Experimentální Analýza Napětí 2007

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF VIBRATION INFLUENCE ON HUMAN

EXPERIMENTÁLNA A NUMERICKÁ ANALÝZA VPLYVU KMITANIA NA POHODU

Juraj Králik[1]

Abstract: *This paper presents the problem of the analysis of vibration influence to the high building structures and the human comfort. Disestimation of the vibration effect from technology, namely especially providing administrative building, that lead to devaluation of the object utility, and thereby too big financial loss of the investor. This paper presents the results from the analysis of vibration causal for the building of GLOBTEL in Bratislava. There were realized numerical analysis with software ANSYS and experimental measurement. The plate vibrations of building were look on in the point view of human comfort in accordance with STN ISO 2631.*

Keywords: *vibration, human comfort, dynamic measurements, numerical analysis, high building*

1. Úvod

Seizmické zaťaženie má vplyv ako na stavebné objekty a technológiu (strojné zaradenia), tak aj na pohodu človeka. Posudzovanie týchto vplyvov na stavebné objekty sa robí podľa STN 73 0031, STN 73 0032 a STN 73 0036 a na človeka podľa STN ISO 2631. Posudzovanie stavebných konštrukcií na kmitanie strojov sa realizuje podľa medzného stavu I. a II. skupiny v súlade s požiadavkami STN 73 0031.

Úlohy posúdenia sú definované nasledovne :

- ***I. skupina medzných stavov*** - je potrebné posúdiť, či nedôjde k strate nosnej spôsobilosti, napr. stratou stability, tvaru a polohy, porušením spojov, únavovým či krehkým lomom alebo či nedôjde k úplnej nevhodnosti k užívaniu, napr. pri vzniku nadmerných plastických pretvorení s podstatnou zmenou tvaru alebo pri nadmernom kmitaní vylučujúcom prevádzku strojov a zariadení alebo prácu a pobyt ľudí v posudzovanom objekte,
- ***II. skupina medzných stavov*** - je potrebné posúdiť, či je zaistená použiteľnosť konštrukcie k bežnému používaniu napr. obmedzením pružných pretvorení - priehybov, pootočenia, kmitania - jednak s ohľadom na stav vlastnej konštrukcie a jej častí, jednak s ohľadom na zaistenie podmienok pre normálnu prácu ľudí alebo strihov a zariadení.

Z pohľadu odporúčaní Eurokódu sa realizujú tri základné druhy posúdenia

- Vplyv kmitania na stavebné konštrukcie
- Vplyv kmitania na ľudí a obsluhu (mechanický, akustický, optický)
- Vplyv kmitania sústavy na proces technológie (požiadavky výrobcu)

[1] doc. Ing. Juraj Králik, CSc., SvF STU Bratislava, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: + +421 (2) 59 274 690, e-mail: juraj.kralik@stuba.sk

Na základe posúdenia uvedených vplyvov je potrebné pri návrhu uvažovať s nasledovnými hodnotiacimi kritériami :

- ➲ Pevnostné kritéria posúdenia konštrukcie,
- ➲ Fyziologické kritéria (vplyv na pohodu človeka)
- ➲ Kritéria funkčnosti stroja,

V prípade posúdenia stavebných konštrukcií sa tieto posudzujú podľa pevnostných kritérií na vnútorné sily alebo napätia a podľa kritérií na pretvorenie na výchylky, rýchlosti a zrýchlenia kmitania.

Pri pevnostnom posúdení je potrebné zohľadniť vplyv cyklického namáhania na znižovanie pevnosti materiálov. Napríklad v prípade betónu sa výpočtové pevnosti redukujú súčiniteľom κ_b, ktorý je závislý na pomere najmenšej a najväčšej absolútnej hodnoty napätia v tvare

$$\rho_b = \frac{\sigma_{b,\min}}{\sigma_{b,\max}} \tag{1}$$

Súčiniteľ κ_b sa pohybuje v hodnotách od 0,75 (pri $\rho_b \leq 0,1$) do 1,00 (pri $\rho_b \geq 0,6$).

Tab.1 Medzné hodnoty kmitania strojov podľa STN 73 0032

Trieda citlivosti stroja alebo zariadenie	Charakteristika triedy	Medzná hodnota	
		Zrýchlenia pre Frekvencie do 10Hz [mm.s-2]	Rýchlosti pre frekvencie nad 10Hz [mm.s-1]
I	Vysoko citlivé	6,3	0,1
II	Stredne citlivé	63,0	1,0
III	Málo citlivé	250,0	4,0
IV	Necitlivé	>250,0	>4,0

2. Mohutnosť kmitania

V súčasných normách sa vplyv kmitania na konštrukcie a človeka posudzuje podľa mohutnosti kmitania. Jednotlivé stroje a objektu sú roztriedené do tried podľa mohutnosti kmitania.

Trieda mohutnosti kmitania strojov sa musí voliť vzhľadom na rozmery a hmotnosť kmitajúcich telies, ďalej s ohľadom na vlastnosti uloženia, pracovné parametre stroja a jeho použitia.

Mohutnosť kmitania sa posudzuje podľa veľkosti efektívnej hodnoty rýchlosti v_{ef} kmitania v kmitočtovom rozsahu 10 až 1000Hz

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t).dt} \tag{2}$$

kde $v(t)$ je okamžitá hodnota rýchlosti kmitania v perióde T.

Efektívna hodnota rýchlosti kmitania sa môže merať priamo pomocou prístrojov, ktoré majú detektory efektívnych hodnôt v súlade so vzťahom (4.38) alebo určiť výpočtom (pri diskrétnom zložení spektra) z harmonickej analýzy mechanického kmitania pomocou vzťahu

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\ddot{u}_{01}}{\omega_1}\right)^2 + \left(\frac{\ddot{u}_{02}}{\omega_2}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\ddot{u}_{0n}}{\omega_n}\right)^2\right]} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\dot{u}_{01}^2 + \dot{u}_{02}^2 + .. + \dot{u}_{02}^2\right)} = \tag{3}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(u_{01}\omega_1\right)^2 + \left(u_{02}\omega_2\right)^2 + \ldots + \left(u_{0n}\omega_n\right)^2\right]}$$

kde $\ddot{u}_{01}, \dot{u}_{01}, u_{01}$ sú amplitúdy zrýchlenia, rýchlosti alebo posunov mechanického kmitania.

Ak je kmitania zložené z dvoch frekvenčne blízkych harmonických zložiek získame efektívnu hodnotu rýchlosti kmitania z nasledovného vzťahu

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(v_{\min}^2 + v_{\max}^2\right)} \tag{4}$$

Určujúca hodnota mohutnosti kmitania musí byť najväčšia z efektívnych hodnôt rýchlosti kmitania na vybraných kontrolných miestach.

V prípade posúdenia vplyvu kmitania na pohodu človeka sa tento posudzuje podľa efektívnych hodnôt zrýchlenia alebo podľa hladín zrýchlenia L(ü) v [dB], ktorú získame zo vzťahu

$$L(\ddot{u}) = 20\log\frac{\ddot{u}}{\ddot{u}_0}[dB] \tag{5}$$

kde $\ddot{u}_0 = 10^{-6} ms^{-2}$ je referenčná hodnota zrýchlenia.

3. Posúdenie objektov na rázové a ustálené periodické zaťaženie

Dynamickú odozvu spôsobenú technickou seizmicitou, s výnimkou odozvy od trhacích prác, z hľadiska I. medzného stavu netreba ďalej analyzovať, pokiaľ na referenčnom stanovisku efektívna rýchlosť kmitania nepresiahne medze podľa tab.2. Triedy odolnosti objektu získame z kategorizácie podľa STN 73 0036 (str.50, tab.13). Triedy významnosti objektu získame z tab.2 podľa kategorizácie STN 73 0031. Vežové konštrukcie, komíny, vodojemy, jadrové elektrárne, vodné stavby a iné zvláštne objekty vyžadujú osobitné posúdenie.

Tab.2 Medzné hodnoty efektívnej rýchlosti $\dot{v}_{ef}$ [mms^{-1}] podľa STN 73 0036

Trieda odolnosti objektu	$\dot{v}_{ef}\left[mm.s^{-1}\right]$			
	Trieda významnosti objektu (podľa STN 73 0031)			
	V	I	II	III
A	0,2	0,4	0,7	1,1
B	0,4	0,6	1,0	1,8
C	0,7	1,5	2,0	2,8
D	0,9	2,0	2,5	3,5
E	1,1	2,5	3,0	4,0
F	1,5	3,0	4,0	5,0

Pokiaľ nie je možné získať hodnoty rýchlostí na referenčnom stanovisku alebo na stavebnom objekte meraním, je možné pre koľajovú a cestnú dopravu a priemyselnú seizmicitu použiť hodnoty odporúčané v STN 73036.

Tab.3 Triedy významnosti objektu podľa STN 73 0031

Tried významu objektu	Význam objektu
U	Objekty s mimoriadnym ekonomickým alebo spoločenským významom
I	Objekty s veľkým ekonomickým alebo spoločenským významom
II	Objekty so stredným ekonomickým alebo spoločenským významom
III	Objekty s obmedzeným ekonomickým alebo spoločenským významom

Ak posudzovaný objekt obsahuje zariadenia, prípadne stroje s citlivosťou podľa triedenia STN 73 0032, tak ho netreba posudzovať, ak vzdialenosť od zdroja je väčšia ako sa uvádza v norme a nenastane rezonancia kmitania niektorého konštrukčného prvku s budením. V prípade stavebných objektov s citlivými prístrojmi na dynamické účinky je potrebné posúdiť účinok technických otrasov.

Tab.4 Kategorizácia odozvy konštrukcie podľa ef. rýchlosti kmitania v_{ef} podľa STN 73 0036

Trieda odolnosti	Efektívna rýchlosť kmitania (mm.s^{-1})									
	Trieda významnosti objektu (podľa STN 73 0031), kde dynamický výpočet									
	V		I		II		III		Pre všetky triedy významnosti	
	netreba	treba	netreba	treba	netreba	treba	netreba	treba	možnosť porúch	5% objektov je poškodených[1]
A	0,2	0,6	0,6	1,8	0,8	2,2	1,2	3,6	4,5	7,0
B	0,4	1,6	1,0	3,6	1,4	4,0	2,0	6,0	9,0	14
C	0,95	3,8	1,8	5,0	2,4	6,8	3,0	9,0	25	50
D	1,1	4,5	2,4	7,0	2,8	9,0	4,0	12,0	40	80
E	1,6	5,0	3,0	10,0	4,0	15,0	6,0	20	60	100
F	2,0	7,0	4,0	14,0	6,0	17,0	8,0	25	70	120

[1] Ide o poškodenie stupňa 1, pozri tabuľku 17 .
[2] Medziľahlé hodnoty sa posudzujú podľa úvahy.

STN 73 0036 umožňuje použiť jednoduché výpočty pre posúdenie vplyvu technickej seizmicity v prípade jednoduchých objektov (murované a železobetónové jednoduché objekty, montované objekty okrem drevených).

Približné posúdenie sa dá realizovať parametrom $\Delta S \leq 30$

$$\Delta S = 10 \ln \frac{\psi_e}{l^2} \leq 30 \tag{6}$$

kde ψ_e je súčiniteľ závislý na maximálnej kinetickej energie E_k

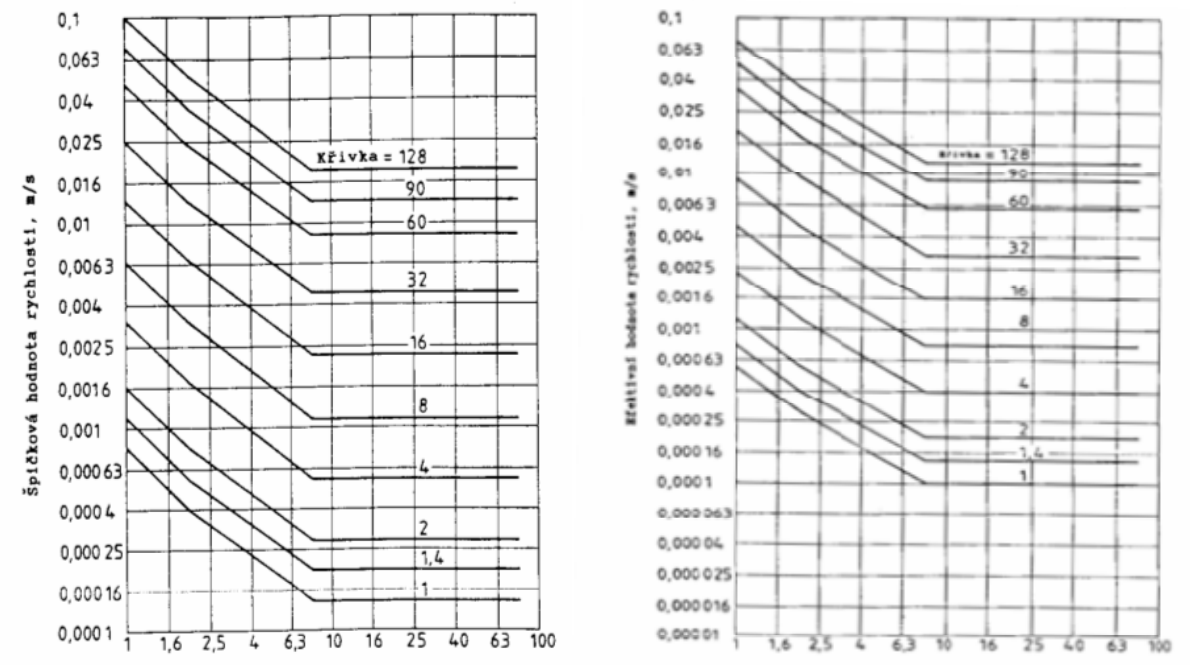
$$E_k = \frac{1}{2} . m_{tot} \dot{w}_{\max}^2 \tag{7}$$

l [m] je horizontálna vzdialenosť zdroja, m_{tot} [kg] celková hmotnosť (napr. hmotnosť základu a stroja), $\dot{w}_{\max}$ [ms^{-1}] maximálny zvislý výkmit rýchlosti kmitania zdroja. Vzťah (6) je možné použiť aj pre horizontálne zložky kmitania $\dot{u}_{\max}, \dot{v}_{\max}$

Vibráciami konštrukcií budov môžu byť ich obyvatelia rôznym spôsobom dotknutí v závislosti od ich intenzity, četnosti výskytu a frekvenčného rozsahu. Dlhodobé alebo časté vibrácie v budovách môžu spôsobiť zníženie kvality života ľudí. Problémom posudzovanie vplyvu vibrácií na pohodu človeka a jeho ochrany sa zaoberajú normy STN ISO 2631-1 a STN ISO 2631-2. Predmetom normy je posudzovanie vplyvov ***prerušovaných a neprerušovaných vibrácií.***

Tab.5 Rozsah korekčných súčiniteľov pre vplyv vibrácií na človeka [5]

Miesto	Čas	Neprerušované alebo prerušované vibrácie[2)]	Dočasné vibračné budenie a niekoľkokrát za deň
Kritické pracovné priestory, napr. niektoré operačné sály v nemocniciach, niektoré špec.laboratória	Deň Noc	1	1[2) 3)]
Obytné miestnosti	Deň	2 až 4 [4)]	30 až 90[4) 5) 6) 7)]
	Noc	1,4	1,4 až 20
Kancelárie	Deň Noc	4[6)]	60 až 128[8)]
Dielne [8)]	Deň Noc	8 [8) 10)]	90 až 128 [8) 10)]



0br.1 Vibrácie v budovách - kombinované krivky z kritérií pre jednotlivé smery

Kritériá pre posudzovanie škodlivosti vibrácií sú definované nielen v závislosti od intenzity kmitania, ale aj z hľadiska spôsobu využívania priestorov objektu a četnosti alebo časového úseku pôsobenia kmitania na človeka. Prehľadná informácia o prípustných hodnotách vibrácií v budovách z hľadiska ich pôsobenia na človeka je uvedená v tab.5. Súčinitele uvedené v tab.5 sa používajú na posudzovanie vplyvu vibrácii podľa nasledovných diagramov.

4. Analýza vibrácií objektu GLOBTEL

Na objekte GLOBTEL boli pracovníkmi identifikované vibrácie náhodilého charakteru, ktorých pôvod a vplyv na objekt a ľudí bolo potrebné analyzovať. Sledovaný objekt je z

hľadiska funkčného administratívnym zariadením. Jedná sa o štvorpodlažnú budovu s čiastočným podpivničením, s prízemím len pod časťou pôdorysu budovy. Tvar pôdorysu je nepravidelný s maximálnymi pôdorysnými rozmermi 41,2 m x 31,7m.

Nosný systém konštrukcie budovy tvoria zvislé monolitické železobetónové stĺpy pravouhlého (400 x 400mm) alebo kruhového (∅ 400mm) prierezu s osovými vzdialenosťami maximálne 8,1m, pri nepravidelnostiach vyplývajúcich z pôdorysu sú ďalšie osové vzdialenosti 4,5m, resp. 6,4m. Zvislé nosné konštrukcie suterénu tvoria monolitické železobetónové steny 300mm hrubé. Na stĺpoch sú uložené monolitické železobetónové stropné dosky 200mm hrubé, v mieste uloženia stropnej dosky na niektoré stĺpy (stredové stĺpy) je hrúbka dosky 300mm (štvorcová hlavica s pôdorysnými rozmermi 1,8 x 1,8 m). Okraj stropnej dosky tvorí parapet 200mm hrubý a 1,45 m vysoký. Základovú konštrukciu budovy tvoria samostatné veľkopriemerové pilóty pod každým stĺpom konštrukcie, zasahujúce dolným okrajom cez povrchovú vrstvu ílovitých zemín do štrkovej vrstvy podložia. Priemer pilót je ∅1000mm. Pod viac zaťaženými stredovými stĺpmi sú pilóty oválneho prierezu s vonkajšími rozmermi 1000 x 2000mm.



Obr.2 Budova Globtel v Bratislave

Objekt je založený na vrstve navážok hrúbky od 2,2m do 3,0m, pod ktorými je vrstva zle zrnených štrkov stredne uľahlých až uľahlých. Podložné neogéne sedimenty sa nachádzajú v hĺbke 12,3m pod terénom. Ide o íly s vysokou plasticitou, pevnej konzistencie.

4.1 Výpočtový model

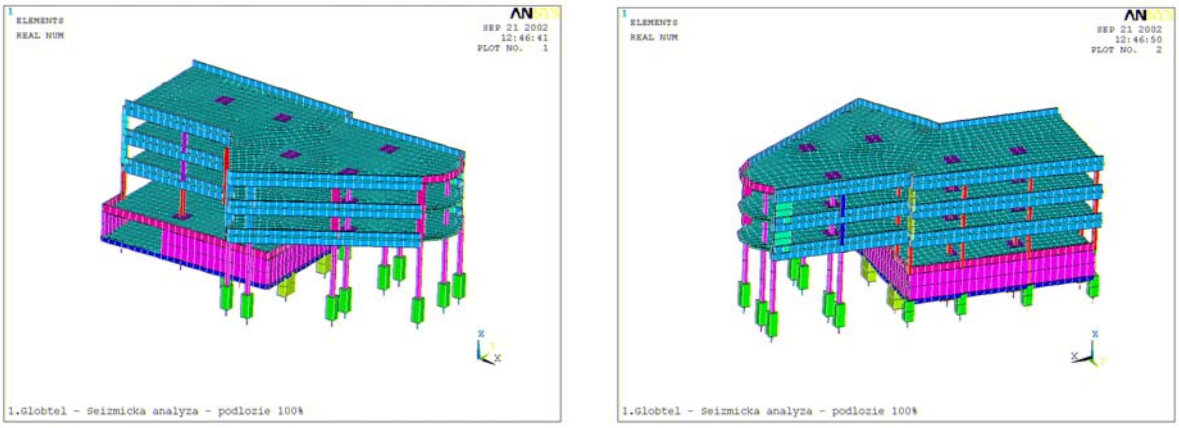
Pre overenie správnosti výsledkov a pre ilustráciu vplyvu rôznych neurčitých parametrov boli spracované viaceré modely a alternatívy modelu konštrukcie, podložia aj zaťaženia. Sledoval sa vplyv veľkosti prídavnej hmoty (úžitkové zaťaženie) a vplyv šmykovej tuhosti podložia na vlastné frekvencie konštrukcie. Z parametrickej štúdie bolo možné určiť, že zmena parametrov v danom rozsahu výraznejšie neovplyvní výpočet. Numerické analýzy sa realizovali na dvoch konečnoprvkových modeloch G2D (rovinnom) a G3D (priestorovom) vytvorených pod systémom ANSYS.

Pri výpočte odozvy od seizmického budenia sa uvažovalo vo výpočte s hmotnosťou nosnej konštrukcie zohľadnenej geometrickými rozmermi prvkov a ich materiálovými vlastnosťami. Hmotnosť podlahy a priečok bola uvažovaná ako rozmazaná hmotnosť o hodnote 40kgm^{-2}.

Hmotnosť odpovedajúca vybaveniu kancelárii a ľuďmi sa uvažovala ako časť úžitkového zaťaženia v zmysle čl.9.4.2 STN 73 0035, a to o hodnote cca 60kgms^{-2}.

Problém interakcie podložia a konštrukcie bol riešený zavedením pružinovo–tlmiacich elementov s parametrami odpovedajúcim seizmo-geologickým podmienkam v danej lokalite. Objekt je založený na uľahlých štrkopieskoch, pri ktorých môžme uvažovať s rýchlosťou šírenia šmykových vĺn o hodnote $v_s = 180 \div 550 ms^{-1}$. Danej rýchlosti šmykových vĺn v podloží odpovedá dynamický šmykový modul o hodnote $G_{dyn} = 59{,}940 \div 559{,}625 MPa$. Pre daný objekt sa uvažovala stredná hodnota dynamického šmykového modulu $G_{dyn} = 250 Mpa$.

Tuhosť zvislých nosných prvkov pod stropom na úrovni +8,03m sa určila z celkovej deformácie stĺpov a stien založených na základových pásoch a základových pätkách. Tuhosť základovej pätky bola stanovená podľa vzťahov odporúčaných v ASCE 4/86 a STN 730036.



Obr.3 Výpočtový model G3D budovy Globtel a.s.

Pre porovnanie vhodnosti modelu bol vytvorený model stropnej konštrukcie, na ktorej boli zaznamenané najnepriaznivejšie prejavy kmitania – G2D a model celej konštrukcie objektu – G3D. Výpočtový model stropu na úrovni +8,03m bol zostavený zo 759 doskostenových prvkov Shell43, 129 nosníkových prvkov Beam44, 124 prvkov Combin14. Celkovo model obsahuje 859 uzlov a 5 154 stupňov voľnosti.

Výpočtový model budovy bol zostavený zo 3 131 doskostenových prvkov Shell43, 776 nosníkových prvkov Beam44, 66 prvkov Combin14. Celkovo model obsahuje 7 083 uzlov a 21 168 stupňov voľnosti.

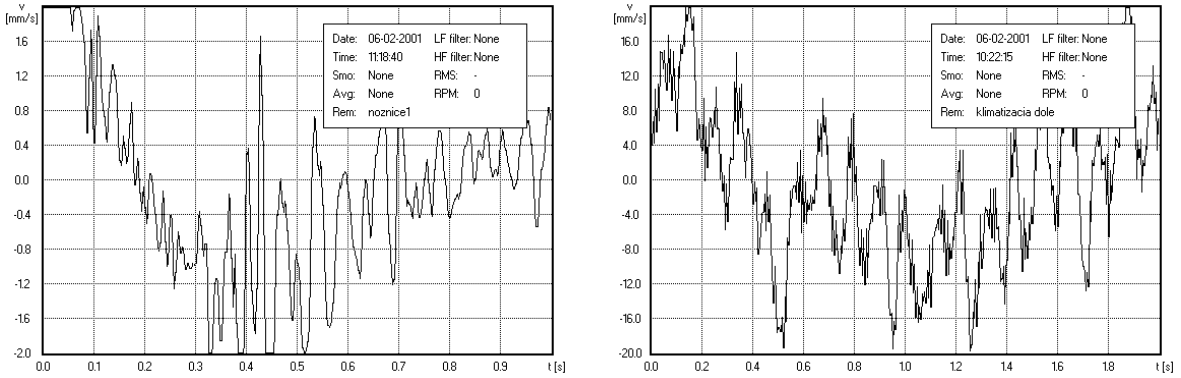
4.2 Experimentálna analýza

Na snímanie primárneho signálu o zrýchlení mechanického kmitania bol použitý piezoelektrický snímač RFT KB-12. Po spracovaní signálu boli dáta analyzované softwarom Vibro Analyser 2.1. Získali sa informácie o frekvenčných spektrách, spektrálnej výkonovej hustoty, ako aj efektívnych hodnôt (RMS) signálu, a to v zložkách zrýchlení, ale aj rýchlostí a premiestnení ako podklad pre overenie výpočtového modelu ako aj posúdenia vplyvu na pohodu človeka.

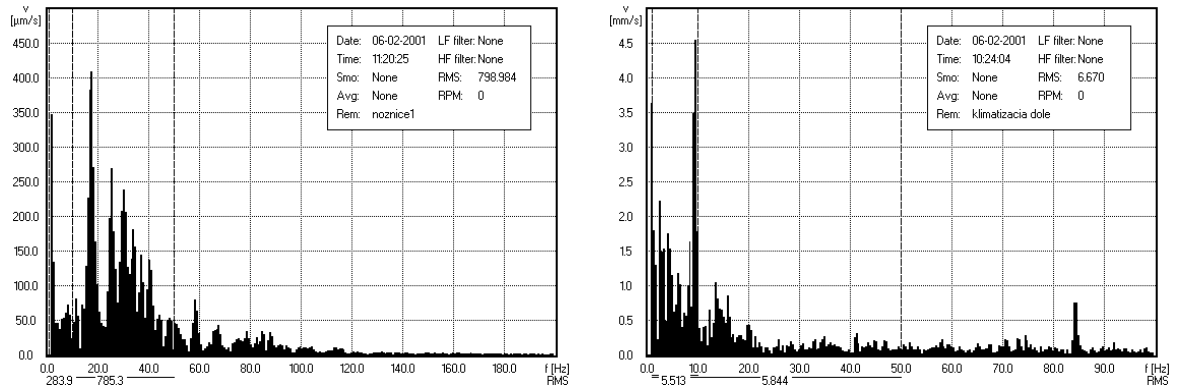
Experimentálne merania sa realizovali v rôznych časových okamihoch a od rôznych zdrojov budenia kmitania. Meraním sa zisťoval pôvod kmitania objektu. Uvažovalo sa s tromi možnými zdrojmi budenia, a to od vibrácií

- klimatizácie a ventilátorov na úrovni strechy objektu,
- klimatizačných skriniek v miestnosti VT na úrovni prízemia,
- budiacich rázov strihacieho stroja z blízkej priemyselnej haly

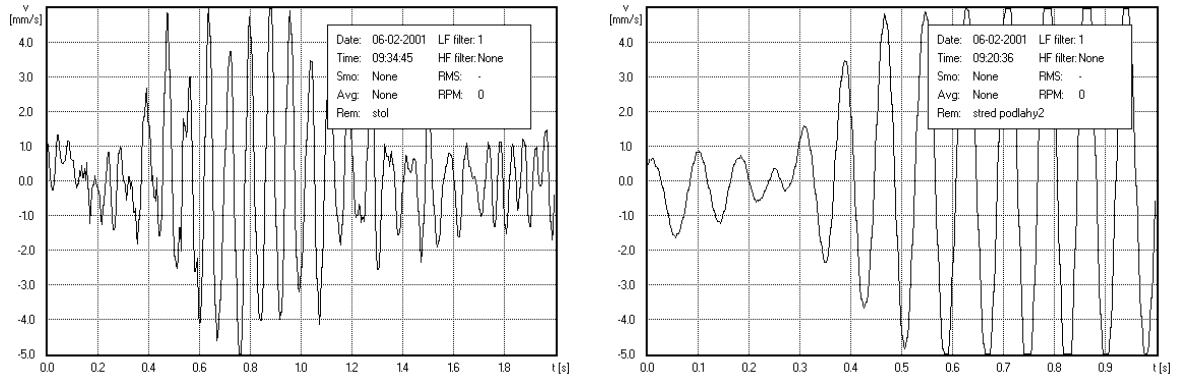
Najnepriaznivejšie účinky boli namerané na strope na kóte +8.03m. Efektívna rýchlosť kmitania stropu na tejto úrovni bola nameraná o hodnote $v_{ef} = 3,7ms^{-1}$. Maximálne výchylky kmitania stropu boli namerané pri frekvenciách 12,5 až 12,89Hz. Vplyv vibrácií ventilátorov klimatizácie a klimatizačných jednotiek počas spúšťania do prevádzky a počas prevádzky na kmitanie stropov objektu sa ukázal ako zanedbateľný. Charakter priebehu kmitania stropu (z časovej ako aj frekvenčnej závislosti) nasvedčuje tomu, že budenie je spôsobené rázovým účinkom spôsobeným rázmi mimo samotného objektu budovy. Porovnaním nameraných hodnôt na dvore areálu v blízkosti plota, oddeľujúceho areál od susedného areálu, v blízkosti haly s priemyselným zariadením a nameraných hodnôt v objekte č.03 sa určilo za pôvodcu pozorovaných vibrácií technické seizmické zaťaženie od tohto priemyselného zariadenia. Ide pravdepodobne o veľké zariadenie na strihanie kovových predmetov (hrubých plechov, oceľových profilov), ktorého otrasy nárazového charakteru sa cez základ prenášajú do základovej pôdy.



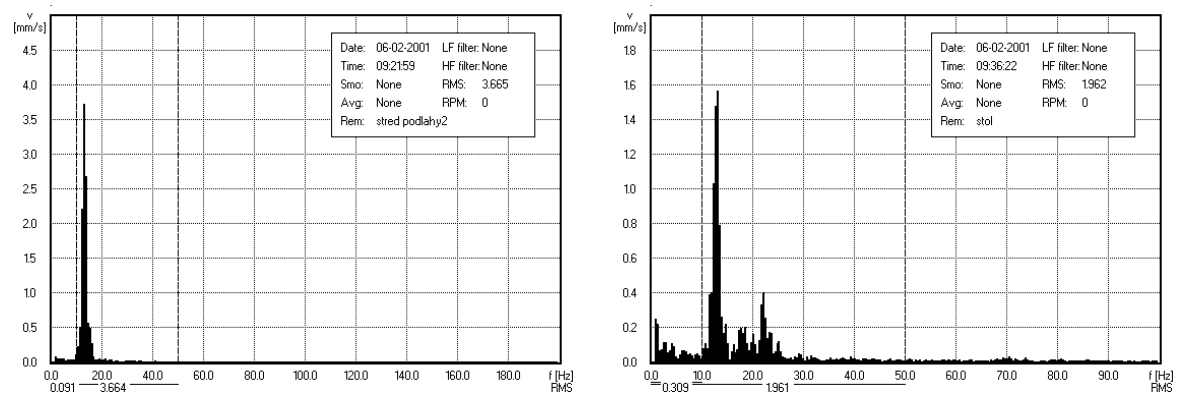
Obr.4 Priebeh rýchlosti kmitania terénu v okolí a podlahy na úrovni -0,1m v čase



Obr.5 Priebeh rýchlosti kmitania terénu v okolí a podlahy na úrovni -0,1m vo frekvenciách



Obr.6 Priebeh rýchlosti kmitania podlahy na úrovni +8.03m a na stole v čase



Obr.7 Priebeh rýchlosti kmitania podlahy na úrovni +8.03m a na stole vo frekvenciách

Pre overenie správnosti výsledkov a pre ilustráciu vplyvu rôznych neurčitých parametrov boli spracované viaceré modely a alternatívy konštrukcie aj výpočtu. Sledoval sa vplyv veľkosti prídavnej hmoty (úžitkové zaťaženie) a vplyv šmykovej tuhosti podložia na vlastné frekvencie konštrukcie. Z parametrickej štúdie bolo možné určiť, že zmena parametrov v danom rozsahu výraznejšie neovplyvní výpočet.

Tab. 6 Prehľad nameraných maximálnych hodnôt efektívnych rýchlostí a výchyliek

Číslo grafu	Miesto snímania	Zdroj budenia	Frekvencia [Hz]	Maximálna výchylka [μm]	Efektívna rýchlosť [μm/s]
A1	Stred podlahy +8,03m	Priemyselná hala - za prevádzky	12.50	47.34	3 665
A2			12.89	17.99	1 965
A3			12.89	19.32	1 962
A4			12.50	18.77	1 721
A5			12.50	2.21	234
A6	Stred podlahy +4,43m	Priemyselná hala - za prevádzky	12.11	5.91	716
A7			12.11	6.59	633
A8	Podlaha na -0,10m	Klimatizačné skrine	9.37	77.18	6 670
A9	Úroveň strechy	Ventilátory klimatizácie	20.31	5.04	802
A10			20.31	4.60	1 692
A11	Úroveň terénu	Priemyselná hala - za prevádzky	17.19	3.78	799
A12			16.41	1.39	349
A13			14.84	1.99	482
A14			21.88	1.10	388
A15	Úroveň terénu	Priemyselná hala - v kľude	28.12	0.45	140
A16			21.88	1.53	497
A17			28.91	0.49	378
A18	Stred podlahy +8,03m	Spustenie klimatizácie, Kľud v hale	2.34	0.53	34
A19			3.52	0.68	44
A20		Klimatizácia a slabý ráz v hale	14.84	0.31	68

4.3 Numerická analýza

Na objekte Globtel, a.s. boli realizované statické a dynamické výpočty v zmysle odporúčaní Eurokódu 8 a STN 730036 pre seizmickú analýzu budov. V rámci dynamických výpočtov bola uskutočnená modálna a spektrálna analýza. Tuhosť podložia sa uvažovala pre

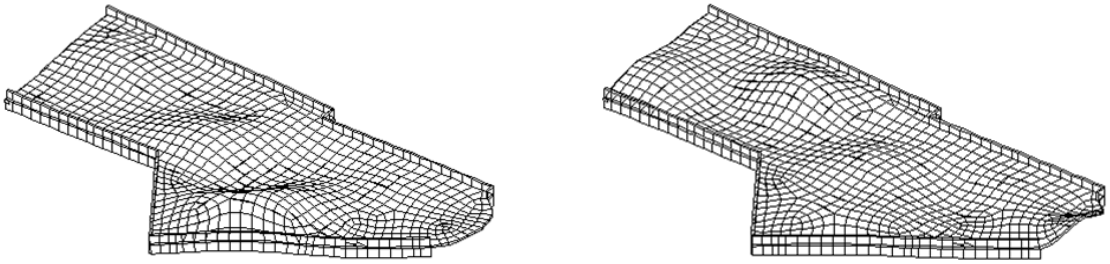
dynamický šmykový modul G_D o hodnote 100Mpa, 250Mpa a 500Mpa. Úžitkové zaťaženie sa uvažovalo pre 50kg/m^2 a 100kg/m^2 .

Tab.7 Výpočtový model G2D pre kĺbovú väzbu v hlave stĺpa a podložie s G_D = 250 Mpa

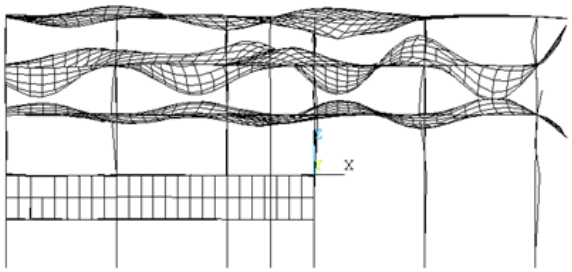
Model	Prídav. hmota [kg/m^2]	1. Tvar		2. Tvar		3. Tvar	
		f_{z1} [Hz]	Podiel mod.h.[%]	f_{z2} [Hz]	Podiel mod.h.[%]	f_{z3} [Hz]	Podiel mod.h.[%]
1	0	7,333	14,502	7,151	12,895	8,703	11,362
2	50	7,066	14,245	6,886	12,808	8,385	11,356
3	100	6,769	14,033	6,594	12,639	8,033	11,255
4	200	6,273	13,858	6,105	12,675	7,444	11,383

Tab.8 Výpočtový model G2D pre prídavnú hmotnosť 100 kg/m^2

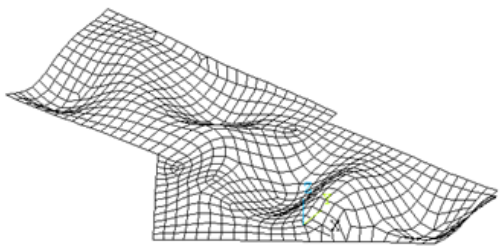
Model	Väzba v hlave stĺpa	1. Tvar		2. Tvar		3. Tvar	
		f_{z1} [Hz]	Podiel mod.h.[%]	f_{z2} [Hz]	Podiel mod.h.[%]	f_{z3} [Hz]	Podiel mod.h.[%]
1	Tuhá	8.759	16.634	7.742	15.220	14.276	8.810
2	Pružná	7.992	24.686	7.176	17.301	8.859	10.278
3	Kĺbová	6.763	14.852	6.595	13.807	8.026	12.121



Obr.8 Rozhodujúce tvary kmitania stropu pre frekvenciu 10,83Hz a 12,38Hz



Obr.9 Tvar odpovedajúci maximálnym nameraným výchylkám – model G3D



Obr.10 Tvar odpovedajúci maximálnym nameraným výchylkám – model G3D

Pre výpočet vlastných tvarov bola zvolená Householderova metóda v kombinácii s metódou subštruktúr podľa Guyana. Spektrálna analýza bola realizovaná s využitím metódy SRSS pre výpočet odozvy od kmitania, ktorého hodnoty boli získané meraním.

Na modeli stropnej konštrukcie, na ktorej boli zaznamenané najnepriaznivejšie prejavy kmitania, boli numericky určené vlastné frekvencie, ktoré boli následne porovnávané s budiacou frekvenciou kmitania.

Zistilo sa, že frekvencia nepriaznivých vibrácií je blízka vlastnej frekvencii dosky v smere osi Z s podielom modálnej hmoty približne 3%. Na priestorovom modeli celej konštrukcie budovy sa posúdila únosnosť stropnej konštrukcie a sledoval sa vplyv dynamického priťaženia ako aj vplyv zmeny výpočtovej schémy spôsobenej zhutnením časti podložia budovy od vibrácií. Zhutnenie podložia vplyvom vibrácií bolo uvážené zmenou tuhosti podložia pod jedným stĺpom.

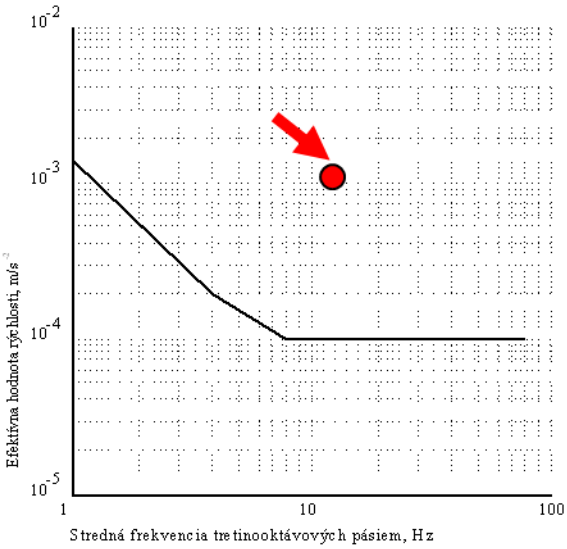
4.4 Vyhodnotenie analýz

Pre vierohodnosť výsledkov boli spracované viaceré modely a alternatívy. Z porovnania v tabuľke 7 je zrejmé, že vplyv zmeny prídavnej hmotnosti (úžitkové zaťaženie 50-100kg/m^2) nemá veľký význam na dynamické charakteristiky stropnej dosky. Rovnako aj šmyková tuhosť podložia významnejšie neovplyvní vlastné frekvencie kmitania stropnej dosky (f_z=7,04Hz pre G_D=100MPa a f_z=7,08Hz pre G_D=500MPa). Výraznejší vplyv na vlastné frekvencie má tuhosť spoja v hlave stĺpov (viď tab.8).

Namerané výchylky podlahy miestností v hodnotách stotín milimetrov sú pozorovateľné vzhľadom na ich pomerne nízku frekvenciu - približne 12,5 Hz. Hodnotenie vplyvu pozorovaných vibrácií bolo vykonané podľa STN ISO2631-1 a 2 (01 1405). Ide o posúdenie vplyvu kmitania na pohodlie osôb s normálnym zdravím, ktoré sú vystavené periodickému, náhodnému a prechodnému kmitaniu na celé telo pri práci z hľadiska zdravia. Kmitanie v smere osi z (zvislá os vzhľadom na stojaceho človeka) je vo frekvenčnom rozsahu od 0,5Hz do 80Hz .

Podľa STN ISO2631-2 platia kritériá prípustnosti vibrácií v budove z hľadiska pôsobenia na človeka podľa základnej krivky. Základná krivka zobrazuje hodnoty veličín (rýchlosť, zrýchlenie), pri ktorých je vplyv na človeka z hľadiska rušenia alebo výskytu sťažností na obťažovanie pri činnostiach zhruba rovnaký.

Prijateľnosť vibrácií v miestnostiach sa posudzuje použitím korekčných súčiniteľov k základným krivkám (pre kancelárie sa uvažuje 4). Nameraná hodnota rýchlosti vo zvislom smere v=3,7mm.s^{-1} pri frekvencii 12,5 Hz sa nachádza nad krivkou uvedenou v norme. Podľa kapitoly 4 danej normy pri hodnotách pod hodnotami kriviek neboli zatiaľ publikované údaje o nepriaznivom hodnotení, nepriaznivých dojmoch, alebo o výskyte sťažností. Podľa čl.8.3.4 STN 730036 nie je potrebné posudzovať nosné prvky konštrukcie na dynamické účinky od otrasov, ak efektívna rýchlosť kmitania odozvy konštrukcie je nižšia ako 2,4ms^{-1} a je potrebné posudzovať, ak je vyššia ako hodnota 7,0ms^{-1}. Najvyššia nameraná hodnota efektívnej rýchlosti kmitania odozvy je 3,665ms^{-1}, čo je medziľahlá hodnota intervalu zadaného normou.



Obr.11 Posúdenie vibrácií podľa základnej krivky pre rýchlosť 3,7 mm.s^{-1} a korekčný činiteľ 4 (podľa STN ISO 2631-2)

Na základe pevnostného posúdenia únosnosti stropnej konštrukcie je možné konštatovať, že vplyv kmitania bezprostredne neohrozuje únosnosť konštrukcie, ale:

➲ pravidelnými otrasmi nárazového charakteru môže nastať zhutnenie časti podložia

budovy, ktoré je tvorené slabo uľahlými nesúdržnými zeminami a tým pravdepodobne nastane pokles časti podpier budovy, čím sa zmení spôsob namáhania nosných konštrukcií budovy

- od dynamického zaťaženia nastane prírastok vnútorných síl v nosných častiach konštrukcie, toto priťaženie však nemá vysokú hodnotu, jeho vplyv je prakticky zanedbateľný. Vplyv dynamického priťaženia však rastie pri zmene výpočtovej schémy vplyvom poklesnutia podpery.

Tab.3 Porovnanie maximálnych dimenzačných momentov

Ohybový moment [kNm/m]	Statika	Statika a dynamika pre redukovanú tuhosť podložia		
		100%	60%	20%
M_{MAX}[+]	112,22	135,3434	136,0875	136,2013
M_{MAX}[-]	-51,342	-76,4743	-76,2615	-76,1979

5. ZÁVER

V článku bola prezentovaná metodika posudzovania konštrukcií z hľadiska ich spoľahlivosti ako aj pohody človeka na účinky vibrácií od technológie. Experimentálnou modálnou analýzou sa na základe získania reálnych dynamických charakteristík na skutočnej konštrukcii získajú hodnoty odozvových veličín „očistené“ od chýb a nepresností modelu konštrukcie, materiálových a geometrických charakteristík jednotlivých prvkov a podložia. Primárny signál získaný piezoelektrickým snímačom RFT KB-12 spracovaným na PC softwarom Vibro Analyser 2.1 v tvare frekvenčných spektier, spektrálnej výkonovej hustoty, ako aj efektívnych hodnôt (RMS) signálu. Pre posudzovanie vplyvu vibrácií na pohodu človeka boli použité kritéria hygienických noriem STN ISO 2631 -1, 2 v tvare nomogramov podľa účelu miestností, charakteru a četnosti kmitania. Kritériom sú hodnoty efektívnej rýchlosti, resp. zrýchlenia v závislosti od frekvenčného pásma. Na prípade objektu GLOBTEL boli experimentálne a numericky analyzované škodlivé vplyvy vibrácií na konštrukcie ako aj pohodu človeka.

Poďakovanie: Projekt bol realizovaný za finančnej podpory Grantovej agentúry Slovenskej republiky. Registračné číslo projektu je VEGA 1/2136/05.

Literatúra

[1] Juhásová, E.: *Seismic Effects on Structures*. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1991.

[2] Králik, J.: *Vplyv vibrácií od technickej seizmicity na pohodu človeka a budovy a eliminácia ich škodlivých účinkov.* In: Statika stavieb 2006. Zborník príspevkov z 11. konferencie. Spolok statikov Slovenska, Piešťany, 16.-17. marca 2006. pp. 31-42. ISBN 80-969127-4-7.

[3] Melcer,J.: *Experimentálna verifikácia numerických postupov*. In:Zb.31. konf.: Experimen-tálna analýza napätí-EAN’93. Měřín, máj 1993, str.203-206, ÚTAM AV ČR, Praha 1993.

[4] Tesár,A.- Držík,M. Genetic algorithms for dynamic tuning of structures. In *Computer and Structures*. Vol. 57 (1995), p. 287-295.

[5] STN ISO 2631 -1, 2 *Mechanické kmitanie a otrasy*. *Hodnotenie expozície človeka kmitaniu na celé telo*. ÚNMS SR 1999.