10.2).

### 10.4.4 Nejistota stanovení referenční hodnoty výchylky

Nejistota určení referenční hodnoty rychlosti je dána vztahem (10-17).

$$u(y_{RMS}) = \frac{1}{\omega^2} \cdot u(a_{RMS}) \quad (10-17)$$

Kde  $\omega$  je úhlová frekvence, zde interpretována jako konstanta, vysvětlení viz předchozí odstavec.

## Závěr

V prvních kapitolách studie bylo hlavním úkolem stanovit limity a detailnější požadavky dané normami ČSN ISO 2954:2012 a RTCA/DO-160C. Požadavky přesně citují použité normy, ale jen do míry jejich využití pro tuto aplikaci. Požadavky dané normou RTCA/DO-160C navíc obsahují kapitolu 7 Provozní rázy a havarijní bezpečnost, kde je možné vyvíjené zařízení také použít. Dle těchto požadavků byla vybrána sada vhodných snímačů vibrací od jednotlivých výrobců, dle dostupnosti a diskuze byl zvolen konkrétní typ, nicméně jelikož vybrané snímače vibrací mají podobné vlastnosti, lze zvolený akcelerometr nahradit jiným z uvedených.

Pro lepší představu bylo uvedeno několik konkurenčních výrobků, bohužel jeden z hlavních parametrů přístroje a to je cena v řadě případů chybí, proto zde není uveden. Nicméně klíčové jsou parametry, jako frekvenční rozsah, dynamický rozsah, rozlišení ADC, které jsou uvedené v tabulkách u konkrétního přístroje.

Dle požadavků, definované patřičnými normami a inspirací od konkurenčních výrobků bylo nastíněno několik návrhů hardwarového řešení včetně některých návrhů na konkrétní vlastnosti vyvíjeného zařízení. Následně byla zvolena koncepce s audio kodekem. Byla navrhována základní koncepce indikační jednotky včetně opatření proti rušení, avšak testovací vzorek nevyhověl zkoušce zemním proudem.

Následovalo hledání řešení toho problému v galvanickém oddělení, to se realizovalo USB izolátorem s DC/DC konvertorem. Následně byla přepracována deska plošného spoje a bylo při této příležitosti vypracováno řešení DPS, kdy lze jen změnou součástek vyrobit rozdílné verze indikační jednotky. Po osazení funkční desky byl proveden funkční test pro ověření většiny parametrů indikační jednotky upraveným software pro kalibraci senzorů pro stanovení podkladů pro korekční filtry.

Následoval návrh korekčních filtrů, filtry jsou realizovány s ohledem na hardwarovou strukturu indikační jednotky a na požadavky norem ČSN ISO 2954:2012 a ČSN ISO 10816. Hlavním filtrem je filtr pro měření mohutnosti vibrací dle první zmíněné normy, filtr je navržen pro frekvenční pásmo od 10 Hz do 1 kHz. Pro splnění frekvenčního rozsahu byly navrženy filtry pro měření mohutnosti vibrací na frekvenčním rozsahu 2 Hz až 500 Hz a frekvenčním rozsahu 10 Hz až 2 kHz navržený s ohledem na obě uvedené normy.

V prostředí programu Dewesoft bylo navrženo uživatelské rozhraní dle požadavků normy ČSN ISO 2954:2012 a byly zde implementovány korekční filtry.

Indikační jednotka byla za použití vyvinutých filtrů kalibrována. Kalibrace odhalila problém s nízkofrekvenčním šumem, který se negativně odrazil při integraci měřené veličiny ve vysokých frekvencích na krajních pásmech zmíněných filtrů. Nicméně indikační jednotka kalibraci vyhověla.

Pro zařízení bude nad rámec této diplomové práce navrženo pouzdro do průmyslového prostředí a bude se pracovat na potlačení šumu v nízkých frekvencích, například použitím operačních zesilovačů s lepší šumovou charakteristikou, než je zvolený operační zesilovač AD8515, nebo případnou změnou konfigurace nábojového zesilovače, v úvahu připadá také využít vhodného algoritmu filtrace.

## Seznam příloh

Příloha č. 1 – Kopie kalibračního listu použitého snímače zrychlení

## Použitá literatura

- [1] SALAVA, ING. CSC, Tomáš. Elektroakustická a elektromechanická měření. 1. vydání Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979, 304 s. Typové

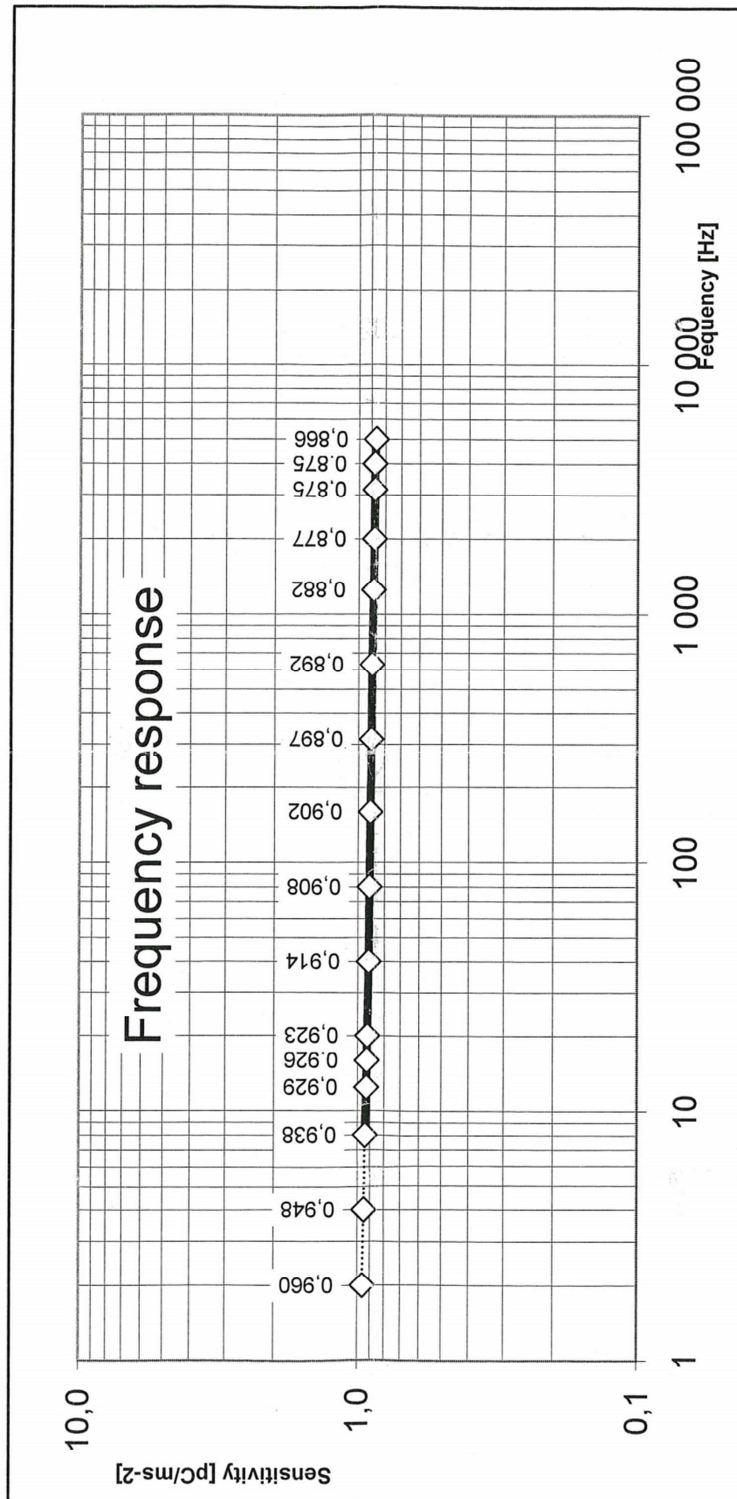
číslo L26-B2-IV-41/52 286.

- [2] SERRIDGE, BSc. Mark; LICHT, MSc, Torben R. Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook. Dánsko: K. Larsen & Son A/S, Revize 1987, 150 s. Typové číslo: DK BB 0694-12
- [3] HAASZ, PROF. ING. CSC, Vladimír; SEDLÁČEK, DOC. ING. CSC, Miloš. Elektrická měření přístroje a metody. 2. vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT - výroba, 1998. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [4] ČSN ISO 2954:2012 Vibrace strojních zařízení s rotačním a vrтанým pohybem – Požadavky na přístroje měření mohutnosti vibrací.
- [5] ŘÍHA, David. USB zvukové zařízení použité pro měření vibrací, Bakalářská práce, ČVUT, 2011
- [6] VACULÍKOVÁ, ING. CSC, Polina; VACULÍK, ING. Emil; kolektiv autorů. Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů. 1. vydání. Havlíčkův Brod: Tiskárny Havlíčkův Brod, 1998. 504 s. ISBN 80-7169-568-8.
- [7] Mancini, R. Op Amps For Everyone, Design Reference, Texas Instruments, 2002, Číslo dokumentu: SLOD006B
- [8] ŠIMÁNEK, Jakub. Program pro kalibraci senzorů vibrací, Bakalářská práce, ČVUT, 2009
- [9] RTCA/DO-160C, Odborové středisko pro letecké předpisy a normalizaci, 1992
- [10] DAVÍDEK, DOC. ING. CSC, Vratislav; LAIPERT, PROF. ING. DrSc., Miloš; VLČEK, PROF. RNDr. DrSc., Miroslav. Analogové a číslicové filtry. 2. Vydání. Praha, Vydavatelství ČVUT – výroba, 2004. 345 s. ISBN 80-01-02731-7
- [11] ČSN ISO 10816-1 (01 1412) Vibrace – Hodnocení vibrace strojů na základě měření na nerotujících částech – Část 1: Všeobecné směrnice.





# Příloha č. 1



MH118  
S/N 118007

20.9.2010  $f_r = 28,4 \text{ kHz}$

blau clamppeel om 160 gr. M2 SS

