

Význam časových charakteristik S, F a I vo zvukomeroch

Ing. Milan Drahoš

www.d2r.sk

1. Úvod

Mikroprocesová technika a digitalizácia elektrických signálov výrazne ovplyvnila konštrukciu a aplikačné možnosti zvukomeroch. V novej norme STN EN 61672-1:2005 Elektroakustika. Zvukomery, Časť 1: Technické požiadavky, sa pod zvukomerom vo všeobecnosti rozumie kombinácia mikrofónu, signálového procesora a zobrazovacieho zariadenia.

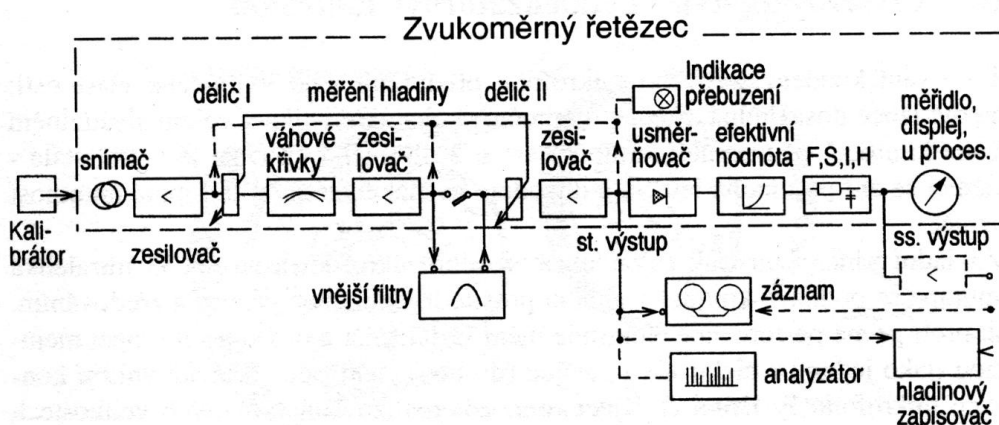
Signálový procesor zahŕňa kombinované funkcie zosilňovača so stanovenou a riadenou frekvenčnou charakteristikou, zariadenie na vytvorenie kvadrátu frekvenčne váženého, časovo premenného akustického tlaku a časového integrátora alebo zariadenia na priemerovanie v čase.

Elektroakustické prevádzkové požiadavky podľa citovanej normy platia na tri druhy prístrojov:

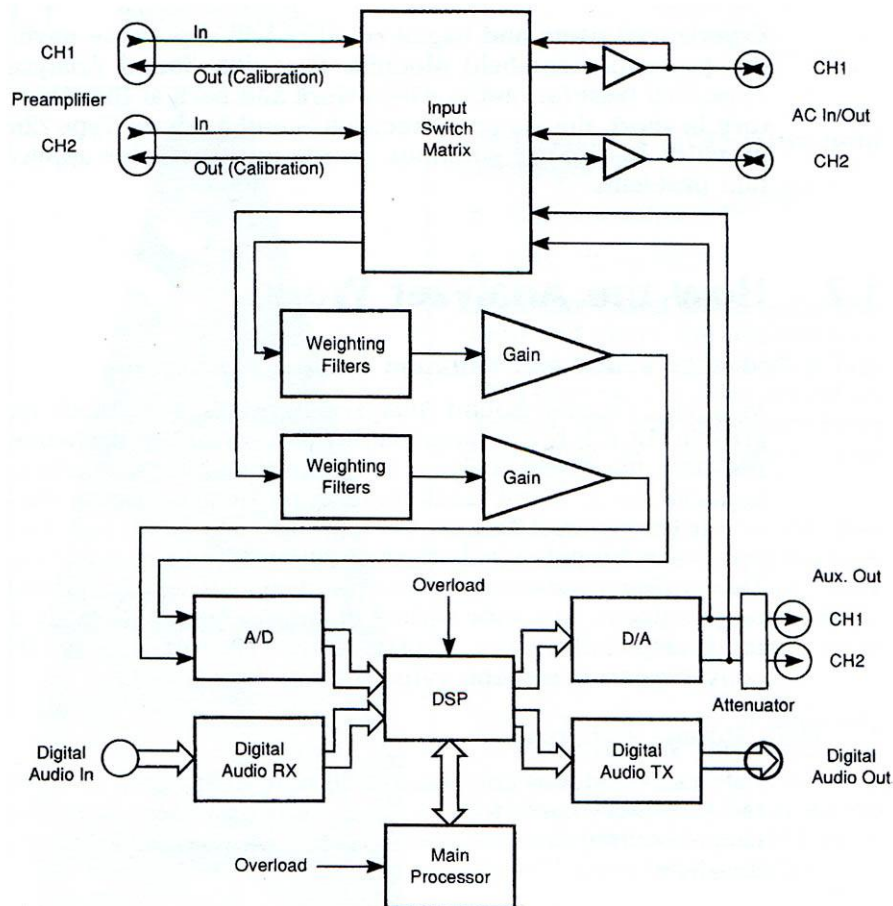
- konvenčný (klasický) zvukomer, ktorý meria exponenciálne časovo vážené hladiny akustického tlaku,
- integrujúco-priemerujúci zvukomer, ktorý meria časovo priemerované (ekvivalentné) hladiny akustického tlaku,
- integrujúci zvukomer, ktorý meria hladiny zvukovej expozície.

Súbor prevádzkových požiadaviek na uvedené druhy prístrojov je doplnený aj požiadavkami na meranie maximálnych časovo vážených hladín akustického tlaku a hladín C vrcholového akustického tlaku.

Jednotlivý prístroj môže zisťovať jedno z uvedených meraní alebo všetky tri druhy merania a môže obsahovať aj programové vybavenie dodávané na programových kartách, pamäťové karty na ukladanie údajov alebo ich prenos do PC a výstupy na ďalšie spracovanie - grafický záznam, tlačiareň a pod. Technický pokrok v konštrukcii zvukomeroch je zřejmý z blokových schém analógového zvukomera (obr. 1) a digitálneho zvukomera – analyzátora zvuku (obr. 2).



Obr. 1 Bloková schéma analógového zvukomera



Obr. 2 Bloková schéma zvukomera – presného analyzátora zvuku B & K 2260

2. Spracovanie signálov vo zvukomeroch

Jednou z dôležitejších častí pri spracovaní elektrického signálu v analógovom zvukomere je indikačná časť zahrňujúca vždy detektory striedavej hodnoty (efektívny a vrcholový), obvody na úpravu výsledných dynamických vlastností výstupného obvodu a meradla (obvody časových konštánt S,F a I), indikačný prístroj (rúčkové meradlo) a výstupy (jednosmerný a striedavý). Podobne aj digitálne zvukomery – analyzátory zvuku v reálnom čase sú vybavené A/D a D/A prevodníkmi, digitálnou filtráciou meraného signálu, lineárnym a/alebo exponenciálnym priemerovaním nameraných spektier meraného signálu, zobrazovacou jednotkou a radom výstupov.

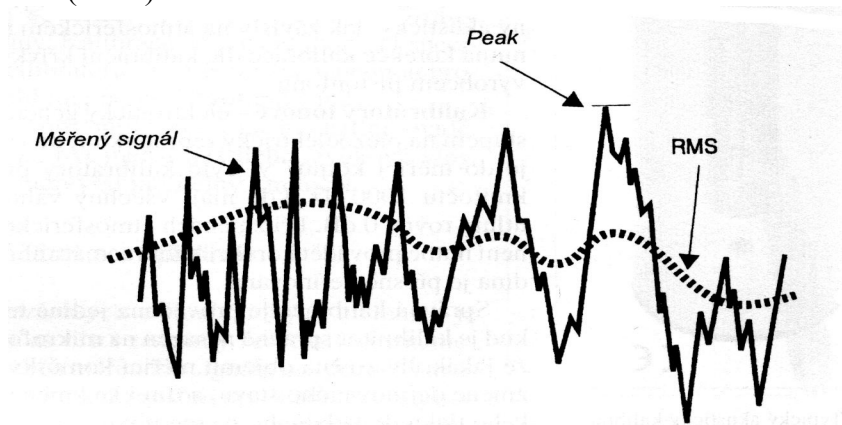
Pri spracovaní signálu má rozhodujúci význam jeho efektívna hodnota, pretože je priamo viazaná s energiou signálu a do istej miery prihliada k jeho predchádzajúcemu časovému priebehu (histórii). Efektívna hodnota periodického signálu je definovaná vzťahom:

$$x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

kde T – perióda a má súvis s frekvenciou f , $T = 2\pi/\omega = 1/f$.

Efektívna hodnota elektrického signálu sa u analógových zvukomeroch získava v tzv. indikačnom detektore [1]. Tento detektor pozostáva z dvoch obvodov - obvodu na určenie druhej mocniny okamžitej hodnoty $x^2(t)$ meraného signálu $x(t)$ a z integračného obvodu, v ktorom sa časovou integráciou získa stredná kvadratická hodnota. Z tejto hodnoty sa po odmocnení určí efektívna hodnota signálu za špecifikovaný integračný čas T . Na obr. č. 3 je

zobrazený časový priebeh meraného signálu a v zodpovedajúcich časových okamihoch jeho efektívna hodnota (RMS).



Obr. č. 3 Časový priebeh premenného signálu a zodpovedajúcej efektívnej hodnoty

Proces integrácie v čase sa v praktických aplikáciách môže vykonávať viacerými spôsobmi [2]:

- postupnou integráciou signálu, ktorá sa vykonáva po kratších časových úsekoch T a vždy na konci každej periódy T sa udáva hodnota integrovania,
- priebežnou integráciou, ktorá sa vykonáva integráciou signálu za posledné T sekundy jeho časového priebehu a neprihliada sa k priebehu signálu za čas $(t - T)$,
- váženou integráciou, ktorá sa opiera o vlastnosti integračného RC obvodu.

Prvé dva spôsoby časovej integrácie predstavujú lineárnu integráciu (lineárne priemerovanie). Pri váženej integrácii s integračným RC obvodom vzhľadom na jeho prenosové vlastnosti, výstupné napätie je dané približným vzťahom:

$$u_2(t) \cong \frac{1}{RC} \int u_1(t) dt$$

Ozvu integračného RC obvodu na skokovú zmenu vstupného napätia $u_1(t) = A \cdot H(t)$ je možné vyjadriť exponenciálnou funkciou [3]:

$$u_2(t) = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \cdot H(t)$$

a preto hovoríme o exponenciálnej integrácii (exponenciálnom priemerovaní). Integračná časová konštanta $\tau = RC$ tohto obvodu je doba trvania práve uplynulého časového úseku, v ktorom amplitúda výstupného napätia dosiahne hodnotu $0,632 \cdot A$, t.j. 63 % z hodnoty amplitúdy vstupného napätia.

Porovnanie priebežnej a váženej integrácie časového signálu $f(\tau)$ s rôznou hodnotou časovej konštanty označenej T v grafickom znázornení je na obr. č. 4.

Obr. č. 4 Porovnanie priebežného a časovo váženého integrovania signálu

V digitálnych zvukomeroch, ktoré obsahujú digitálne filtre sa stredná kvadratická hodnota dostatočne presne vypočíta numericky

v tzv. digitálnom detektore. Jednou z výhod tohto detektora je, že umožňuje voľbu medzi lineárnou integráciou (v pevnom časovom intervale alebo priebežnú) a exponenciálnou integráciou. V obvodoch na časovo vážené integrovanie exponenciálna časová konštanta τ v sekundách zodpovedá dynamickým vlastnostiam S, F a I.

Integrovanie v čase sa môže vykonávať v časovom aj frekvenčnom priestore, pričom prechod z jedného priestoru do druhého nám umožňuje Fourierova transformácia.

3. Definície akustických veličín

V kap. 3 citovanej normy sú okrem opisu významu technických parametrov zvukomeroch uvedené aj definície akustických veličín.

3.1 Hladina akustického tlaku: dvadsaťnásobok dekadického logaritmu pomeru efektívnej hodnoty daného akustického tlaku k referenčnému akustickému tlaku podľa vzťahu:

$$L_p = 20 \log \frac{p_{ef}}{p_0}$$

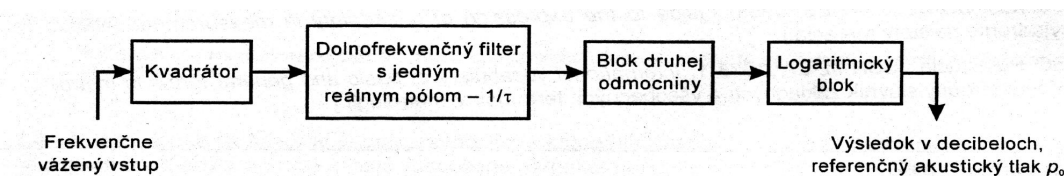
3.2 Časovo vážená hladina akustického tlaku (time-weighting sound level): dvadsaťnásobok dekadického logaritmu pomeru danej efektívnej hodnoty akustického tlaku k referenčnému akustickému tlaku, pričom sa efektívna hodnota akustického tlaku získava využitím štandardného **frekvenčného váženia** a štandardného **časového váženia**. Pod štandardným časovým vážením sa rozumie exponenciálna funkcia so stanovenou časovou konštantou, ktorou sa váži kvadrát okamžitého akustického tlaku.

V symbolickom vyjadrení je napr. časovo vážená hladina A akustického tlaku reprezentovaná v akomkoľvek časovom okamihu t rovnicou:

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

kde τ - exponenciálna časová konštanta v sekundách pre časové charakteristiky F alebo S,
 ξ - pomocná premenná časovej integrácie od nejakého času v minulosti $-\infty$ pre dolnú medzu integrálu, do času pozorovania t ,
 $p_A(\xi)$ - okamžitý akustický tlak,
 p_0 - referenčný akustický tlak.

Číselný výraz argumentu logaritmu je exponenciálne časovo vážená efektívna hodnota frekvenčne váženého akustického tlaku v čase pozorovania t . Proces vytvárania exponenciálne časovo vázenej hladiny akustického tlaku (exponenciálne priemerovanie) podľa uvedenej rovnice je na obr. č.5.



Obr. č. 5 Postupnosť krokov pri vytváraní exponenciálne časovo vázenej hladiny

3.3 Časovo priemerná hladina akustického tlaku (time-average sound level) alebo ekvivalentná hladina akustického tlaku (equivalent continuous sound level): dvadsaťnásobok dekadického logaritmu pomeru efektívnej hodnoty akustického tlaku počas stanoveného časového intervalu k referenčnému akustickému tlaku, pričom akustický tlak sa získava štandardným frekvenčným vážením.

V symbolickom vyjadrení je napr. časovo priemerovaná hladina A akustického tlaku alebo ekvivalentná hladina A akustického tlaku daná rovnicou:

$$L_{AT} = L_{AeqT} = 20 \log \left\{ \left[\frac{1}{T} \int_{t-T}^t p_A^2(\xi) d(\xi) \right]^{1/2} / p_0 \right\}$$

kde ξ - pomocná premenná časovej integrácie počas časového intervalu priemerovania, ktorá sa končí v čase pozorovania t ,
 T - časový interval priemerovania,
 $p_A(\xi)$ - okamžitý akustický tlak,
 p_0 - referenčný akustický tlak.

Číselný výraz argumentu logaritmu je efektívna hodnota frekvenčne váženého akustického tlaku za časový interval priemerovania T (lineárne priemerovanie.)

3.4 Zvuková expozícia (sound exposure): časový integrál kvadrátu akustického tlaku za stanovený časový interval alebo udalosť.

V symbolickom vyjadrení je zvuková expozícia A stanoveného akustického tlaku daná rovnicou:

$$E_A = \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt$$

kde $p_A^2(t)$ – kvadrát okamžitého tlaku A počas času integrácie, ktorý začína v čase t_1 a končí v čase t_2 .

Jednotkou zvukovej expozície A je Pa².s, ak je tlak vyjadrený v pascaloch a prebiehajúci čas v sekundách.

3.5 Hladina zvukovej expozície (sound exposure level): dvadsaťnásobok dekadického logaritmu pomeru zvukovej expozície k referenčnej expozícii, pričom referenčná expozícia je daná súčinom kvadrátu akustického tlaku a referenčného intervalu 1 s.

V symbolickom vyjadrení je hladina zvukovej expozície, vzťahujúcej sa na zodpovedajúce meranie časovo priemernej hladiny A akustického tlaku (ekvivalentnej hladine A akustického tlaku) daná rovnicou:

$$L_{AE} = 10 \log \left\{ \left[\int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt \right] / (p_0^2 T_0) \right\} = 10 \log E_A / E_0 = L_{AT} + 10 \log(T/T_0)$$

kde E - zvuková expozícia A v Pa².s,

E_0 - referenčná zvuková expozícia 400.10⁻¹² Pa².s,

T_0 - 1 s,

$T = t_2 - t_1$, časový interval merania hladiny zvukovej expozície a časovo priemernej hladiny akustického tlaku v sekundách.

Medzi časovo priemernou hladinou A akustického tlaku v časovom intervale T a zvukovou expozíciou ktorá sa vyskytuje v tomto intervale patrí:

$$E_A = (p_0^2 T)(10^{0,1L_{A,T}})$$

alebo

$$L_{AT} = 10 \log[E_A / (p_0^2 T)] = L_{AE} - 10 \log(T / T_0)$$

4. Časové váhové charakteristiky S, F a I

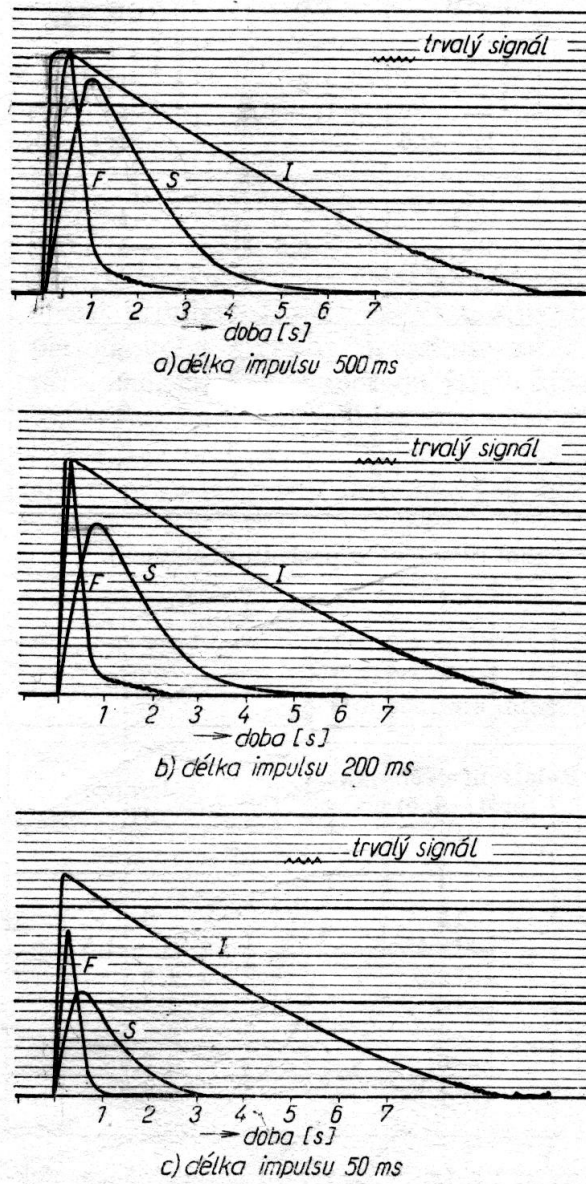
Uplatnenie časových váhových charakteristík S (Slow), F (Fast) a I (Impuls) pri konštrukcii zvukomerov má svoj historický dôvod. Pri meraní zložených, rýchle sa meniacich a krátkodobých signálov s veľkou dynamikou, najslabším článkom analógových zvukomerov boli dynamické vlastnosti detektora efektívnej hodnoty a rúčkového meradla (zotrvačnosť pohybového systému), ktoré rozhodovali o výchylke meradla. Preto sa do indikačnej časti zaradili integračné obvody na úpravu dynamických vlastností výstupného obvodu a meradla, ktoré vyvolajú výchylku úmernú priemernej hodnote akustického tlaku v určitom časovom rozmedzí. Dynamické vlastnosti výstupného obvodu S, F a I sa štandardizovali normou IEC R 651 a overovali privedením tónového impulzu o danej frekvencii na vstup zvukomera, kedy meradlo musí vykázať výchylku v určitých dovolených toleranciách. Časovo rozvinutý priebeh výchyliek meradla pre uvedené dynamické vlastnosti a rôzne časy trvania tónového impulzu je na obr. č. 6

Na tónový impulz najpomalšie reaguje meradlo pri S, keď výchylka meradla vyhodnotí priemernú hodnotu meranej hladiny signálu za uplynulú 1 s. Pri F sa časová konštanta odvodila od časovej konštanty pohybového systému meradla a výchylka meradla vyhodnotí priemernú hodnotu signálu za uplynulých 0,2 s. Pri dynamických vlastnostiach I sa doporučila časová konštanta s nábehovou dobou približne 35 ms, ktorá však spôsobí nesledovateľný rýchly pohyb ručičky meradla a preto pre pokles výchylky je časová konštanta 2 s. Pre trvalý signál musia byť výchylky pri S, F a I rovnaké.

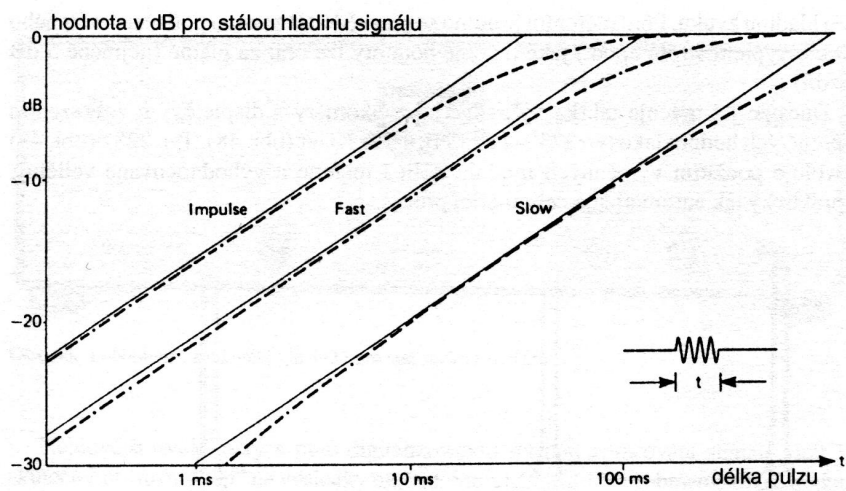
Pre periodicky tónový signál, dynamické vlastnosti zvukomera umožňujú približne zistiť činiteľ výkyvu a naviac odhad trvania impulzovej časti takéhoto signálu z rozdielu hladín napr. $L_{Peak} - L_I$ [1]. Pravdepodobne aj pri posudzovaní vplyvu impulzového hluku na človeka sa pristúpilo k využitiu dynamických vlastností I a F, a z rozdielu hladín A akustického tlaku $L_{A,I} - L_{A,F}$ sa v predpisoch na ochranu zdravia stanovuje korekcia K_I , ako penalizácia na vyjadrenie zvýšeného rizika poškodenia sluchu.

Pre kontinuitu a porovnateľnosť výsledkov získaných analógovými a digitálnymi zvukomermi boli dynamické vlastnosti S a F a I prevzaté aj do konštrukcie obvodov signálové procesora a v citovanej norme sú pomenované ako časové váhové charakteristiky. Pre časovú charakteristiku F je časová konštanta 0,125 s a 1 s pre časovú charakteristiku S. Pri frekvenčnej funkcii A musí byť ozva na tónový impulz s frekvenciou 4 kHz v závislosti na čase trvania impulzu pre maximálne hladiny akustického tlaku s časovou charakteristikou F alebo S zhodná s údajmi uvedenými v tab. 3 normy. Grafické vyjadrenie ozvy na tónový impulz v závislosti na čase trvania impulzu je na obr. 7.

Po náhlom prerušení ustáleného sínusového signálu o frekvencii 4 kHz musí byť rýchlosť poklesu zobrazenej hladiny akustického tlaku najmenej 25 dB/s pri časovej charakteristike F a medzi 3,4 a 5,3 dB/s pri časovej charakteristike S.



Obr. č. 6 Časovo rozvinutý priebeh výchyliek meradla pre rôzne dynamické vlastnosti



Obr. 7. Ozva na tónový impulz s rôznou dĺžkou trvania

5. Záver

Podľa definícií akustických veličín uvedených v norme STN EN 61672-1, názov „ekvivalentná hladina A akustického tlaku“ sa vzťahuje len na proces vytvárania časovo priemernej hladiny A akustického tlaku za časový interval priemerovania T , t. j. na proces lineárneho priemerovania. Pri exponenciálnom priemerovaní s uplatnením časových konštánt časovo vážených charakteristík F a S , t. j. v procese vytvárania časovo váženej A hladiny akustického tlaku v akomkoľvek časovom okamihu t je zavedený názov „časovo vážená hladina A akustického tlaku“.

Posledné výskumy v oblasti impulzového hluku ukázali, že časová charakteristika I nie je vhodná na posudzovanie impulzových zvukov vzhľadom na ich hlasitosť, ani na posudzovanie rizika poškodenia sluchu a ani na určenie „impulznosti“ zvuku z dôvodu získania zavádzajúcich výsledkov. Preto v citovanej norme požiadavky na časovú charakteristiku I sú uvádzané v prílohe C len z historických dôvodov.

Literatúra:

- [1] Smetana, C.: Měření hluku a chvení. SNTL Praha, 1974
- [2] Navrátil, M., Pluhař, O.: Měření a analýza mechanického kmitání. SNTL Praha, 1986
- [3] Rádioelektronická příručka – I. díl. KTHP Praha 1972
- [4] Žiaran, S.: Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom. STU Bratislava, 2001