

POŽIADAVKY NA MERACIE SYSTÉMY KMITANIA PRI POSUDZOVANÍ OZVY KONŠTRUKCIÍ BUDOV

Ing. Milan DRAHOŠ

D2R engineering, s.r.o.

Ing. Richard DRAHOŠ

D2R engineering, s.r.o.; Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky

Abstrakt:

Príspevok je zameraný na požiadavky meracích systémov používaných pri posudzovaní ozvy konštrukcií budov na kmitanie a otrasy v zmysle normy ISO 4866:2010.

Kľúčové slová:

kinematické veličiny, integrátory, meracie systémy, snímače.

ÚVOD

Kmitanie a otrasy prenášané do budov podložíom vyvolané napr. pilotážou, vibračným zhutňovaním, prejazdom nákladných vozidiel cez nerovnosti vozovky (výtlky, kanálové spúšte), odstrelly v lomoch a pod. môžu za istých okolností spôsobiť škody (kozmetické, malé, veľké) na stavebných konštrukciách budov. Prenos kmitania a otrasov podložíom a veľkosť ozvy na konštrukciách budovy predstavuje zložitý proces, ktorý súvisí s charakterom zdroja budenia a s geologickými a pôdnymi pomermi podložia. Dynamickou interakciou podložia a konštrukciami budov sa zaoberá seizmické inžinierstvo.

Princípy merania kmitania a otrasov (ďalej len „vibračnej udalostí“) a spracovania nameraných údajov na vyhodnotenie ozvy na konštrukcie budov sú ustanovené v medzinárodnej norme ISO 4866:2010 [1]. Pri voľbe stratégie merania sa vychádza z charakteristík zdroja budenie, ako je trvanie budenie (trvalé, prerušované, jednorazový výskyt), časová závislosť amplitúdy kmitania (ustálené, periodické a neperiodické) a charakter vibračného signálu (stacionárny, nestacionárny, prechodové alebo impulzné vibrácie). Samotné vyhodnotenie vibračných účinkov na konštrukcie je zamerané na stanovenie ozvy konštrukcie, pričom sa zohľadňuje typ a stav konštrukcie, vlastné frekvencie, tlmenie konštrukciou, rozmery konštrukcie a charakter podložia.

Mechanické kmitanie je spravidla charakterizované jednou z troch kinematických

veličín - výchylkou $x(t)$, rýchlosťou $v(t)$ alebo zrýchlením $a(t)$.

1 VZŤAH MEDZI KINEMATICKÝMI VELIČINAMI

Pri harmonickom kmitaní sú kinematické veličiny - výchylka $x(t)$, rýchlosť $v(t)$ a zrýchlenie $a(t)$ spolu viazanými funkciami času

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$$

alebo

$$v(t) = \int a(t)dt, \quad x(t) = \iint a(t)dt \quad (1)$$

Z uvedenej diferenciálnej previazanosti kinematických veličín vyplýva aj ich frekvenčná previazanosť, ktorá pri harmonickom kmitaní spočíva vo fázovom posuve medzi ich časovými priebehmi.

Na kvantifikáciu veľkosti kmitania sa najčastejšie využívajú maximálne (špičkové, vrcholové) alebo efektívne hodnoty niektorej z kinematických veličín. Prevod hodnoty jednej kinematickej veličiny na druhú pri danej frekvencii je možný analytickým výpočtom alebo pomocou nomografov.

Matematickým modelom harmonického signálu je funkcia času a napr. pre zrýchlenie $a(t)$ má tvar

$$a(t) = A_0 \sin(\omega t) = A_0 \sin(2\pi f t)$$

a v komplexnom tvare

$$a(t) = A_0 e^{j2\pi f t} \quad (2)$$

kde A_0 je amplitúda zrýchlenia,
 $e^{j2\pi ft}$ je exponenciálna funkcia.

Pri prevode harmonického signálu zrýchlenia $a(t)$ na signál rýchlosti $v(t)$ platí

$$v(t) = \int a(t) dt = \int A_0 e^{j2\pi ft} dt = \frac{A_0}{j2\pi f} e^{j2\pi ft} = V_0 e^{j2\pi ft} \quad (3)$$

kde V_0 amplitúda rýchlosti

$$V_0 = \frac{A_0}{j2\pi f}$$

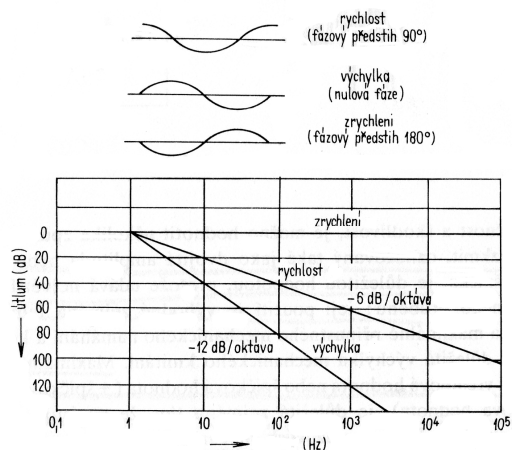
Pri prevode harmonického signálu zrýchlenia $a(t)$ na signál výchylky $x(t)$ platí

$$x(t) = \iint a(t) dt dt = \int v(t) dt = \int V_0 e^{j2\pi ft} dt = \frac{V_0}{j2\pi f} e^{j2\pi ft} = \frac{A_0}{(2\pi f)^2} e^{j2\pi ft} = X_0 e^{j2\pi ft} \quad (4)$$

kde X_0 amplitúda výchylky

$$X_0 = -\frac{A_0}{(2\pi f)^2}$$

Znárodnia vzťahov medzi amplitúdami kinematických veličín zobrazenými ako funkcie frekvencie s logaritmickými stupnicami osí je na obrázku 1. Frekvenčná previazanosť znamená, že časový priebeh rýchlosti $v(t)$ má fázový predstih 90° a časový priebeh zrýchlenia $a(t)$ má fázový predstih 180° pred priebehom výchylky $x(t)$.



Obr. 1 Vzťah medzi amplitúdou zrýchlenia, rýchlosťou a výchylkou kmitania v závislosti na frekvencii [2]

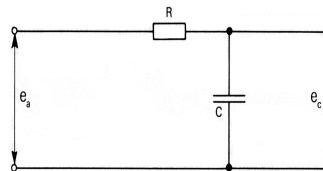
Z obrázku je zrejme, že pri integrácii harmonického zrýchlenia s konštantou amplitúdou A_0 , amplitúda rýchlosti V_0 v závislosti na frekvencii klesá o 6 dB/oktávu a amplitúda výchylky X_0 klesá o 12 dB/oktávu.

Pri úzkopásmovej frekvenčnej analýze vibračného signálu, ak majú byť zistené všetky tri kinematické veličiny znamená, že majú rovnaké frekvenčné zložky, ale tie budú mať integrované amplitúdy úmerné strmostiam charakteristik jednotlivých kinematických veličín podľa obrázku 1.

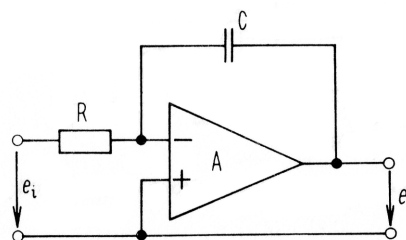
V meracích systémoch je vzájomný prevod kinematických veličín realizovaný pomocou elektronických obvodov – integračných alebo derivačných obvodov.

1.1 Vlastnosti integračných obvodov

Pasívny integrátor tvorí RC člen v zapojení znázornenom na obrázku 2.1. Elektronický integrátor tvorí operačný zosilňovač s integračným RC členom v zapojení na obrázku 2.2.



Obr. 2.1 Pasívny integrátor



Obr. 2.2 Elektronický integrátor

Ak sa predpokladá ideálny operačný zosilňovač, ktorý má zosilnenie $A \rightarrow \infty$, vstupný odpor $R_i \rightarrow \infty$, výstupný odpor $R_o \rightarrow 0$, potom pre $R \gg 1/2\pi fC$ platí

$$e_o = -\frac{1}{RC} \int e_i dt \quad (5)$$

Výstupné napätie e_o je teda úmerné integrácii vstupného napätia e_i v čase t a zosilňovač pracuje ako integračný člen s integračnou časovou konštantou $\tau = RC$.

Vlastnosti reálneho elektronického integrátora sú obmedzené vlastnosťami R a C , ako aj frekvenčnými parametrami a nelinearitou operačného zosilňovača pri vyšších výstupných napätiach. Základnou podmienkou elektronického integrátora je, aby

$$R \gg \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad \tau = RC \gg \frac{1}{f} = T \quad (6)$$

V prípade, že nie sú splnené uvedené podmienky, vzniká amplitúdová a fázová chyba integračného obvodu. Ak ktorákoľvek frekvenčná zložka signálu $e_i = E_i e^{j2\pi ft}$ sa integruje ideálnym integrátorom, potom na jeho výstupe

$$e_o = \frac{1}{j2\pi f} E_i e^{j2\pi ft} \quad (7)$$

Ak ktorákoľvek frekvenčná zložka sa integruje reálnym integrátorom vytvoreným integračným RC obvodom, potom na jeho výstupe

$$e_o = \frac{1}{j2\pi f} \frac{1}{RC} \frac{1}{1 + \frac{1}{j2\pi f RC}} E_i e^{j2\pi ft} \quad (8)$$

Výrazy [7] a [8] sa vzájomne líšia členmi

$$\frac{1}{RC} \text{ a } \frac{1}{1 + \frac{1}{j2\pi f RC}}$$

kde prvý člen predstavuje konštantu úmernosti a druhý člen je funkciou frekvencie a predstavuje chybu s ktorou sa integračným členom RC realizuje integrácia. Pre absolútnu hodnotu amplitúdovej chyby integrácie platí vzťah

$$\delta_{ia} = \frac{1}{(2\pi f \tau_i)^2} \quad (9)$$

a pre fázovú chybu platí vzťah

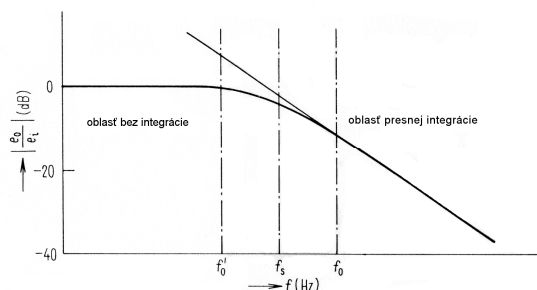
$$\delta_{ia} = \arctg \frac{1}{2\pi f \tau_i} \quad (10)$$

Reálny elektronický integrátor má vždy určitú hraničnú frekvenciu f_0 pod ktorou nie je možné realizovať integráciu s prijateľnou amplitúdovou a fázovou chybou.

Ak e_i reprezentuje určitú frekvenčnú zložku signálu zrýchlenia a e_0 reprezentuje zodpovedajúcu frekvenčnú zložku signálu rýchlosti, potom multiplikačný faktor $1/RC$ predstavuje iba vnútornú kalibráciu integrátora. Absolútna hodnota výrazu

$$\left| \frac{e_0}{e_i} \right| = \left| \frac{1}{1 + j2\pi f RC} \right| \quad (11)$$

je graficky znázornená na obrázku 3 a ukazuje význam podmienky $2\pi f RC \gg 1$.



Obr. 3 Frekvenčný rozsah integračného člena R [2]

Na obrázku je označená aj hraničná (medzná) frekvencia f_0 , ktorá sa nachádza v mieste, kde integrácia prestáva byť presne realizovaná. Pod frekvenciou neprebíha už žiadna integrácia. Preto pre zabezpečenie presnej integrácie signálu nesmie signál obsahovať frekvencie nižšie ako je táto hranica. Z toho dôvodu je pred elektronickým integračným obvodom zaradená hornofrekvenčná priepusť (HP). Na dosiahnutie požadovanej dynamiky meracieho systému v celom frekvenčnom pásme (3 Hz až 300 Hz) je zaradená aj dolnofrekvenčná priepusť (DP).

Pre elektronický derivačný obvod, stanovenie amplitúdovej a fázovej chyby sa dá odvodiť podobným postupom.

2 MERACIE SYSTÉMY

V norme ISO 4866:2010 sú podrobne uvedené požiadavky na meracie systémy, ak sa majú výsledky použiť na analýzu kmitania vstupujúceho do konštrukcií budov. Vzhľadom na uvedený rozbor integrácie signálov na nízkych frekvenciách, norma upozorňuje na potrebu znalosti amplitúdovej a fázovej ozvy meracieho systému, najmä pri meraní maximálnych (špičkových) hodnôt kinematických veličín.

Merací systém ako celok musí spĺňať dovolené odchýlky fázovej ozvy v danom frekvenčnom pásme, ako aj požadovaný amplitúdový (dynamický) rozsah. Na ilustráciu sú v tabuľke 1 uvedené rozsahy ozvy konštrukcie na zdroje budenia vrátane typických hodnôt a časovej charakteristiky signálov.

Tab. 1 Rozsahy ozvy konštrukcie na rôzne zdroje kmitania

Zdroj kmitania	Rozsah [Hz]	Rozsah zložiek a [m.s ⁻²]	Rozsah zložiek v [mm.s ⁻¹]	Rozsah amplit. [μm]	Charakteristika signálov
Doprava (cestná, koľajová)	1 až 100	0,02 až 1	0,2 až 50	1 až 200	Spojité /prechodové
Kmitanie po výbuchu	1 až 300	0,02 až 50	0,2 až 100	100 až 200	Prechodové
Razenie pilotov	1 až 100	0,02 až 2	0,2 až 100	10 až 50	Spojité
Stroje vonkajšie cez podlažie	1 až 100	0,02 až 1	0,2 až 100	10 až 1000	Spojité /prechodové
Stroje vnútorné	1 až 300	0,02 až 1	0,2 až 30	1 až 100	Spojité /prechodové
Zemetrasenie	0,1 až 30	0,02 až 20	0,2 až 400	10 až 10 ⁵	Prechodové

Poznámka: Uvedené rozsahy hodnôt kinematických veličín sú extrémne, ale naznačujú, aké hodnoty môžu byť namerané.

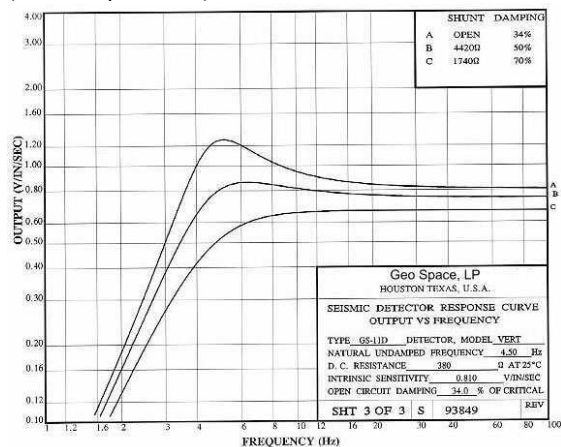
Výber snímačov je rozhodujúci pre hodnoverné snímanie vibračnej udalosti, preto sa na snímanie kmitania v meracích systémoch používajú:

- snímače rýchlosti tzv. „geofóny“ – špeciálne elektromagnetické snímače pracujúce vo frekvenčnej oblasti nad ich vlastnou frekvenciou (2-6 Hz),

- snímače zrýchlenia – vysokocitlivé piezoelektrické alebo kapacitné snímače pracujúce pod ich vlastnou frekvenciou.

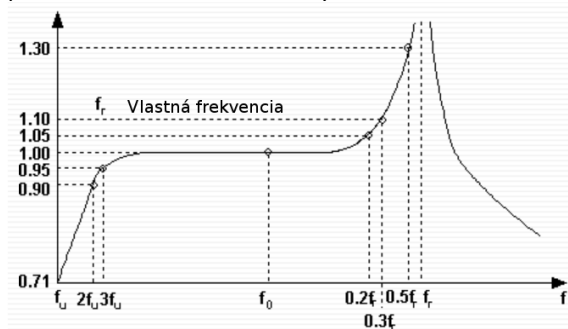
Vzhľadom na vlastnú frekvenciu geofónov je spodná pracovná frekvencia ohraničená na 2 až 5 Hz. V prípade využitia geofónov na meranie ešte nižších frekvencií je nutné aby vyhodnocovacia jednotka kompenzovala vplyv rezonančného javu.

Na obrázku 4 je znázornená amplitúdová prenosová charakteristika elektromagnetického snímača (geofónu) s vlastnou frekvenciou 4,5 Hz (bez kompenzácie).



Obr. 4 Frekvenčná charakteristika geofónu s vlastnou frekvenciou 4,5 Hz [5]

Na obrázku 5 je znázornená všeobecná amplitúdová prenosová charakteristika piezoelektrického snímača zrýchlenia.



Obr. 5 Všeobecná frekvenčná charakteristika piezoelektrického snímača zrýchlenia

Ak vplyvom zdrojov budenia dochádza napr. k viditeľným vplyvom na konštrukciu, odporúča sa používať snímač, ktorý umožňuje priame meranie požadovanej kinematickej veličiny, aby sa predišlo k chybám pri integrácii alebo derivácii vibračného signálu v oblasti nízkych frekvencií.

Podľa normy ISO 4866:2010 sú meracie systémy členené na dve hlavné triedy merania:

- trieda 1 - inžinierska analýza,
- trieda 2 - prevádzkové monitorovanie.

Pre jednotlivé triedy merania sú stanovené optimálne parametre meracieho systému. Napríklad pre triedu 1 optimálne parametre sú:

- vzorkovacia frekvencia má byť minimálne päťkrát vyššia, ako je najvyššie analyzovaná frekvencia vibračného signálu,
- frekvenčný rozsah celého meracieho systému musí byť najmenej od 1 Hz do 150 Hz alebo vo väčšom rozsahu, ak je potrebné hodnoverné stanovenie frekvenčného spektra vibračného signálu,
- odchýlka frekvenčnej ozvy v rozsahu od 2 Hz do 80 Hz nesmie prekročiť 8 % (0,8 dB) amplitúdy stanovenej na referenčnej frekvencii,
- dynamický rozsah meracieho systému najmenej 72 dB,
- minimálna merateľná amplitúda zapisovacieho systému (ak je súčasťou) musí byť najmenej 10 μm /sekundu,
- pamäťová kapacita musí byť najmenej 30 sekúnd na kanál s minimálnou rýchlosťou vzorkovania 1000 vzoriek/sekundu,

V súčasnosti na meranie ozvy konštrukcie na vibračné udalosti sú k dispozícii univerzálne viackanálové meracie systémy.

Univerzálne viackanálové meracie systémy sú vstupmi na pripojenie rôznych typov snímačov, A/D prevodníkmi s vysokým rozlíšením, vysokým dynamickým rozsahom, antialiasingovými filtermi, rozhraním pre programovacie aplikácie a pripojiteľné k PC. Programové vybavenie poskytuje softvérové moduly na záznam a analýzu signálu v časovej oblasti, modulmi na frekvenčnú analýzu signálov v reálnom čase (FFT) a programovateľnými filtermi.

ZÁVER

Na účely dokumentovania stavu dynamického zaťaženia konštrukcií, je meranie vibračných účinkov zamerané na stanovenie ozvy konštrukcie na budenie. Pri voľbe snímačov a prenosových parametrov celého meracieho systému sa musí zohľadniť charakter zdroja budenia, charakter podložia (v prípade zdrojov budenia mimo budovu), typ a stav konštrukcie s prihliadnutím tmenia a na jej vlastné frekvencie.

S prihliadnutím na dolný frekvenčný rozsah zdrojov kmitania (tabuľka 1) sa odporúča použiť snímače, ktoré priamo snímajú požadovanú kinematickú veličinu v značnom dynamickom rozsahu najmä pri nízkych frekvenciách a tak umožňujú hodnoverne zistiť maximálnu (špičkovú) hodnotu rýchlosti alebo zrýchlenia kmitania.

V citovanej norme je podrobne opísaný spôsob umiestnenia a montáže snímačov vrátane orientácie osi citlivosti vo vzťahu na zdroj budenia. V prílohách k norme sú podrobnejšie uvedené údaje o kvalifikácii stavieb podľa pravdepodobnej reakcií na kmitanie prenášané z podložia (príloha B), o prognóze vlastných frekvencií a tlmenia stavieb (príloha D) a o dynamickej interakcii základu konštrukcie a podložia (príloha E).

Použitá literatúra

- [1] ISO 4866:2010 Vibration of fixed structures – Guidelines for measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures

- [2] Navrátil M., Pluhar O.: Meření a analýza mechanického kmitania – Metódy a prístroje, NTL Praha, 1986, 404 s., ISBN 04-214-86.
- [3] Mechanical Vibration and Shock Measurements, Bruel a Kjaer, 1984.
- [4] Musil M.: Pasívna a aktívna vibroizolácia strojov, STU Bratislava, 2012, 152 s., ISBN 978-80-227-3733-3.
- [5] www.geospace.com/geophones-gs-11d, dostupné na internete dňa 30.9.2013

Korešpondenčná adresa autorov:

D2R engineering, s.r.o.
Na letisko 42, 058 01 Poprad
Tel.: +421 52 7891 452
e-mail: d2r@d2r