

# MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN

MUNI  
ARTS

**Kurz:**      **Studiová technika II**

---

**Autor:**     Jiří Schimmel

# Analýza v pásmech s konstantní relativní šířkou

# Analýza v kmitočtových pásmech

- Zvukový signál je nejprve filtrován kmitočtovým filtrem a poté je zjištěna
  - hladina elektrického napětí

$$L_{\Delta f} = 20 \log \frac{u_{\Delta f}}{u_0}$$

- hladina akustického tlaku:

$$L_{\Delta f} = 20 \log \frac{p_{\Delta f}}{p_0}$$

$u_{\Delta f}$ ,  $p_{\Delta f}$  - efektivní hodnota napětí resp. akustického tlaku v daném kmitočtovém pásmu



# Analýza v pásmech s konstantní relativní šířkou

- Měření hladiny akustického tlaku a dalších veličin v kmitočtových pásmech
- Střední kmitočet  $f_S$  a šířka pásma  $B$  roste logaritmicky (Constant Percentage Bandwidth, CPB).
- Nejčastěji měření v 1, 1/3, 1/6, 1/12 a 1/24-oktávných pásmech.

- Oktávová banka filtrů:

$$f_{Si+1} = 2f_{Si}, B_{i+1} = 2B_i, f_{Di} = 2^{-1/2}f_{Si}, f_{Hi} = 2^{1/2}f_{Si}$$

- Třetinooktávová banka filtrů:

$$f_{Si+1} = 2^{1/3}f_{Si}, B_{i+1} = 2^{1/3}B_i, f_{Di} = 2^{-1/6}f_{Si}, f_{Hi} = 2^{1/6}f_{Si}$$

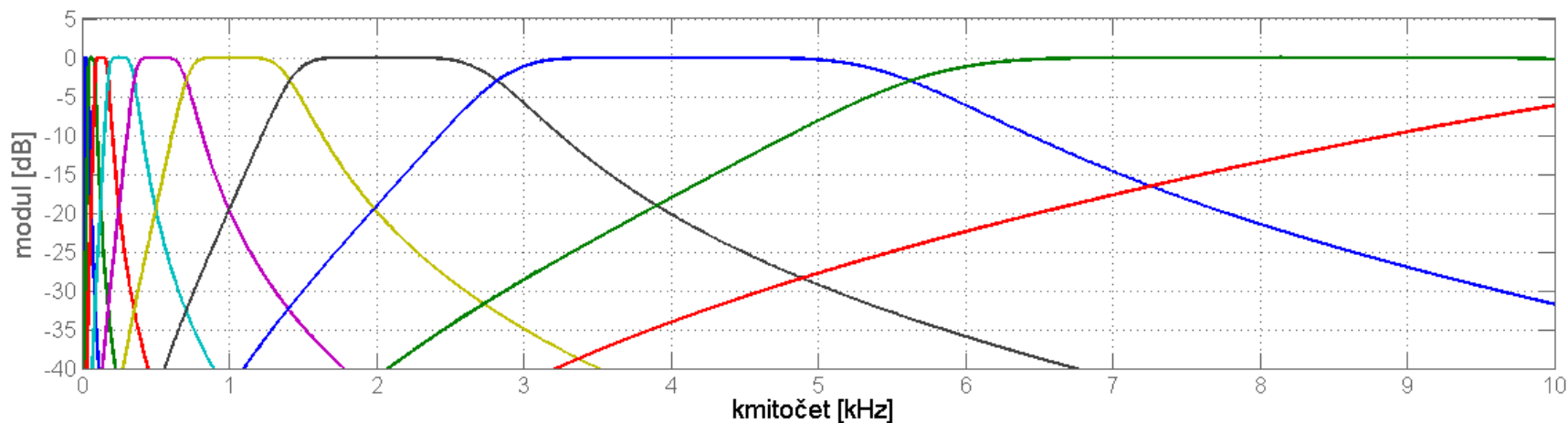
- Obecně:

$$f_{Si+1} = 2^{1/n}f_{Si}, B_{i+1} = 2^{1/n}B_i, f_{Di} = 2^{-1/2n}f_{Si}, f_{Hi} = 2^{1/2n}f_{Si}$$

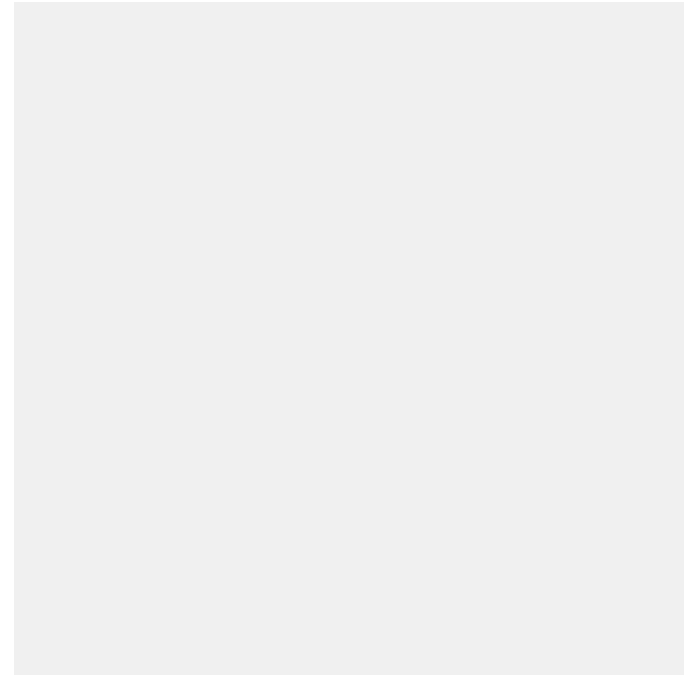
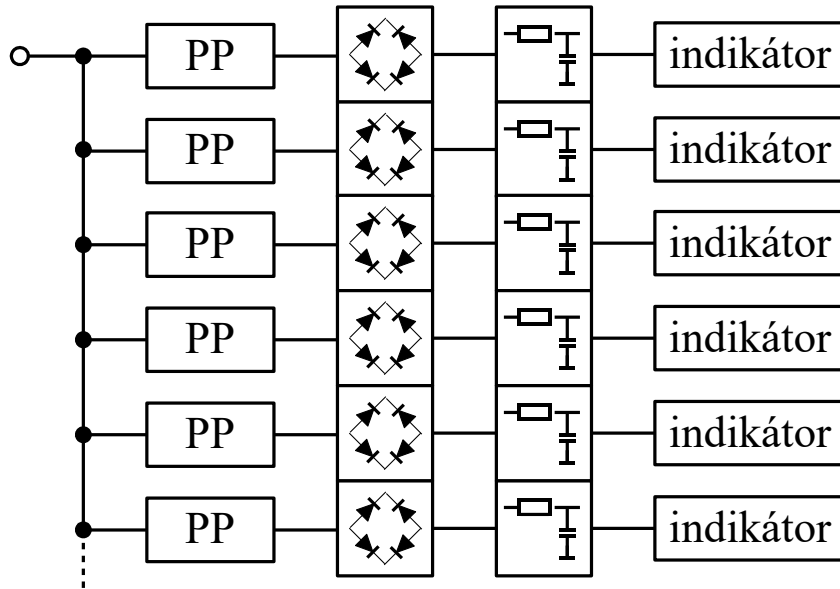
# Analýza v pásmech s konstantní relativní šířkou

- Střední kmitočty oktávových a třetino-oktávových pásem (ISO 3):

$f$ [Hz]	25	50	100	200	400	800	1600	3150	6300	12500
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	40	80	160	315	630	1250	2500	5000	10000	20000

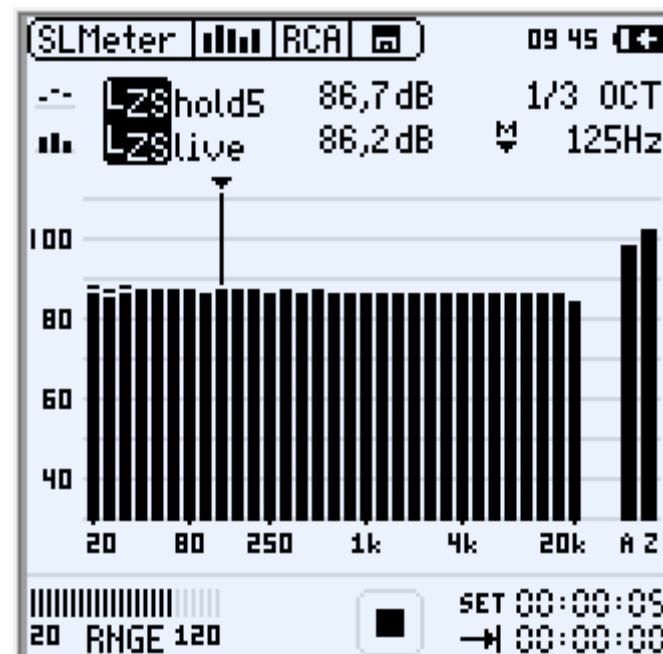
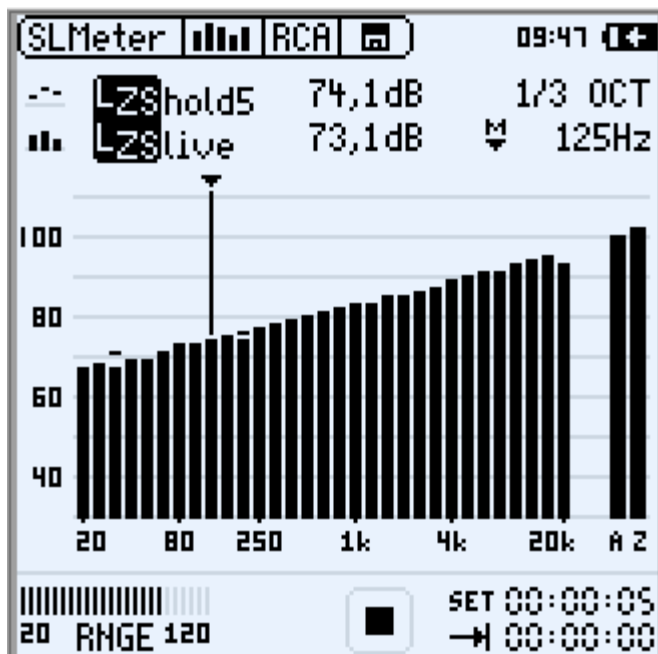


# Analýza v pásmech s konstantní relativní šířkou



# Analýza v pásmech s konstantní relativní šířkou

- CPB analýza bílého a růžového šumu



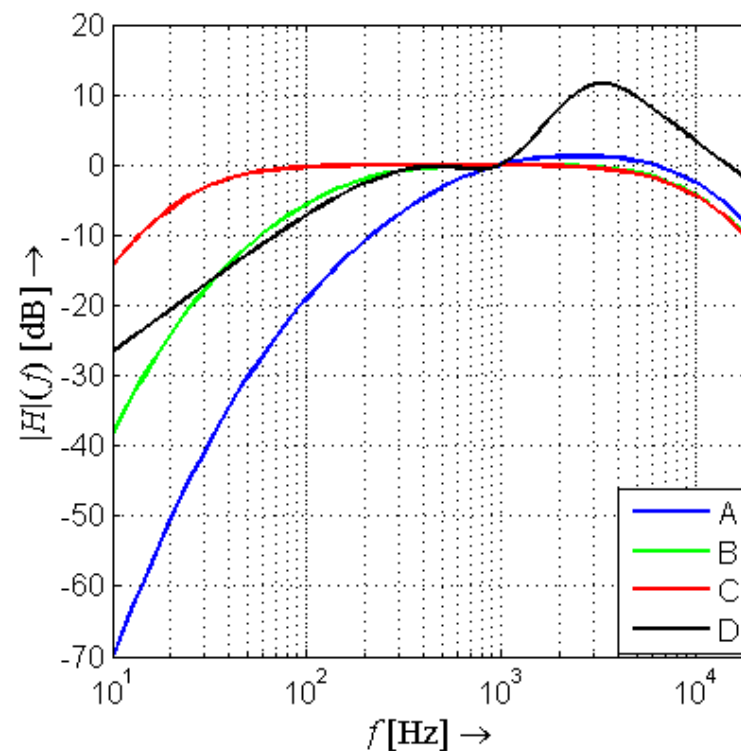
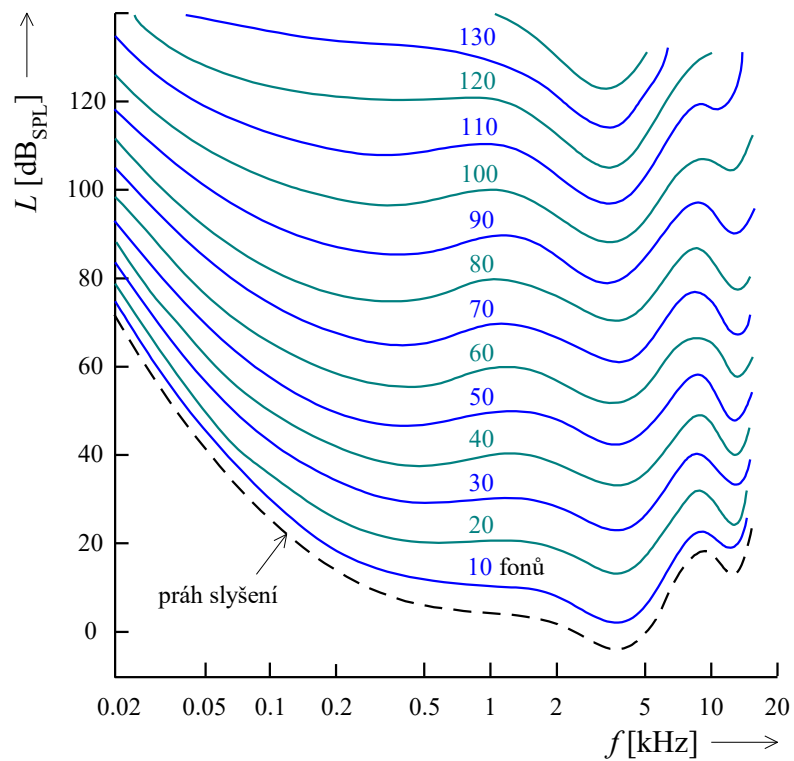
# Váhové filtry



# Váhové filtry

- Úprava přenosové charakteristiky měřicího řetězce podle subjektivního vjemu hlasitosti zvuku člověkem.
- Inverzní filtry ke křivkám stejné hlasitosti pro:
  - 40 Ph – váhový filtr typu A,
  - 70 Ph – váhový filtr typu B,
  - 100 Ph – váhový filtr typu C.
- Váhový filtr typu D: inverzní křivka pro 40 Noy podle Kryterovy metody určující míru nepříjemnosti či obtěžování hladinou rušivosti (používaný v letecké dopravě).
- Váhový filtr RLB (Revised Low-frequency B-curve): měření hlasitosti rozhlasového vysílání.
- Inverzní křivka X: při měření ve filmovém a nahrávacím průmyslu (ISO 2969).
- Váhový filtr Z (zero): bez korekce kmitočtové charakteristiky zvukoměru, nahradil nastavení Flat/Linear.

# Váhové filtry



# Váhové filtry

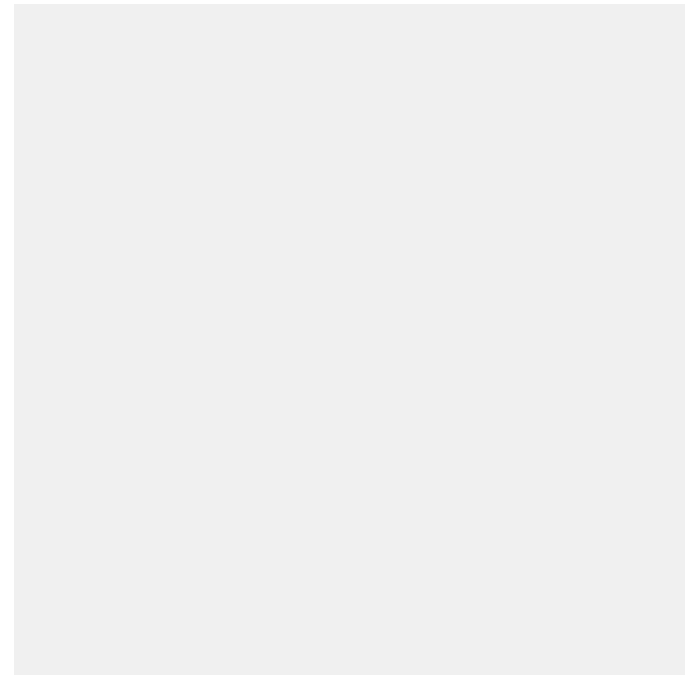
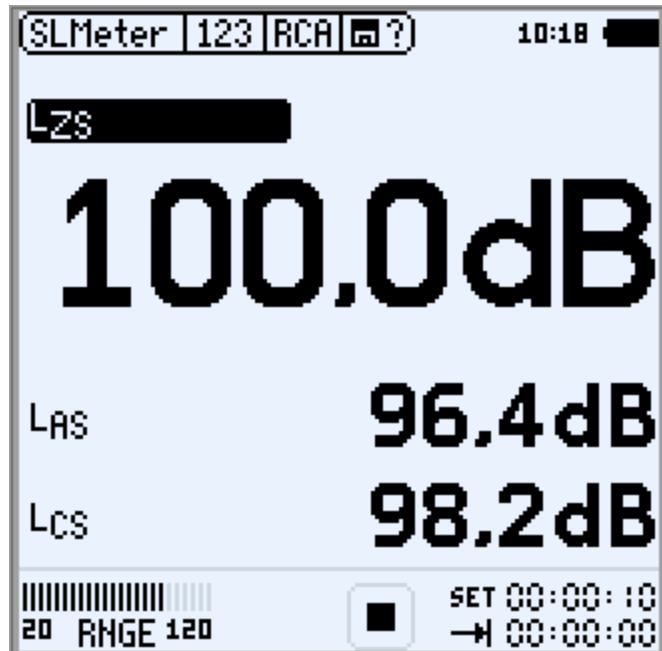
- Hladina zvuku – hladina akustického tlaku vážená váhovým filtrem:
  - typu A –  $L_A$  [dB<sub>A</sub>], [dB(A)],

$$L_A = 20 \log \frac{p_A}{p_0}$$

$p_A$  – ef. hodnota akustického tlaku změřená s použitím váhového filtru typu A.

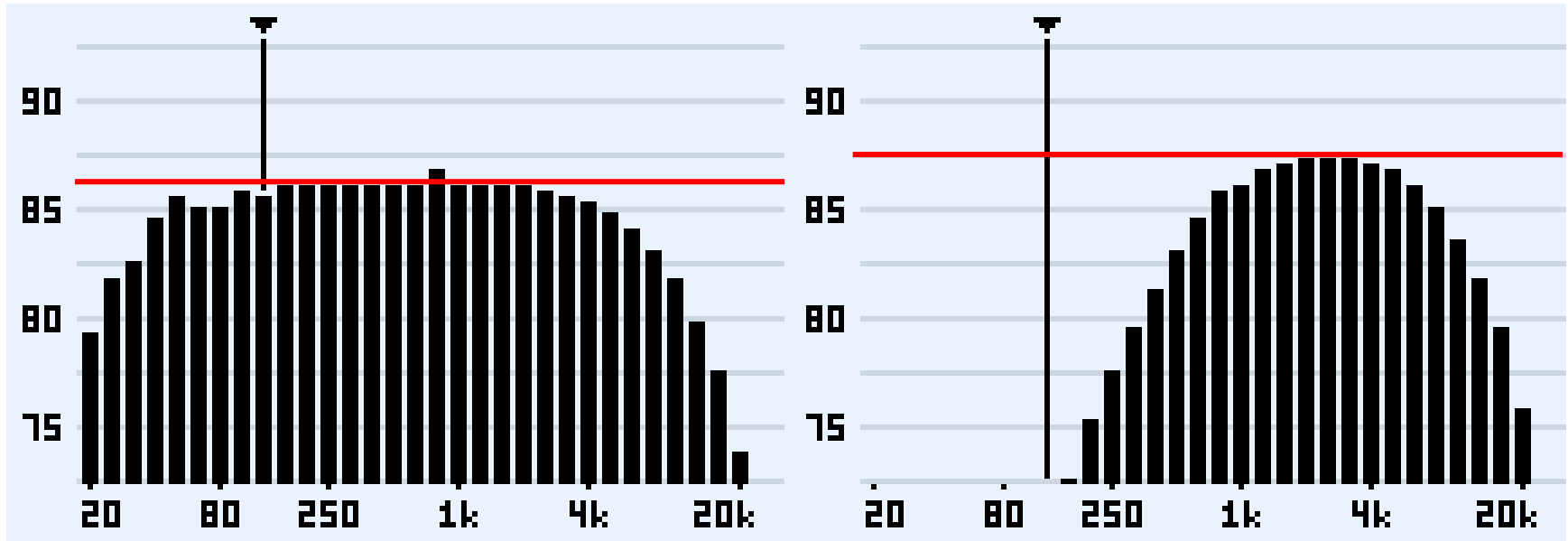
- typu B –  $L_B$  [dB<sub>B</sub>], [dB(B)],
  - typu C –  $L_C$  [dB<sub>C</sub>], [dB(C)],
  - typu D –  $L_D$  [dB<sub>D</sub>], [dB(D)].
- Vážená pásmová hladina akustického tlaku – hladina akustického tlaku, která odpovídá kmitočtové korekci váhového filtru (většinou typu A) v daném pásmu.

# Váhové filtry



# Váhové filtry

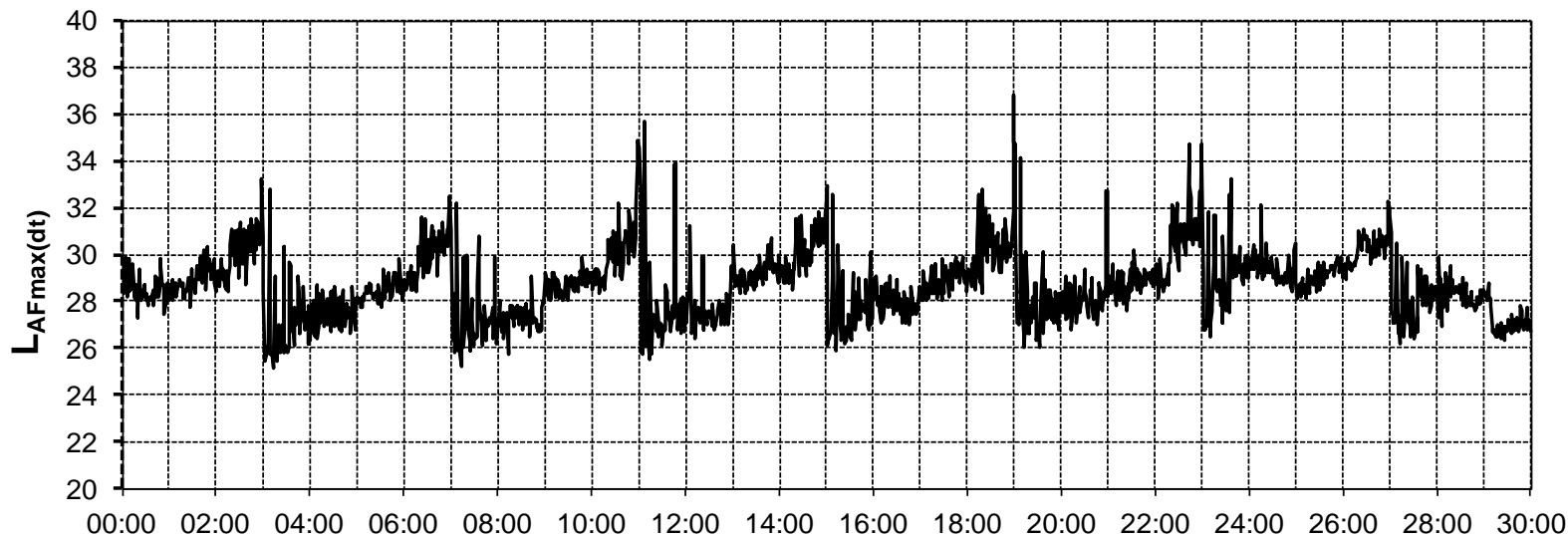
- Srovnání váhových filtrů A a C



# Statistická analýza měření

# Statistická analýza měření

- Hladiny zvuku u běžných průmyslových hluků v čase kolísají, někdy i v širokém rozsahu hodnot.
- Hledáme statistické rozložení měřené veličiny a její momenty (střední hodnota, rozptyl, směrodatná odchylka, histogram, distribuční funkce, ...)



## Ekvivalentní hladina akustického tlaku

- Ekvivalentní hladina akustického tlaku: střední hodnota hladiny akustické tlaku změřeného v určitém časovém intervalu  $T$ :

$$L_{\text{eq},T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt$$

$$L_{\text{eq},T} = 10 \log \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} 10^{L(dt_i)/10}$$

- Ekvivalentní hladina zvuku A:

$$L_{\text{Aeq},T} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_A(t)/10} dt \quad L_{\text{Aeq},T} = 10 \log \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} 10^{L_A(dt_i)/10}$$

- obdobně  $L_{\text{Beq},T}$  a  $L_{\text{Ceq},T}$ .



## Mezní hladiny akustického tlaku

- Maximální a minimální hladina akustického tlaku  $L_{\max}$  a  $L_{\min}$  – maximální a minimální hodnota zaznamenaná během celého měření.
- Hladina špičkového akustického tlaku C –  $L_{C\text{peak}}$ : špičková hodnota akustického tlaku měřeného s filtrem C s definovanou odezvou na jednu periodu a půlperiodu harmonického signálu (ISO 61672-1).

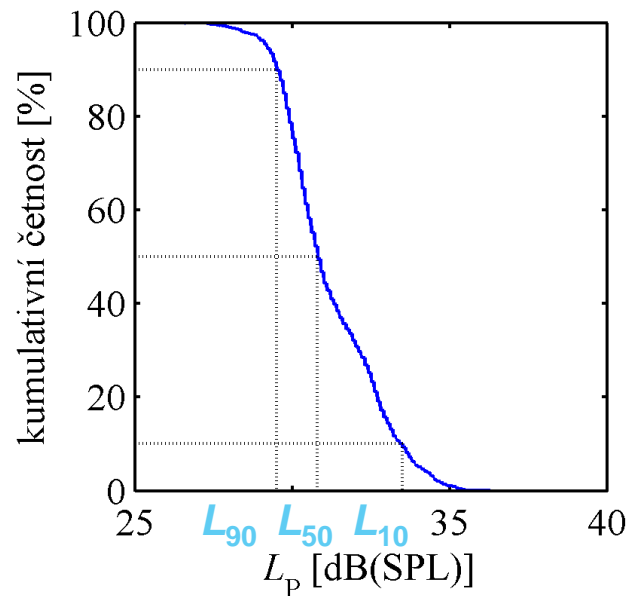
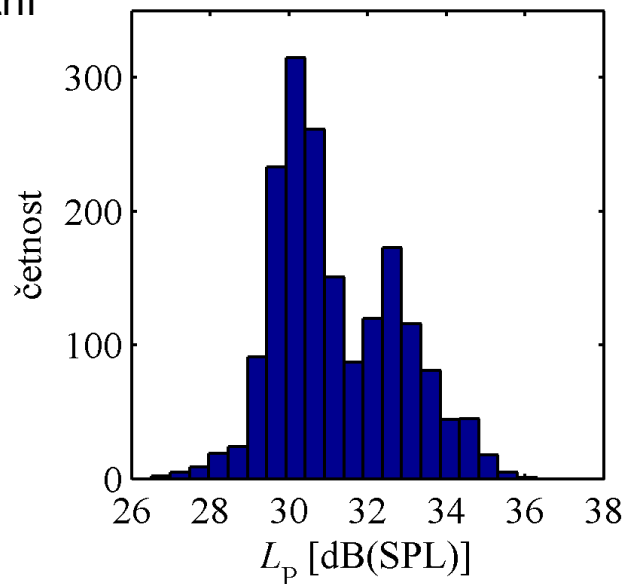
počet period testovacího signálu	kmitočet testovacího signálu	$L_{C\text{peak}} - L_C$
jedna	31,5 Hz	2,5 dB
jedna	500 Hz	3,5 dB
jedna	8000 Hz	3,4 dB
kladná půlperioda	500 Hz	2,4 dB
záporná půlperioda	500 Hz	2,4 dB

# Statistická analýza měření

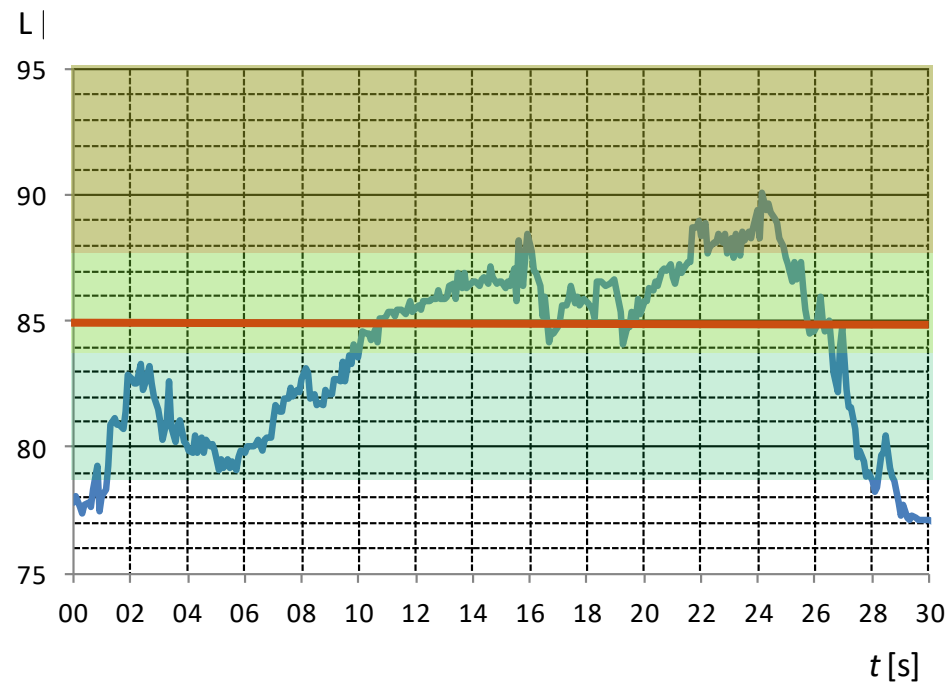
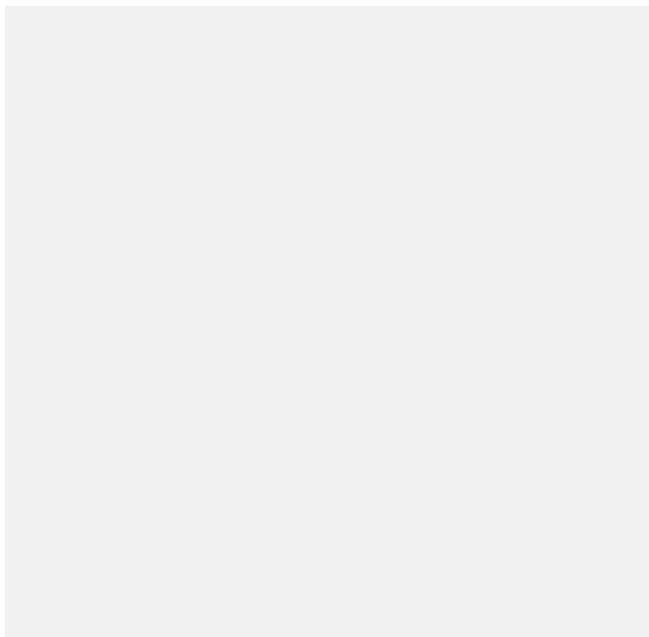
- Histogram: četnost výskytu daných hladin zvuku v průběhu měření.
- Distribuční funkce:  $F(x, t) = P\{\xi(t) < x\}$

$$F(L_N, t) = P\{L_{\text{eq}}(t) > L_N\}$$

$L_N$  - pravděpodobnostní  
hladina



# Statistická analýza měření



# Zvukoměr

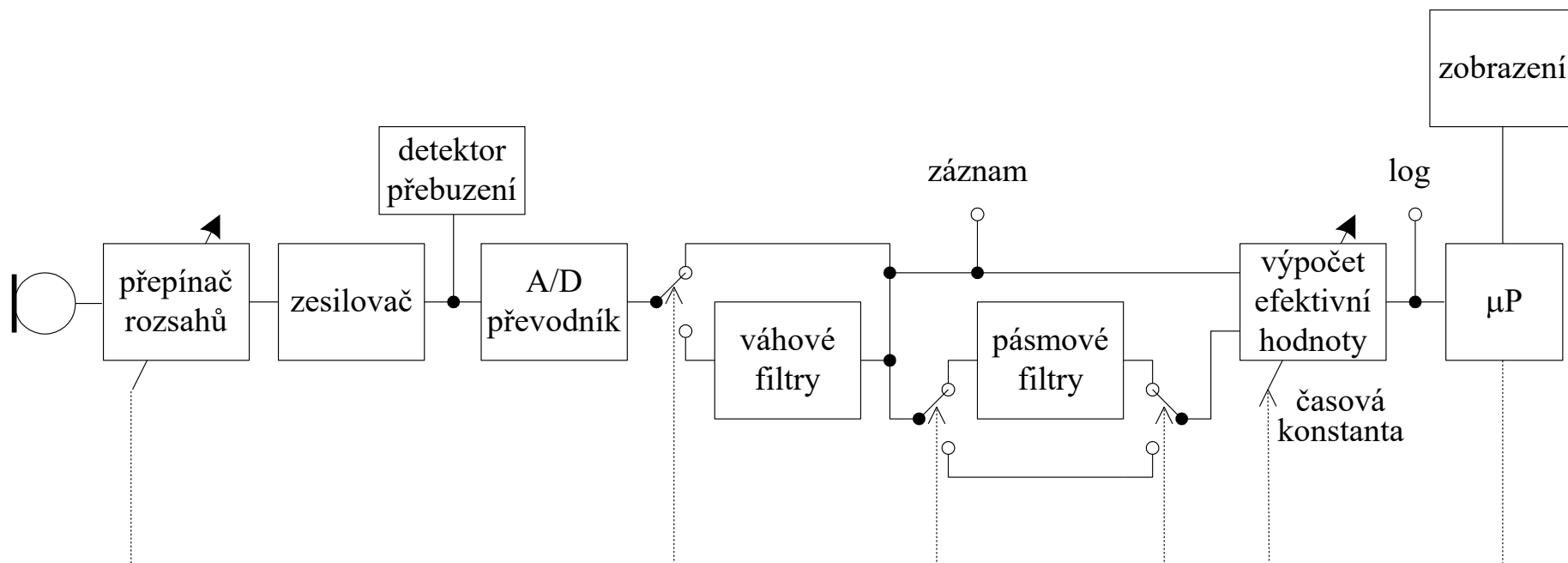
# Zvukoměr

- Zvukoměr (Sound Level Meter, SLM): přesné elektrické zařízení reagující na zvuk podobně jako lidský sluch a umožňující objektivní a reprodukovatelné měření hladin hluku.
- Měřič efektivní hodnoty napětí na výstupu snímacího prvku s možností převodu efektivní hodnoty měřeného výstupního napětí snímače na hodnotu hladiny akustického tlaku.
- Vlastnosti zvukoměrů jsou normalizovány (IEC 61672-1) a jsou stanoveny limitní tolerance, aby bylo možné naměřené veličiny srovnávat a měření reprodukovat.

# Zvukoměr



# Digitální zvukoměr



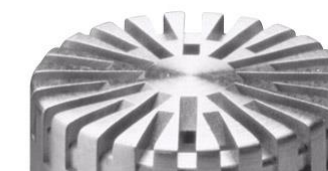
# Mikrofon zvukoměru

- Elektrostatický měnič – kondenzátorový mikrofon:
  - nutnost polarizačního napětí (až 200 V), přiváděné přes zesilovač náboje,
  - předzesilovač musí být umístěn co nejbližší mikrofonu.
- Výhody:
  - lehce dosažitelná konstantní kmitočtová charakteristika,
  - vysoká a stálá citlivost (nemění se ani po mnoha letech),
  - všesměrová charakteristika,
  - provozní stálost,
  - malé rozměry.



# Konstrukce mikrofonu zvukoměru

- Mikrofon samotný představuje překážku ve zvukovém poli, vlivem odrazů a ohybů na pouzdře mikrofonu narůstá akustický tlak na vyšších kmitočtech
- Průměr mikrofonu typicky 1/8“, 1/4“, 1/2“, 1“
- Mikrofony pro použití ve volném poli (free-field): měří skutečný akustický tlak, jako by mikrofon ve zvukovém poli nebyl (kompenzace kmitočtové odezvy na vyšších kmitočtech). Je nutné je orientovat směrem ke zdroji.
- Tlakové mikrofony (pressure, pressure- field): měří skutečný akustický tlak na membránu (nemají kompenzaci)
- Mikrofony pro použití v difúzním poli (diffuse-field) / v poli s náhodným dopadem (random-incidence): mají kompenzaci pro všesměrový dopad vlnění



# Citlivost mikrofonu

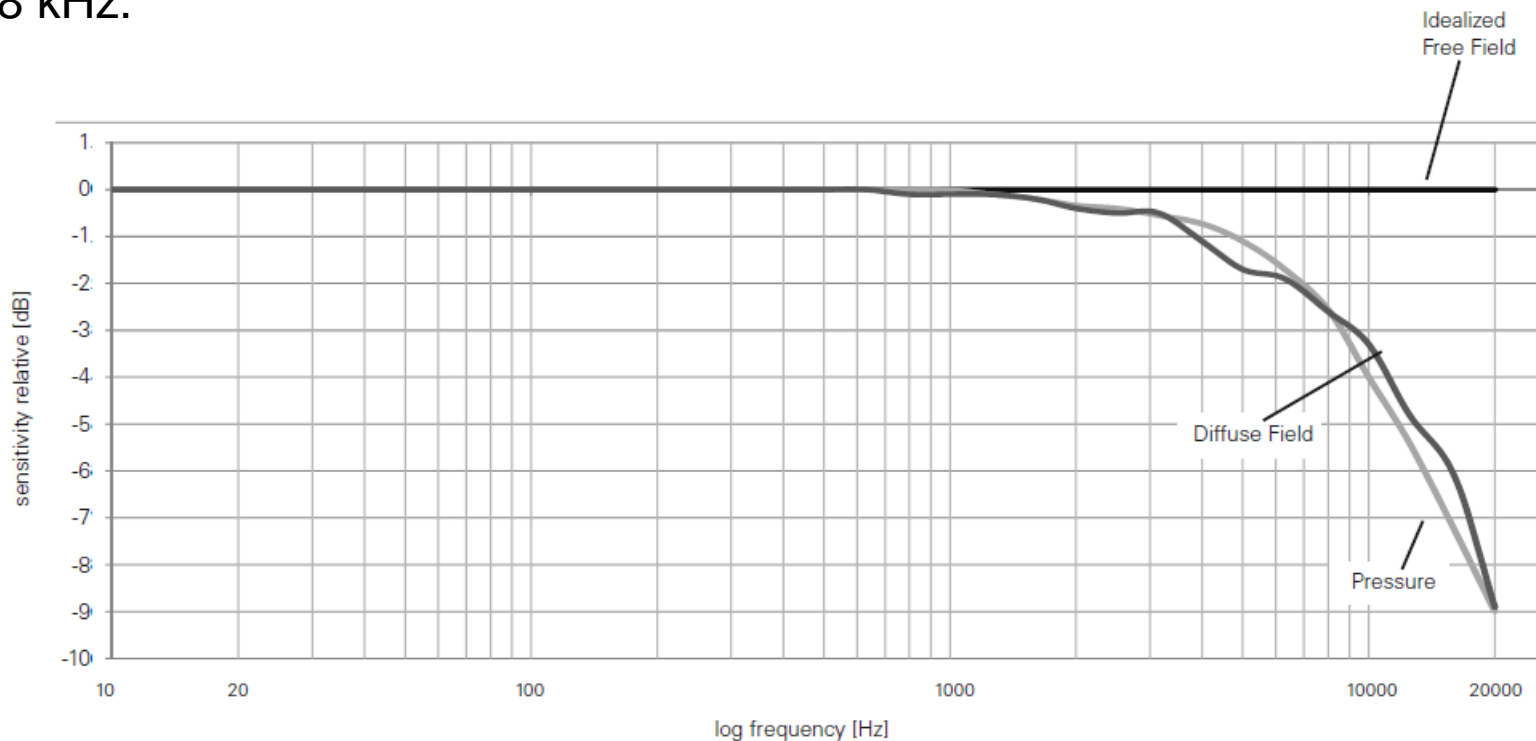
- Citlivostí jsou násobeny změřené hodnoty napětí na výstupu mikrofonu:

$$L_p = 20 \log \frac{U_{ef}}{\eta p_0} \quad [\text{dB}_{\text{SPL}}]$$

- Citlivost mikrofonu lze zjistit:
  - z kalibračního listu dodaného výrobcem (tištěný, elektronický),
  - pomocí technologií Electronic Datasheet (TEDS, ASD) – paměť umístěná v mikrofonu pro uložení informací (model, sériové číslo, citlivost, historie kalibrace).

# Konstrukce mikrofonu zvukoměru

- Vliv zvýšení akustického tlaku se projevuje až na vysokých kmitočtech u 1/2" mikrofonu je kmitočtová charakteristika různých konstrukcí stejná až do cca 8 kHz.



# Ochrana mikrofonu proti větru

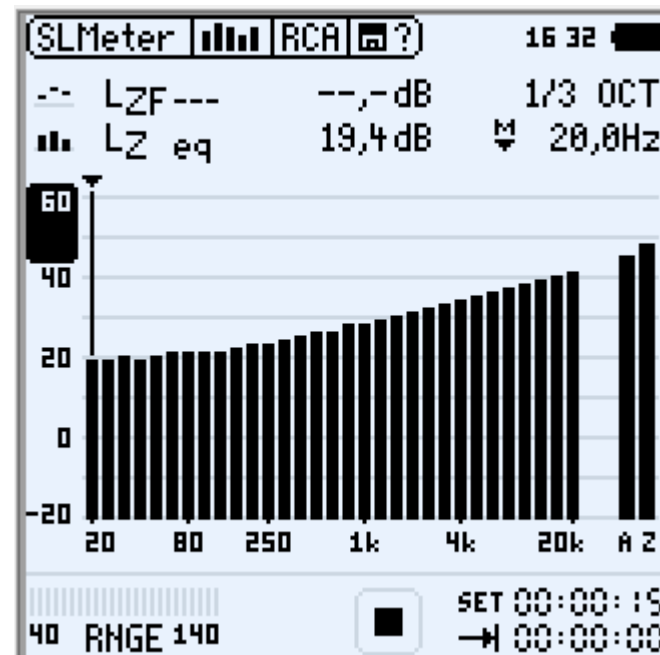
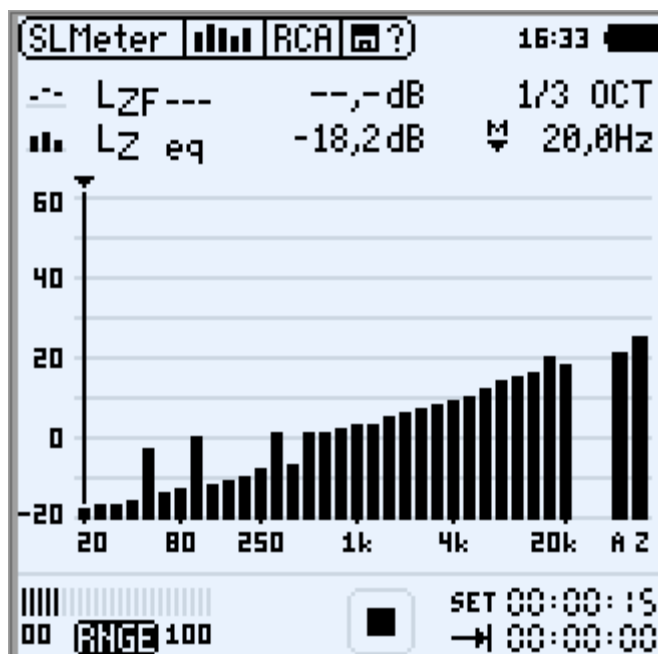
- Při rychlostech větru od 3 m/s jsou ovlivněny hladiny akustického tlaku pod cca 40 dB<sub>SPL</sub>.
- Větrná ochrana mikrofonu (windscreen):
  - akustický labyrint měnící dopad větru na membránu mikrofonu na všesměrový,
  - redukce zvukových artefaktů způsobených větrem o 15 dB,
  - snížení citlivosti mikrofonu na vyšších kmitočtech < 1 dB.



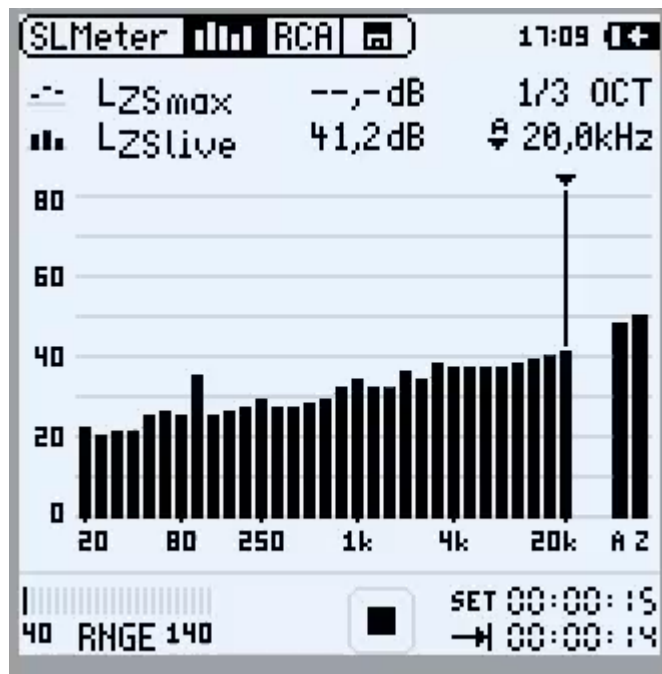
# Dynamický rozsah zvukoměru

- Špatné nastavení dynamického rozsahu (předzesilovače zvukoměru) může změnit zpracováváný signál:
  - při nastavení malého rozsahu může dojít k přebuzení vstupu, které způsobí limitaci signálu = vznik nelineárního zkreslení,
  - při nastavení velkého rozsahu nebude vlastní šum měřidla zanedbatelný vůči signálu a zkreslí naměřené hodnoty (viz sčítání hladin hluku).
- Na hladinu rušivých napětí zvukoměru působí i vnější vlivy (elektromagnetické pole, vibrace, ...).

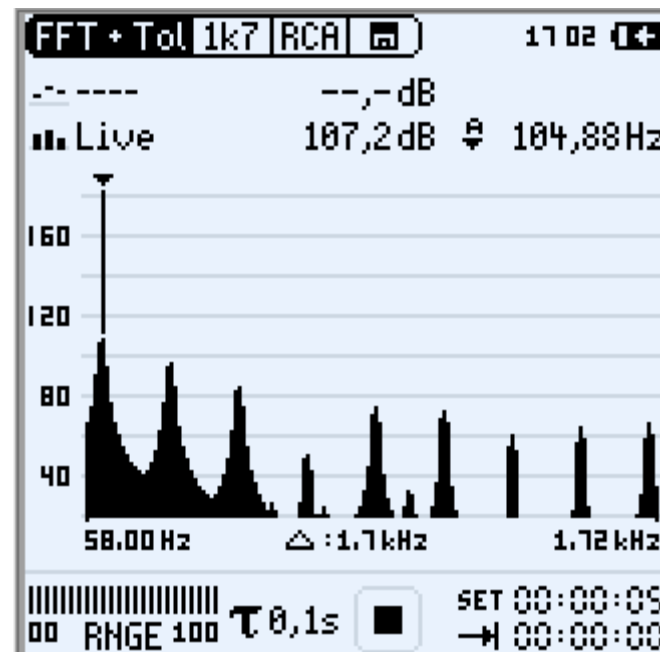
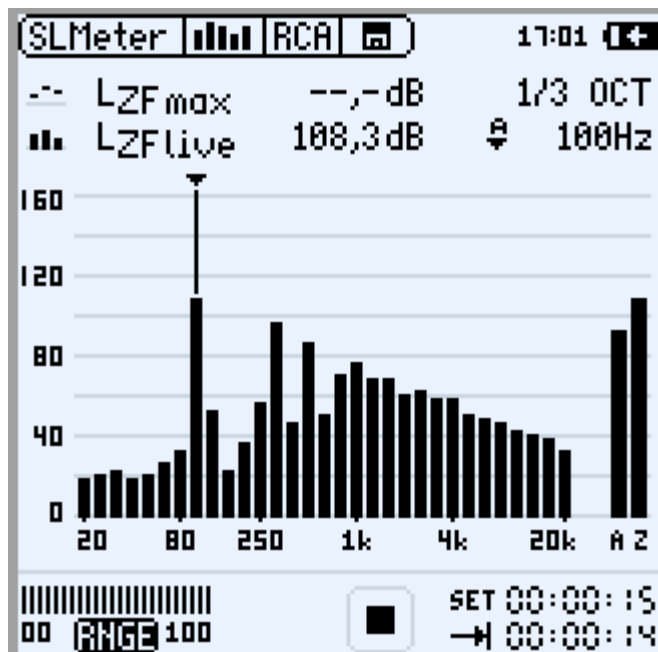
# Vlastní šum zvukoměru



# Špatná volba rozsahu – velký rozsah

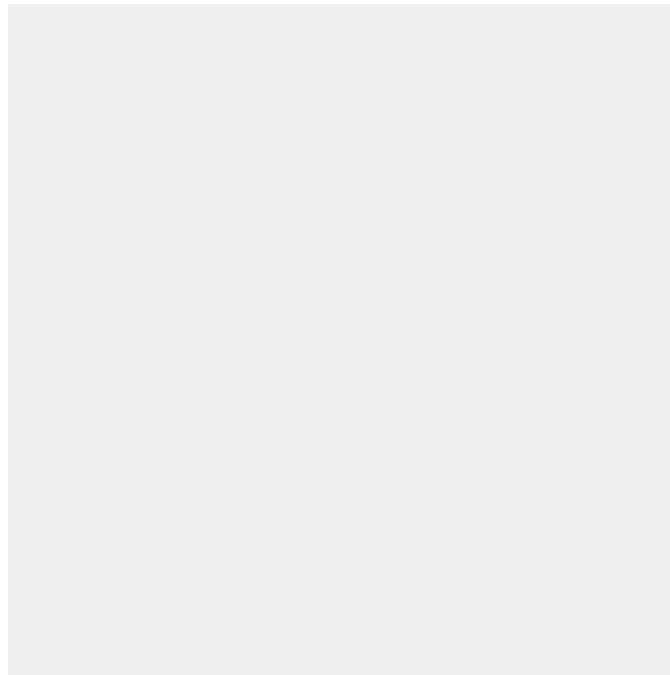


# Přebuzení zvukoměru





# Špatná volba rozsahu – malý rozsah



# Časově vážená hladina akustického tlaku

- Time-weighted sound level, IEC 61672-1:
  - 20násobek dekadického logaritmu poměru efektivní hodnoty akustického tlaku k referenčnímu akustickému tlaku; efektivní hodnota akustického tlaku se získá s využitím standardního kmitočtového a standardního časového vážení

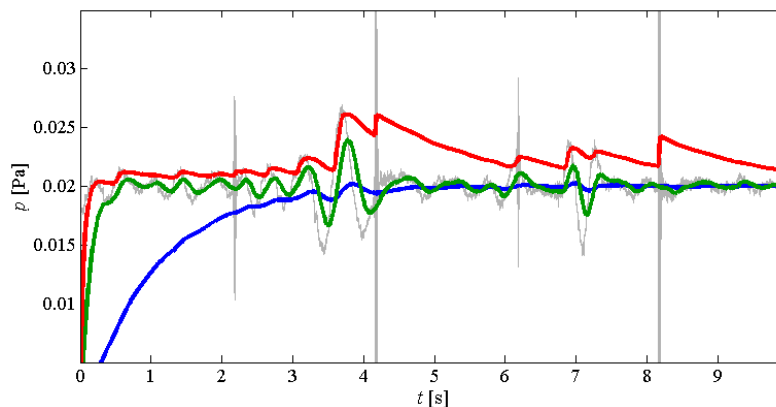


$$L_{\tau}(t) = 20 \log \left( \frac{1}{p_0} \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t p^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi} \right)$$

- $\tau$  – exponenciální časová konstanta časového vážení
- $\xi$  – pomocná proměnná časové integrace do doby pozorování  $t$
- $p(\xi)$  – okamžitý akustický tlak
- $p_0$  – referenční akustický tlak

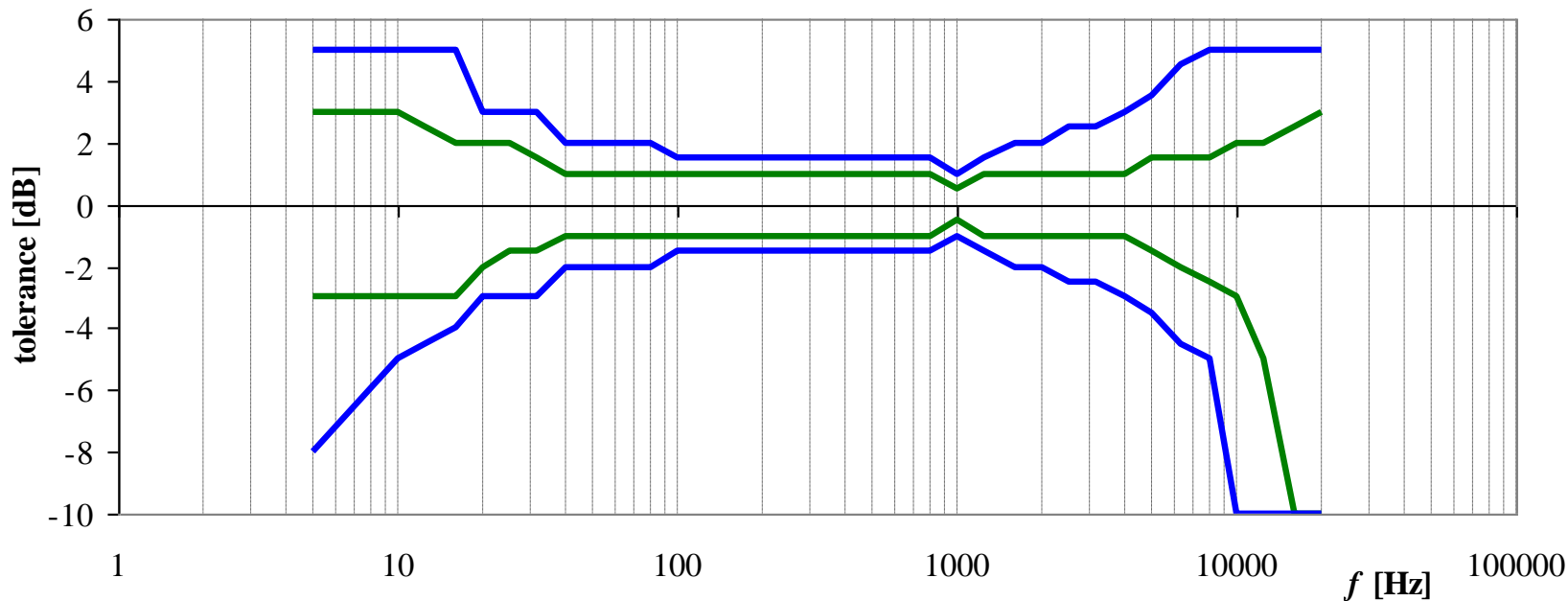
# Časově vážená hladina akustického tlaku

- Pomocí dolní propusti (integračního článku) s jedním reálným pólem na kmitočtu  $f_c = 1/\tau$ 
  - Slow (S) – 1 s (stacionární hluky)
  - Fast (F) – 125 ms (krátkodobě proměnné hluky)
  - Impulse (I) – 35 ms (impulsní hluky)
    - Za výpočet druhé mocniny signálu zařazen detektor signálu
    - rychlost poklesu je detektorem signálu zpomalena na 2,9 dB/s (časová konstanta 1500 ms)

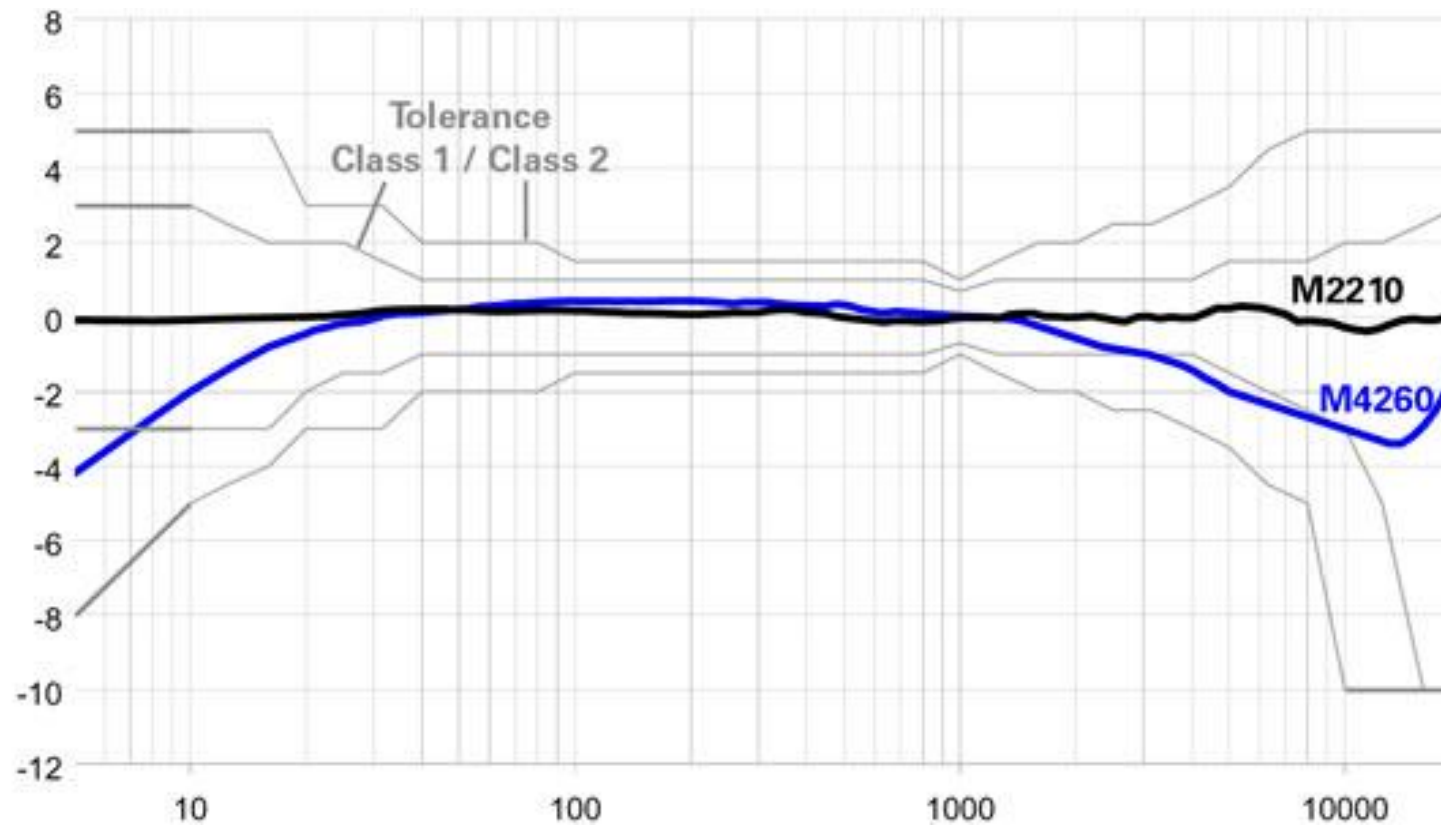


# Kvalitativní třídy zvučoměrů

- Toleranční pásma modulové kmitočtové charakteristiky zvučoměrů:
  - class 1,
  - class 2.



# Kvalitativní třídy zvukoměrů



# Kalibrace měřicího řetězce

# Kalibrace

- Kalibrace = soubor úkonů, kterými se stanoví za specifikovaných podmínek vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony.
- Kalibrace je metrologický úkon, který probíhá podle písemně daného postupu, ze kterého je vydán protokol, který se provádí v kalibračních lhůtách a jehož důležitým výsledkem je nejistota při kalibraci.
- Justace (justování) = příprava měřidla k měření, zejména kompenzace na aktuální barometrický tlak. Není vydán protokol, nemá lhůty a není třeba stanovit nejistoty.
- V praxi je justování nesprávně označováno jako kalibrace!

# Kalibrace zvukoměru

- Při kalibraci je na vstup mikrofonu přiveden harmonický zvukový signál známé hladiny akustického tlaku a zvukoměr podle ní a změřené efektivní hodnoty napětí na vstupu při justování spočítá převodní konstantu – citlivost:

$$\eta = \frac{U_{\text{ef}}}{p} \quad [\text{V/Pa}]$$

- Citlivostí jsou násobeny změřené hodnoty napětí na výstupu mikrofonu:

$$L_p = 20 \log \frac{U_{\text{ef}}}{\eta p_0} \quad [\text{dB}_{\text{SPL}}]$$



# Způsoby kalibrace

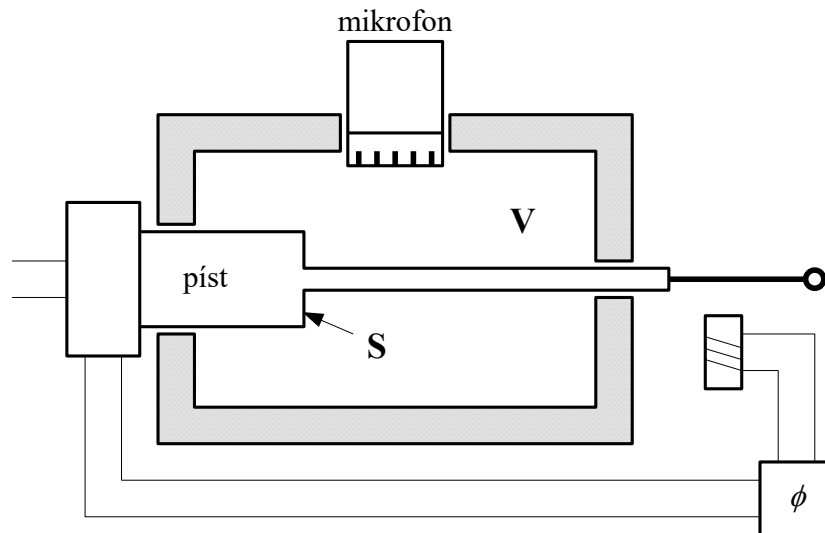
- Elektrická kalibrace: zajištění zobrazení správné velikosti elektrického napětí přivedeného na vstup zvukoměru, provádí se pomocí vnitřního zabudovaného zdroje kalibračního napětí.
- **Akustická kalibrace:** zajištění zobrazení správné velikosti hladiny akustického tlaku přivedeného k ústí mikrofonu. Provádí se pomocí akustického kalibrátoru nebo pistonfonu.
- Elektrostatická kalibrace: využívá toho, že kondenzátorový mikrofon je reciproční měnič, citlivost je změřena v celém kmitočtovém pásmu ve funkci akustického vysílače.
- Reciproční kalibrace: primární standard kalibrace, využívá reciprocity měniče a známé akustické impedance, kterou jsou spojeny dva mikrofony.
- Kalibrace ve zvukovém poli s náhodným dopadem zvuku: využívá měření činitele směrovosti zvukoměru pomocí známého zdroje zvuku.
- Kalibrace v difúzním zvukovém poli: využívá referenčního zvukoměru.

# Akustická kalibrace pistonfonem

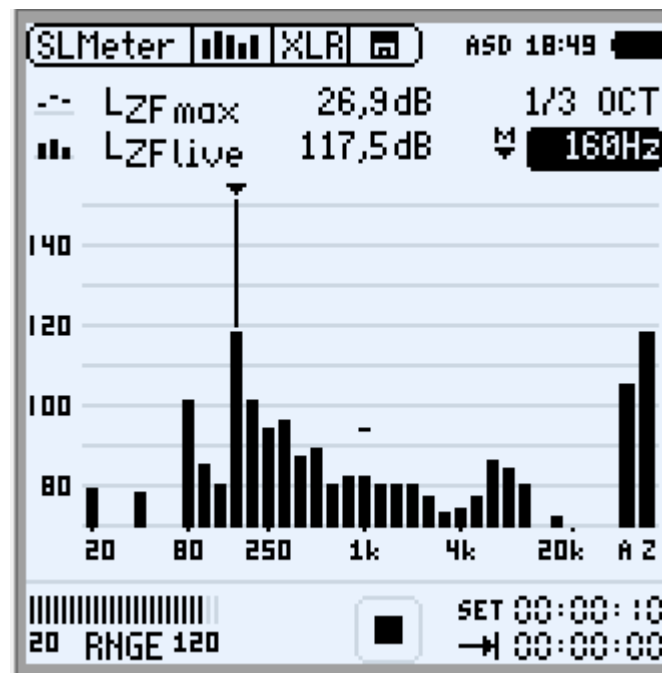
- Pistonfon: píst kmitající do definovaného objemu uzavřeného membránou mikrofonu, do kmitočtu 250 Hz.

- Akustický tlak vytvořený pístem v uzavřeném objemu: 
$$p = \frac{Sh}{2V\sqrt{2}} p_{00}\chi$$

$p$  – efektivní hodnota akustického tlaku,  $p_{00}$  – barometrický tlak,  $S$  – aktivní plocha pístu,  $\chi$  – Poissonova konstanta,  $h$  – výchylka pístu,  $V$  – objem komůrky.

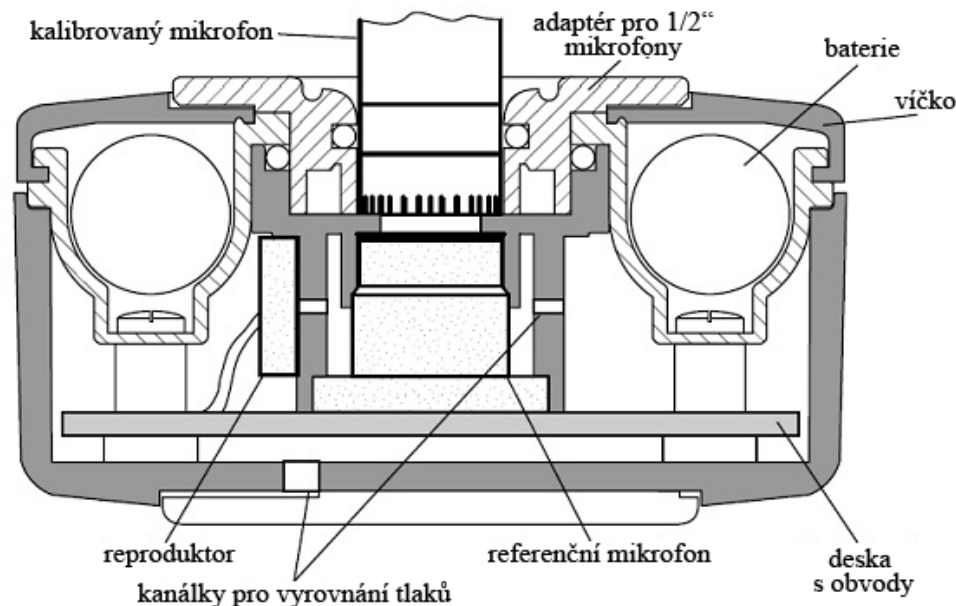


# Akustická kalibrace pistonfonem

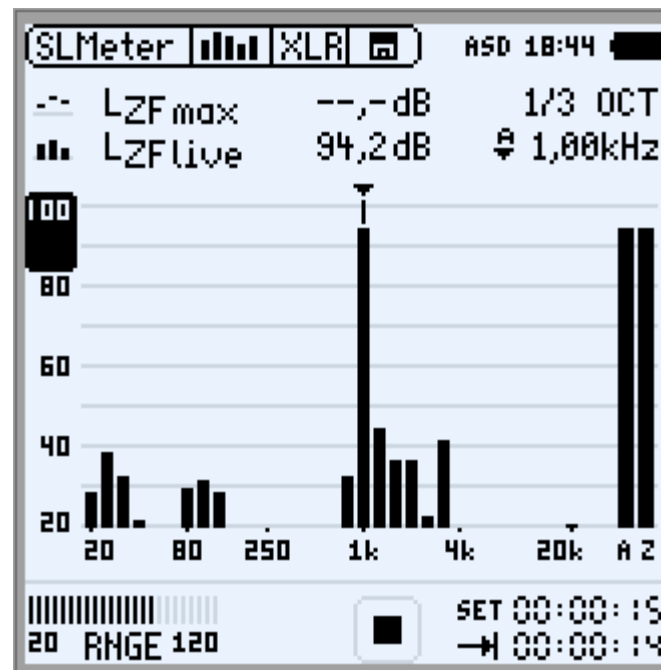
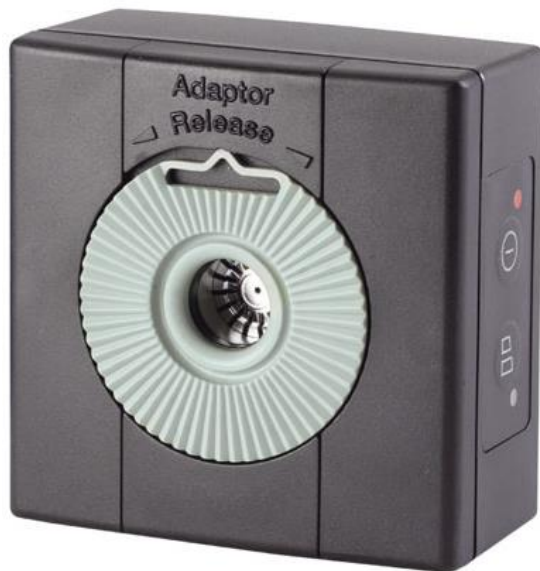


# Akustická kalibrace tónovým generátorem

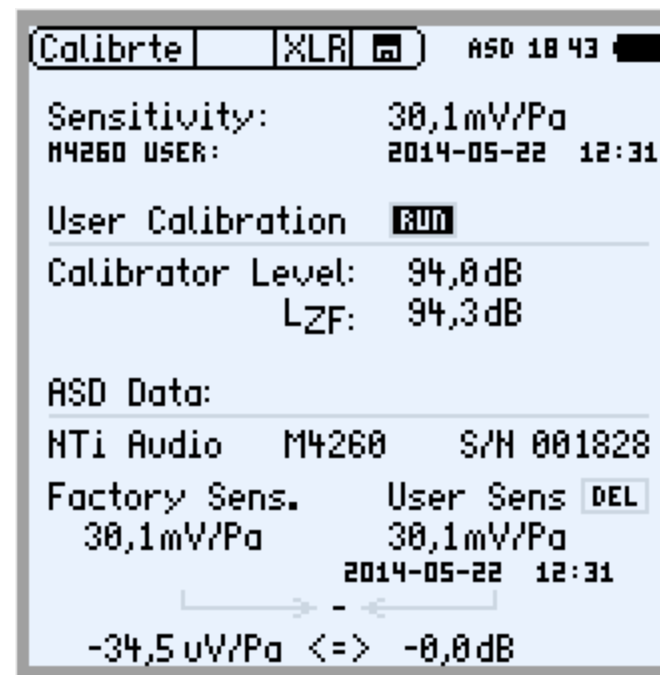
- Tónový kalibrátor: generátor s výstupem na piezoelektrický reproduktor vyzařující do měřicí komůrky, kmitočet 1000 Hz.
- Kompenzace malých úniků tlaku, detekce nezasunutého mikrofonu, možnost použití více kalibračních hladin (94 dB<sub>SPL</sub>, 114 dB<sub>SPL</sub>)



# Akustická kalibrace tónovým generátorem



# Kalibrace zvukoměru



# Měření akustických veličin