

## Úloha 1

# Měření hluku a vibrací zvukoměrem

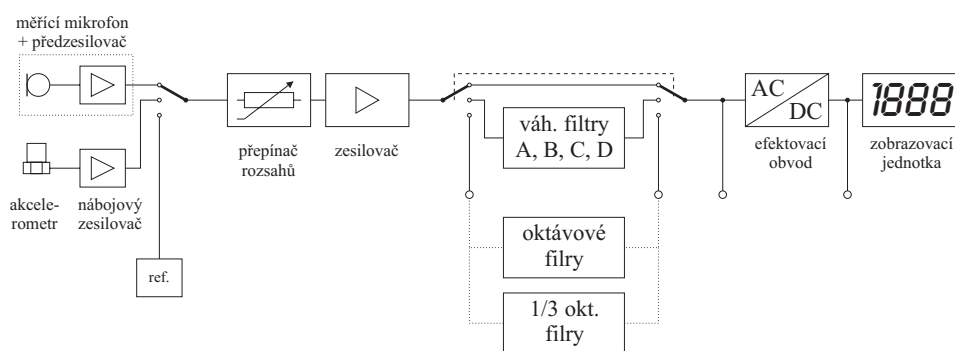
## 1.1 Zadání

1. Zkalibrujte, respektive ověřte kalibraci zvukoměru
2. Proveďte třetinooktávovou analýzu hluku zadaného zdroje v jednom místě
3. Zkalibrujte zvukoměr pro vibrace pomocí kalibračního stolku
4. Změřte kmitočtovou závislost mechanického zrychlení daného zdroje vibrací v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a spočítejte celkovou velikost vektoru mechanického zrychlení

## 1.2 Obecná část

### 1.2.1 Zvukoměr – akustický analyzátor

Základním měřicím přístrojem akustika je zvukoměr. Jedno z možných „klasických“ blokových schémat zvukoměru je zobrazeno na obrázku 1.1. V současné době s rozvojem digitálních měřicích přístrojů však i běžný zvukoměr často představuje mnohem komplikovanější měřicí řetězec, který je vhodný pro mnoho různých druhů akustických a vibračních měření. Nejdůležitějším rozšířením, které přinesla moderní digitální technika, je zabudovaný frekvenční analyzátor v reálném čase, který je v tomto schématu vyznačen jen jako sada filtrů.



Obrázek 1.1: Blokové schéma zvukoměru

Akustickým měničem na vstupu je obvykle mikrofon, ale na většinu zvukoměrů je možno pomocí redukce připojit i jiné měniče, jako například snímač zrychlení. Nejčastěji se používá kondenzátorový mikrofon, který má velmi dobré parametry. Především důležitá je lineární frekvenční charakteristika v celém slyšitelném pásmu. Druhou významnou vlastností je dobrá časová stabilita (při správném užívání i mnoho let). Velmi tenká kovová membrána je napnuta před pevnou (obvykle perforovanou) elektrodou, čímž tvoří deskový kondenzátor. Vzdálenost mezi elektrodami se pohybuje kolem  $10\ \mu\text{m}$ . Tlakové změny související s přítomností zvukového pole rozkmitávají membránu mikrofonu, čímž způsobují změnu kapacity kondenzátoru. Připojením polarizačního napětí se dosahuje

konstantního náboje na kondenzátoru, tím se změny kapacity převádějí na změny napětí. V bezprostřední vzdálenosti za mikrofonem je umístěn zesilovač s velkým vstupním odporem (nábojový zesilovač).

Zvukoměr dále obsahuje zesilovač(e) a analogové přepínání rozsahů. Další části již souvisejí se zpracováním signálů a zobrazováním výsledků měření a mohou být buď některé nebo všechny realizovány digitálně. Nejprve bývá zařazen modul, který umožňuje různé druhy filtrací. Zvukoměry standardně obsahují váhové filtry A, B, C a ev. D a možnost oktávové nebo třetinooktávové filtrace (interně nebo připojením externích filtrů). Váhové filtry A, B, C jsou inverzní ke křivkám stejné hlasitosti při hladinách 40, 80 a 120 dB, křivka D se používá pro letecký hluk. Dříve byly hodnoty korekcí dány pouze tabulkou a realizovány analogově. Pro realizaci v digitálních měřidlech jsou váhové filtry dány předpisem funkce, která např. pro A je

$$A(f) = 20 \log \frac{R_A(f)}{R_A(1000)}, \quad (1.1)$$

$$R_A(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20,6^2)(f^2 + 12200^2)\sqrt{(f^2 + 107,7^2)(f^2 + 737,9^2)}}. \quad (1.2)$$

V tabulce 1.1 jsou uvedeny hodnoty korekcí pro váhový filtr A.

Důležitou součástí, která do značné míry určuje třídu přesnosti zvukoměru, je převodník střídavého signálu na stejnosměrný. V analogovém provedení je výstupem napětí úměrné efektivní hodnotě vstupujícího střídavého napětí (tzv. efektovací obvod).

Zobrazovací jednotka je dnes již většinou digitální, její dynamické vlastnosti jsou však odvozeny od ručkových měřidel, jejichž rychlost reakce na změnu signálu závisí na mechanických a elektrických vlastnostech měřidla. Ty udávají časovou konstantu. Zobrazovaná hodnota pak přibližně odpovídá průměru za čas daný časovou konstantou. Normou jsou stanoveny časové konstanty S (slow) 1 s, F (fast) 200 ms a I (impuls), která je nesymetrická a pro náběh má hodnotu 35 ms a pro doběh (pokles) 2 s. Požadavky na elektroakustické parametry zvukoměrů jsou v normě IEC 651 a jejich dodatcích.

Frekv. (Hz)	korekce (dB)	Frekv. (Hz)	korekce (dB)	Frekv. (Hz)	korekce (dB)
20	-50,5	200	-10,9	2 k	+1,2
25	-44,7	250	-8,6	2,5 k	+1,3
31,5	-39,4	315	-6,6	3,15 k	+1,2
40	-34,6	400	-4,8	4 k	+1,0
50	-30,2	500	-3,2	5 k	+0,5
63	-26,2	630	-1,9	6,3 k	-0,1
80	-22,5	800	-0,8	8 k	-1,1
100	-19,1	1 k	0,0	10 k	-2,5
125	-16,1	1,25 k	+0,6	12,5 k	-4,3
160	-13,4	1,6 k	+1,0	16 k	-6,6
				20 k	-9,3

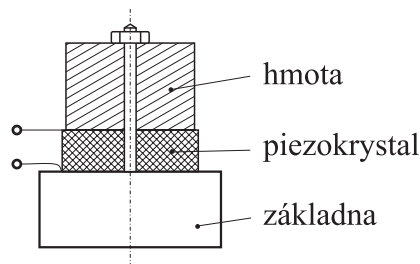
Tabulka 1.1: Korekce pro váhovou křivku A

V literatuře věnované akustice a normách souvisejících s akustikou se lze setkat s pojmem akustický analyzátor. Dříve tento termín označoval zařízení, které bylo uzpůsobeno především pro frekvenční analýzu různých akustických signálů a oproti zvukoměru bylo

v mnoha směrech výkonnější. S nástupem digitálních technologií a miniaturizace se tento rozdíl postupně stírá a analyzátořem rozumíme zařizení více či méně stacionární, které je určeno pro rozsáhlejší měření a analýzy. Nicméně současné moderní zvukoměry často obsahují možnost třetinooktávové nebo FFT analýzy v reálném čase, časový záznam signálu nebo i více paralelních kanálů, které umožňují kombinace různých druhů zpracování signálů. Všechny moderní zvukoměry mají možnost přenosu dat do počítače, ty lepší pak i obousměrnou komunikaci, čímž představují přenosný analyzátoř pro všeobecné akustické použití.

## 1.2.2 Měření vibrací

Měření vibrací patří k nástrojům, které jsou užitečné zejména s ohledem na snižování hluku. Vibrace povrchu tělesa jsou nejčastěji měřeny pomocí akcelerometru, který je připevněn k vibrujícímu povrchu. Nejběžnější konstrukce akcelerometru je znázorněna na obrázku 1.2<sup>1</sup>. Malý piezokrystal o určité tuhosti je zatížen hmotou (setrvačnou) tak, aby rezonanční frekvence  $f_r$  této soustavy byla dostatečně vysoko vzhledem k frekvenčnímu rozsahu měřených vibrací. Pracovní bod snímače se nastavuje mechanickým předpětím např. pomocí šroubu procházejícím středem snímače.



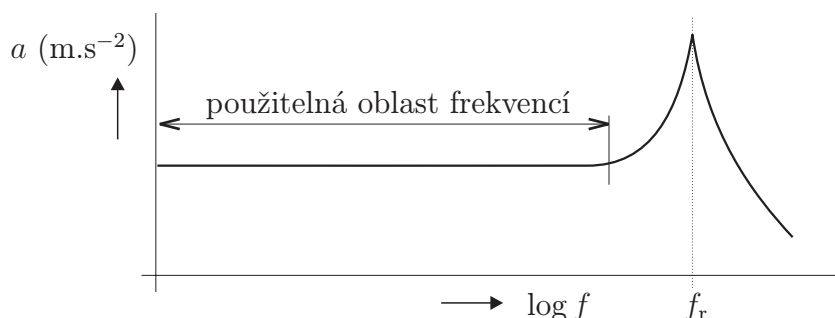
Obrázek 1.2: Schéma piezosnímače pro měření zrychlení vibrací

Na plochách piezokrystalu se objevuje náboj úměrný jeho namáhání. Je zřejmé, že čím větší je hmotnost, která zatěžuje krystal, tím bude i větší výsledný náboj a citlivost snímače a nižší rezonanční frekvence. Takový snímač však bude více ovlivňovat vibrující těleso. Proto je třeba podle potřeby měření učinit kompromis mezi celkovou hmotností snímače, citlivostí a frekvenčním rozsahem. Obvykle se požaduje, aby hmotnost akcelerometru byla menší než desetina hmotnosti sledovaného tělesa<sup>2</sup>. Typická frekvenční charakteristika akcelerometru je znázorněna na obrázku 1.3. Rezonanční frekvence závisí na konstrukci snímače a na způsobu upevnění snímače. Použitelná oblast frekvencí bývá od desetin Hz do  $0,3 f_r$ , kde je zajištěna chyba měření menší než 10%. Rezonanční frekvence se pro běžné akcelerometry pohybuje v rozmezí od desítek do stovek kHz. V případě, že je snímač upevněn napevno, bývá přišroubován (zespodu mívá otvor se závitem) nebo přilepen (doporučují se pryskyřice nebo vteřinová lepidla). Při krátkodobých měřeních se pro zajištění dobrého přenosu vibrací používají silikonové vazelíny nebo včelí vosk. Pro krátkodobá měření vibrací železných konstrukcí lze k uchycení použít magnetické příchytky (někdy v kombinaci s vazelínou), je třeba si však uvědomit, že tím narůstá

<sup>1</sup>Zde je uvedeno pouze principiální schéma, v reálných snímačích může být krystalů více, uspořádaných do různých konfigurací a jejich pracovní bod bývá upraven mechanickým předpětím.

<sup>2</sup>Nejedná se o celkovou hmotnost stroje či zařizení, ale hmotnost sledované části. Tu např. u tenkých tyčí a blan lze jen odhadovat.

celková hmotnost snímače, která ovlivňuje měřený objekt. Přidržování akcelerometru na měřeném povrchu rukou lze použít pouze orientačně (při použití vazelíny nebo vosku), neboť v takovém případě nejsou zajištěny standardní montážní podmínky.



Obrázek 1.3: Frekvenční charakteristika akcelerometru

Elektrický signál (náboj) na výstupu snímače naznačeném na obrázku 1.2, je úměrný zrychlení vibrací. Z hlediska vyzařování zvuku z povrchu vibrujících těles je užitečnější informace o rychlosti vibrací, neboť součin střední hodnoty druhé mocniny rychlosti, povrchu a vyzařovacího odporu dává vyzářený akustický výkon. Rychlosti vibrací získáme integrací, která bývá nejčastěji realizována analogovým integračním členem na vstupu nábojového zesilovače. Výchylka vibrací se pak získá druhou integrací z rychlosti.

Všechny tři měřené veličiny, zrychlení, rychlost a výchylka, jsou vektorové veličiny. Snímač schématicky znázorněný na obrázku 1.2 však měří složku zrychlení (po integraci i dalších veličin) pouze v jednom směru, který odpovídá směru namáhání piezoprisku snímače. Pro měření celého vektoru je třeba používat tříosých snímačů, které v sobě obvykle obsahují trojici jednoduchých snímačů s navzájem kolmými osami.

### 1.2.3 Kalibrace

Kalibrací snímačů mechanických nebo akustických veličin se rozumí stanovení vybraných charakteristik, popisujících vztah výstupního signálu snímače k snímané veličině, případně k jiným rušivým signálům nebo určení vlivu okolí snímače na některé jeho vlastnosti.

Kalibrátor pro akcelerometry je kompaktní zařízení, které v sobě zahrnuje vibrační stůl, spolu s budícím generátorem a snímač zrychlení spojený s vhodným indikátorem. Kalibrátor obvykle pracuje na jednom kmitočtu.

Pro přesnou provozní i laboratorní kalibraci mikrofonů lze použít pistonfon. Princip pistonfonu je znázorněn na obrázku 1.4. Do pracovního prostoru o objemu  $V$ , do nějž je zasunut kalibrovaný mikrofon, zasahuje píst o ploše  $S$ . Budicí systém uvádí píst do harmonického pohybu s amplitudou  $\eta$ . Za předpokladu, že je největší rozměr dutiny značně menší než vlnová délka budícího signálu, platí pro akustický tlak v pracovním prostoru

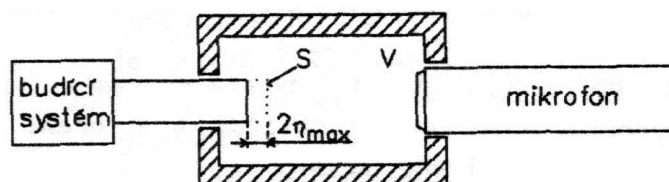
$$p = p_0 \frac{S}{V} \varkappa \eta, \quad (1.3)$$

kde  $p_0$  je atmosférický tlak a  $\varkappa$  je Poissonova konstanta.

Pro vyjádření hladiny zrychlení se použije vztah

$$L_a = 20 \log \frac{a}{a_0}, \quad (1.4)$$

kde  $a_0 = 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .



Obrázek 1.4: Princip pistonfonu

### 1.3 Postup měření

1. Nasadíte kalibrátor na mikrofon zvukoměru a ověřte, zda hladinu akustického tlaku uvedenou na kalibrátoru zobrazuje displej zvukoměru. Při odchylce nastavte správnou hodnotu.
2. Pro vhodný zdroj hluku (motor, vrtačka apod.) ve vzdálenosti přibližně 50 cm změřte:
  - hodnoty hladin akustického tlaku v třetinooktávných pásmech celého akustického rozsahu od 20 Hz do 20 kHz (lineární);
  - celkovou hladinu akustického tlaku zdroje (lineární);
  - celkovou hladinu akustického tlaku zdroje váhovanou filtrem A.

Dále změřte celkové hodnoty pro hluk pozadí. **Naměřené hodnoty zpracujte graficky.** Celkové hladiny hluku zdroje (lineární i váhovanou filtrem A) ověřte výpočtem z hodnot naměřených v třetinooktávných pásmech. Jak se při měření projeví hluk pozadí?

3. Akcelerometr připevněte na vibrační stůl. Amplituda zrychlení vibračního stolu je stejná jako gravitační zrychlení  $g$ , čemuž odpovídá v hladinovém vyjádření hodnota 136,8 dB (efektivní hodnota). Pro kalibraci na analyzátoru však doporučujeme nastavit hodnotu nižší, např. o 20 dB (v menu CALIBRATE). Následující měření je nutné o tuto hodnotu korigovat.
4. Změřte na kalibračním stolku hodnotu pro příčnou citlivost a **vyjádřete ji v procentech** citlivosti přímé.
5. Akcelerometr připevněte pomocí včelího vosku na zdroj vibrací ve vertikálním směru.
6. Změřte hladiny zrychlení vibrací v třetinooktávných pásmech v rozsahu 20–1k Hz a celkovou lineární hodnotu.
7. Akcelerometr připevněte na zdroj vibrací postupně v obou horizontálních směrech a opakujte bod 6.
8. Spočtete celkovou velikost vektoru mechanického zrychlení v jednotlivých třetinooktávných pásmech dle vztahu

$$a_c = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

a zpracujte graficky.

### **Poznámka k bodu 2:**

Při počítání celkové hladiny se sčítají energetické složky jednotlivých pásem, tzn. sčítají se akustické intenzity, kvadráty akustických tlaků, kvadráty zrychlení apod. Není možné sčítat akustické tlaky a v žádném případě hladiny!

## **1.4 Seznam přístrojů a pomůcek**

- Zvukoměr Quest 1800 nebo Rion NL 31
- Minilyzer ML1, NTi Audio
- předzesilovač BSWA MC 141
- Akcelerometr, Brüel & Kjær 4508-B-001, hmotnost 5 g
- Kalibrátor Quest, Typ QC-20
- Kalibrační stolec, Brüel & Kjær 4291
- osciloskop Agilent 54624A
- Laboratorní zdroj napětí