

**DYNAMIC RESPONSE OF BUILDING FROM
GROUNDBORNE VIBRATION LOADING****D. Makovička*, D. Makovička****

Summary: *The paper is concerned with the response analysis of the rubber vibro-base insulated building structure. The structure is loaded by the groundborne vibration from rail systems of underground in the vicinity of building. The actual history of dynamic load measured on the pile heads was used as an input data for vibro-base insulation design and dynamic analysis of structure. The predicted floor vibrations fulfil the standard requirements for limit vibration level for residential structure.*

1. Úvod

Stavební konstrukce, situované do blízkosti metra jsou zatíženy vibracemi, vznikajícími při jízdě vlaků uvnitř tunelové konstrukce, případně vibracemi od nejrůznějších dalších zařízení metra, jako jsou např. ventilátory větrání nebo pohony pohyblivých schodišť. Tyto vibrace se do základových konstrukcí budov šíří zpravidla zemním prostředím, pokud analyzované budovy nejsou v bezprostředním kontaktu s konstrukcí metra. Vibrace od účinků metra jsou zpravidla velmi nízké. I přes tuto skutečnost mohou být významné z hlediska jejich nepříznivého působení na osoby v obytné nebo kancelářské části analyzované budovy, která díky svému naladění jejich účinek zpravidla zesílí.

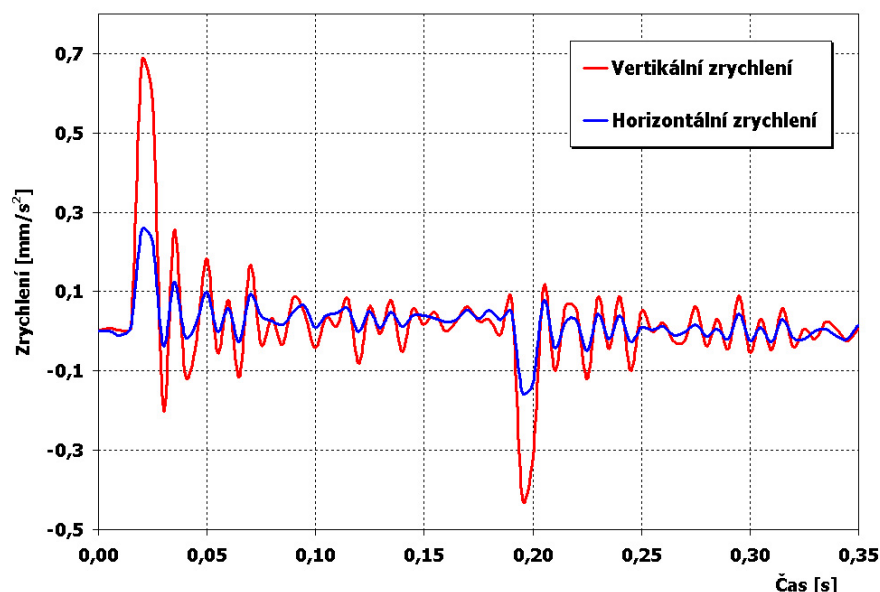
Na příkladu vícepodlažní železobetonové budovy je řešen přenos vibrací z okolního základového prostředí do vlastní konstrukce. Budova je založena na velkopřůměrových pilotách, vzájemně provázaných výztuží se spodní základovou deskou. Na této desce bylo navrženo umístění antivibrační vrstvy pryže značky Belar. Na pryži je osazena horní základová deska, do které je vetknuta skeletová monolitická konstrukce budovy. Pružná pryžová vrstva tedy důsledně odděluje spodní a horní část základové desky a spodní a horní část samostatných základových patek (vodorovné vrstvy pryže) a dále všechny svislé konstrukční prvky pod úrovní terénu od okolního prostředí (svislé, šikmé a vodorovné vrstvy pryže, které obklopující sloupové prostupy zeminou, obvodové stěny pod úrovní terénu, horní povrch základových patek, nebo pasů, přisýpaný zásypem).

* Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc.: České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: +420 224 353 856, fax: +420 224 353 511; e-mail: makovic@klok.cvut.cz

** Ing. Daniel Makovička, Statika a dynamika konstrukcí; Šultysova 167, 284 01 Kutná Hora; tel.: +420 608 029 251; e-mail: d.makovicka@worldonline.cz

2. Zatížení

Zatížení vibracemi od provozu vlaků metra, které se šíří do okolních konstrukcí, má nestacionární charakter. Jeho časový průběh je vykreslen na obr.1. Časový průběh v normalizovaném tvaru, použitý jako zatížení, je uveden na obr.7, spolu s průběhy odezvy konstrukce. Amplitudová úroveň zatížení i jeho frekvenční charakteristiky jsou závislé na konkrétních podmínkách stanoviště (geologickém složení, konstrukci metra a jeho jízdní dráhy, konstrukci vlaků a konečně i konstrukci analyzované budovy) a mohou se případ od případu dost významně lišit. Z tohoto důvodu byly jako vstupní signál pro výpočet konstrukce použity naměřené průběhy vibrací na hlavách vybraných pilot v době výstavby budovy.



Obr.1 Příklad časového průběhu vibrací piloty při přejezdu dvou vlaků metra v protisměru přes rozhraní z tunelové podzemní části do nadzemní mostní části (v uzavřené rouře)

Zjednodušení použitá při modelování dynamických zatížení lze shrnout do několika zásad. Byl použit největší naměřený časový průběh vibrací na nejvíce kmitající pilotě. Maximální výkmity jsou uvedeny v tab.1. Zatížení bylo normalizováno a jeho amplitudové měřítko bylo zvoleno tak, aby intenzita dynamického zatížení klesala (pro homogenní zemní prostředí mezi pilotami) exponenciálně se vzdáleností od zdroje vibrací.

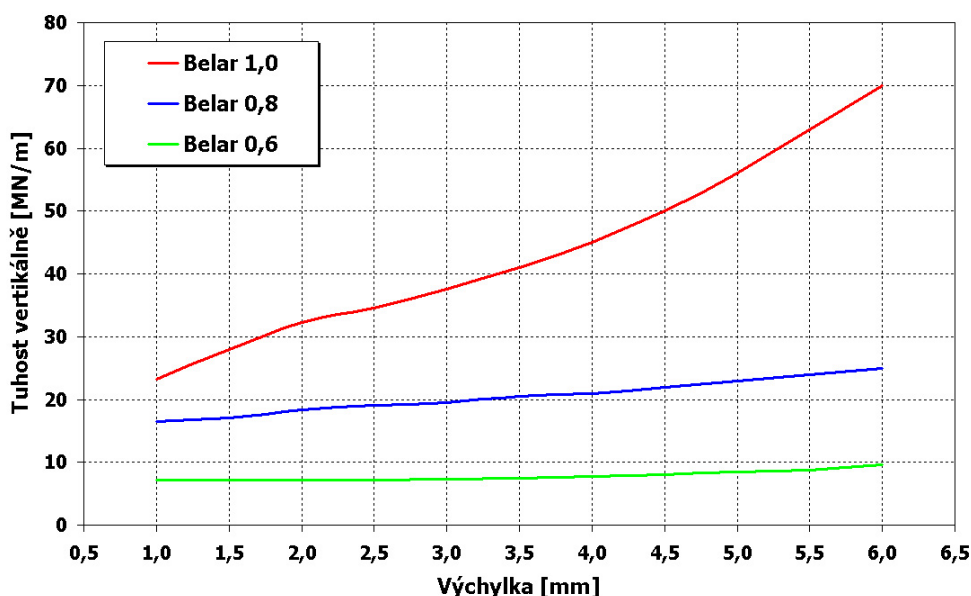
Dynamické zatížení je vneseno do konstrukce ve stejný okamžik a se stejnou fází; ve skutečnosti bude zatížení na jednotlivých pilotách fázově posunuto a jeho vliv na konstrukci objektu bude nižší.

Velikost naměřeného dynamického zatížení nerespektovala přetížení pilot od budoucího objektu; po přetížení pilot hmotou budovy a po provedení vzájemného ztužení hlav pilot budoucí základovou deskou povede tato změna v přetížení a ve vzájemném propojení pilot ke snížení přenosu budoucího signálu, šířícího se zeminou a také ke snížení rozdílů mezi úrovní buzení u jednotlivých pilot – toto zjednodušení může ovlivnit odezvu konstrukce odhadem do cca ± 20 %.

Byla zanedbána hmotnost a tuhost spodní části základové desky pod pružnými vrstvami; dynamické buzení bylo do modelu zavedeno pomocí bodových pružných podpor v místech připojení pilot.

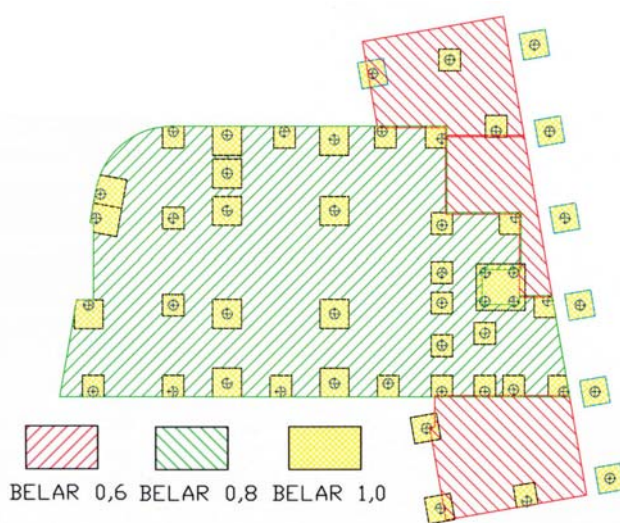
3. Mechanické charakteristiky antivibrační vrstvy

Mechanické charakteristiky antivibrační vrstvy, vytvořené z pryže Belar, byly testovány na vzorcích o rozměrech 500×500×25 mm, které byly použity i pro vyskládání antivibrační vrstvy. Tuhostní parametry použité pryže, uvedené na obr.2, vyplynuly ze statických a dynamických zkoušek pryže v laboratoři. Pryžové bloky (desky) jsou skládány vedle sebe (nikoli do zámků) vždy pouze v jedné vrstvě s mezerami od 3 mm do 5 mm mezi sebou, umožňující soudkovité vyboulení pryže; spojitě pásy pryže mají vyšší tuhost.



Obr.2 Tuhost pryžových bloků v závislosti na jejich stlačení (výchylce)

Specifikace rozmístění a použitých typů pryže byla sestavena na základě opakovaných výpočtů odezvy, tak aby tuhost pružné vrstvy pryže byla přibližně stejná v celé základové spáře a aby naladění konstrukce budovy na pryži bylo v oblasti nízkých frekvencí. Příklad rozmístění pryže ve vodorovné spáře je uveden na obr.3.

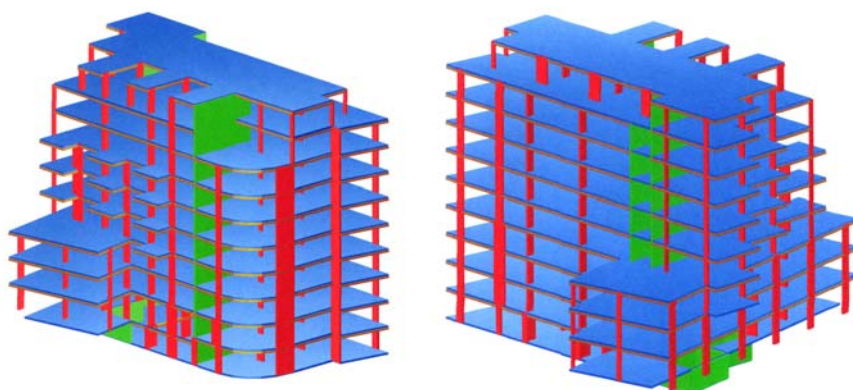


Obr.3 Rozmístění pryže Belar ve vodorovné spáře

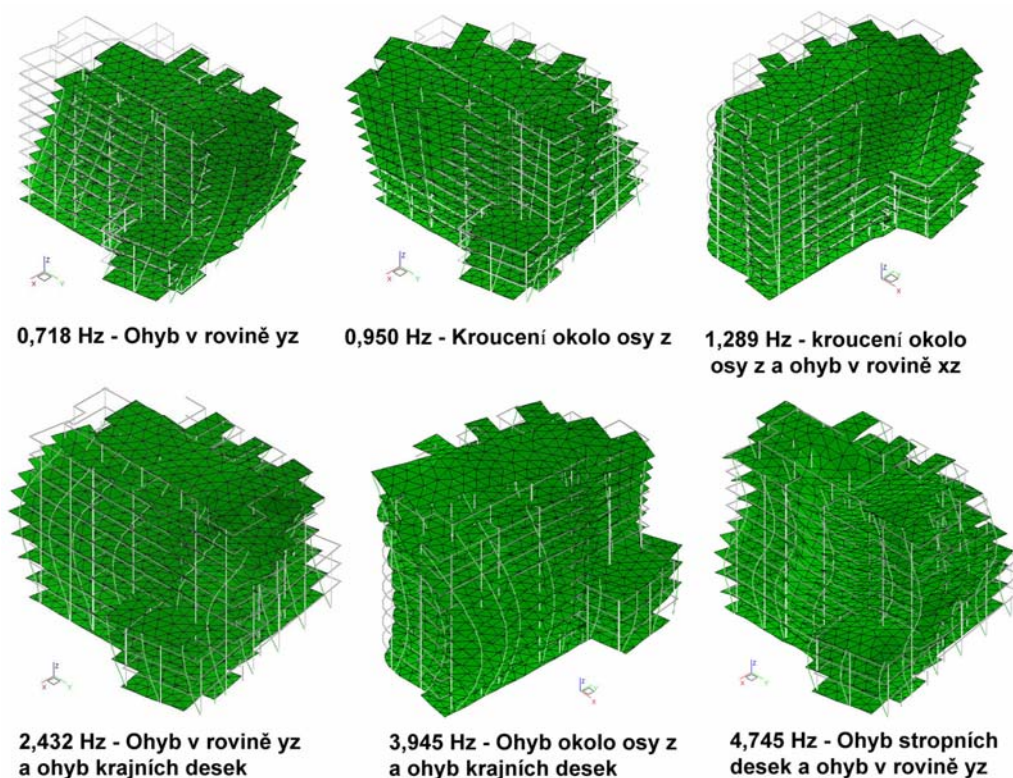
4. Výpočetní model

Ve výpočetním modelu (obr.4) byly modelovány podle dokumentace objektu všechna podlaží v členění na stropní desky, základové desky nad vrstvou pryže, sloupy, nosné stěny a obvodové a vnitřní průvlaky. Pryžová vrstva byla uvažována jako pružné podloží Winkler-Pasternakova typu pod celou plochou horních částí základových desek a dále jako pružné podepření sloupů a stěn v místech nad pilotami na úrovni horní základové desky.

Tuhost pryže ve výpočetních modelech respektovala jednak typ použitých desek a také vzájemnou superpozici plošného a bodového podepření na úrovni horní části základové desky. Do hmotnosti stropních a základových desek byly zahrnuty rovněž hmoty nenosných prvků (tenké příčky, podlahové vrstvy apod.) a také ekvivalent užitého zatížení podlah, střechy a teras.



Obr.4 Výpočetní model – pohled severovýchodní (vlevo), pohled jihozápadní (vpravo)



Obr.5 Nejnižší vlastní tvary kmitání

5. Naladění konstrukce

Pro analyzovanou budovu byl proveden výpočet vlastního kmitání. Z hlediska dynamické odezvy objektu na účinky od vnějších zdrojů (dopravy) je rozhodující co nejnížší naladění osazení objektů na pryži. Toto se projevuje jednak kývavým (ohybovým) kmitáním objektu na pryži v okolí 1 Hz a dále vertikálním a horizontálním posuvným kmitáním objektu jako celku na pryži nebo kroutivým kmitáním.

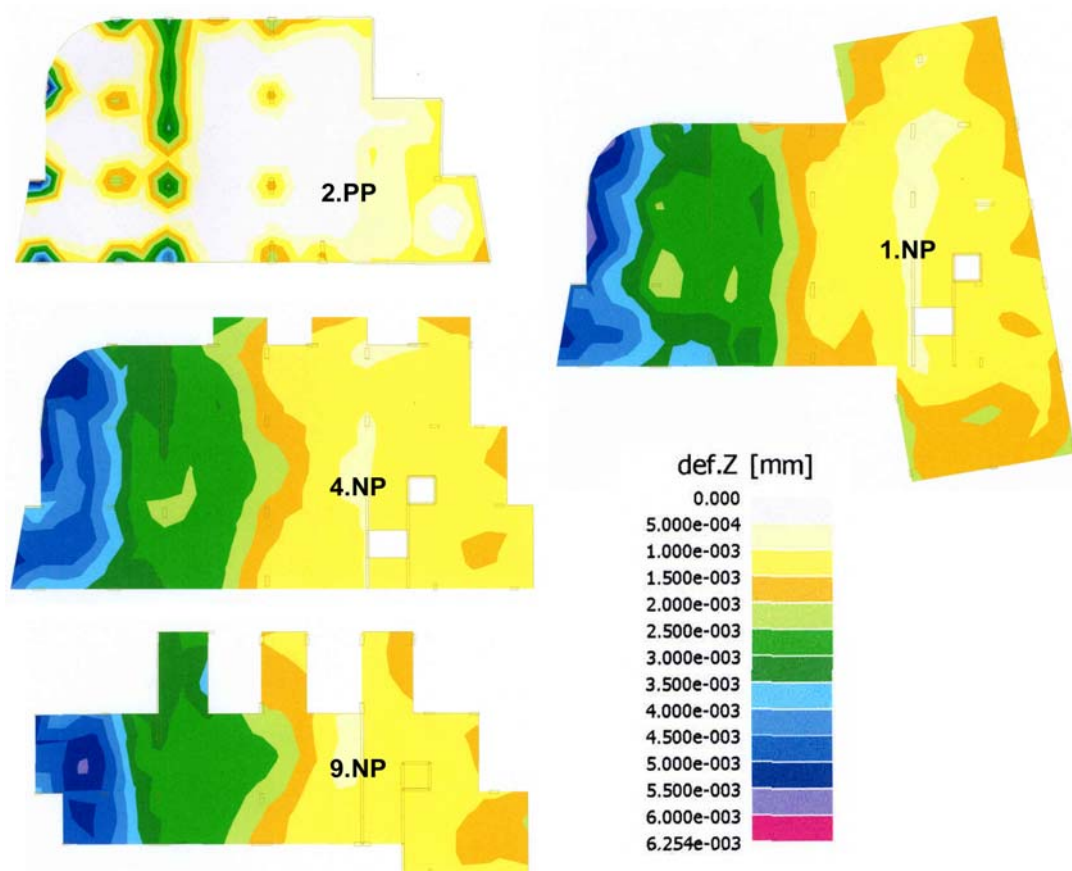
Nejnižších šest tvarů je vykresleno na obr.5. Kromě základních tvarů vlastního kmitání se ve výpočtu objevují také vyšší vlastní frekvence kmitání jednotlivých podlaží, případně sloupů a stěn, balkonů apod., které způsobují, že odezva objektu v každém podlaží je mírně jiná (vyšší či nižší, případně s kmitnami na jiných stanovištích).

6. Prognóza vynuceného kmitání konstrukce

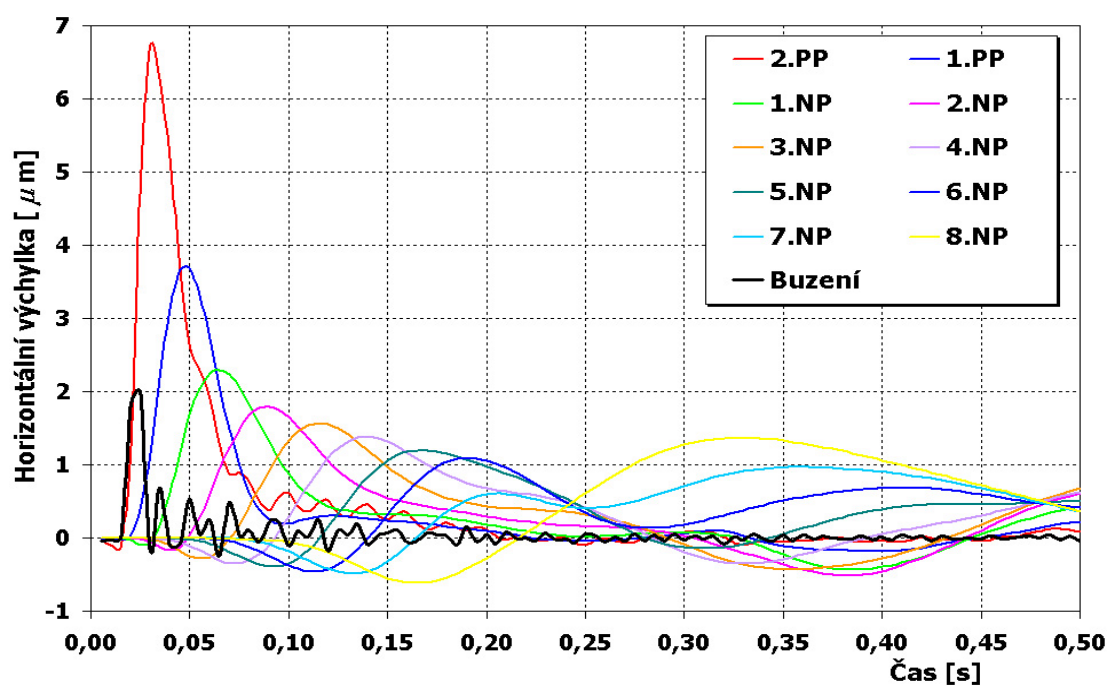
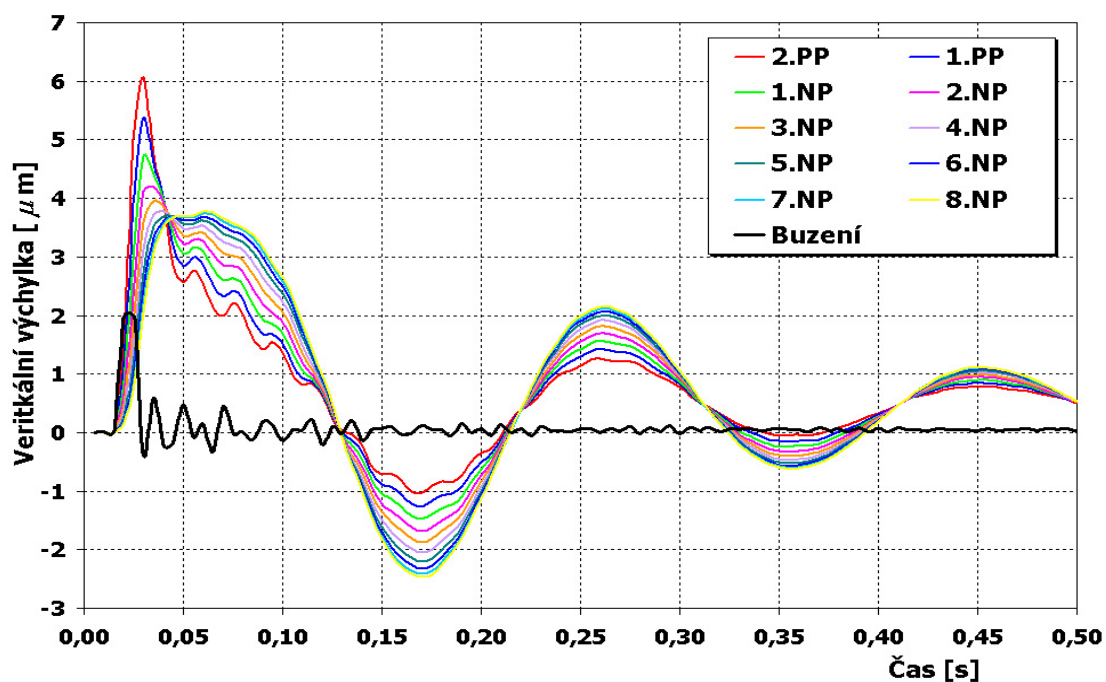
Pro analyzovanou budovu byl proveden výpočet vynuceného kmitání při neharmonickém buzení vibracemi od provozu metra. Byla vyhodnocována okamžitá výchylka v jednotlivých podlažích.

Z této okamžité výchylky byly vytvořeny obálky maximálních hodnot pro jednotlivá podlaží (obr.6).

Dále byly sestaveny časové průběhy vynuceného kmitání po celou dobu trvání budicího signálu, a to pro vybrané prvky na konstrukci (obr.7).



Obr.6 Prognóza špičkových vertikálních výchylek kmitání na vybraných podlažích



Obr.7 Prognóza kmitání ve vybraných bodech (v budově nad sebou) na jednotlivých podlažích ve srovnání s normalizovaným časovým průběhem buzení ve směru vertikálním (nahore) a horizontálním (dole)

Poznámka: Funkce buzení je normalizována, její maximální výkmit je roven 1 a funkce je bezrozměrná. Na obrázku byla její amplituda zvolena větší, tak aby bylo možné porovnat časový tvar buzení s časovým tvarem odezvy

Z vypočtených časových průběhů kmitání je zřejmé, že vnesený impuls do konstrukce od účinků přejezdu vlaků metra je pociťován zejména v nejnižším podlaží jako impuls; nejvíce kmitající místa jsou v blízkosti sloupů a části konstrukce prostorově situované ke straně k metru. S rostoucí výškou podlaží se tento způsob buzení projeví zakmitáním objektu na některé z vlastních frekvencí konstrukce.

Výraznější vliv zakmitání je však omezen většinou jen na nejnižší dvě až tři podlaží. Velmi ostré špičky výchylek na značně malé části podlahy místností v nejnižším podlaží (2.PP) budou při uvážení skutečných rozměrů průřezů nosné konstrukce integrovány do větší plochy s nižší hodnotou vibrací odpovídající integrálu pod kmitající plochou. Důvodem tohoto jevu je skutečnost, že výpočet je prováděn na osovém modelu, ke kterému jsou přiřazeny skutečné vlastnosti a rozměry průřezů.

Ve vyšších podlažích je časová charakteristika kmitání roztažena do nižších frekvencí. Dalším tlumícím prvkem mohou být nenosné přičky, poddajné plovoucí podlahy, kobercové krytiny apod.; analýza jejich vlivu však nebyla prováděna.

Z porovnání výpočtů při vertikálním versus horizontálním buzení je zřejmé, že jednak úroveň horizontálního buzení je nižší než vertikálního buzení – podle měření přibližně poloviční. Dále pak odezva na horizontální buzení je „roztazena“ do velmi nízkých frekvencí a také relativně rychleji utlumena než pro vertikální buzení.

7. Posouzení úrovně vibrací na osoby

Posouzení vibrací podlah vzhledem k osobám pracujícím, pobývajícím nebo bydlicím v objektu je předepsáno podle mezinárodních a současně i českých norem ČSN ISO 2631 a také v Nařízení vlády č.502/2000, které odpovídají platným hygienickým předpisům u nás.

Filozofie posuzování vibrací podle těchto norem je závislá na poloze člověka a typu jeho činnosti; v základním rozdělení se jedná o vibrace na pracovištích a vibrace v obytných místnostech, případně studovnách, nemocnicích apod. V našem případě je nejvýznamnější posouzení obytných místností v objektu vzhledem k bydlení osob.

Citované normy rozlišují vibrace ve dne a v noci. Příslušná kritéria přípustných vibrací podle norem ČSN ISO 2631 by měla být při výstavbě dodržena, i když samozřejmě vzhledem k tomu, že se jedná o člověka, mohou ve zvláštních situacích být vjemy citlivých lidí na vibrace vyšší – proto normy udávají pouze doporučené hodnoty.

Tab.1 Naměřená zrychlení A na úrovni hlav pilot a jim odpovídající výchylky y ve frekvenční oblasti 32 až 40 Hz na vrcholu pilot

Stanoviště	Zrychlení A (od ~ do) [mm/s ²]		Výchylka y (od ~ do) [μm]	
	vertikálně	horizontálně	vertikálně	horizontálně
Bod 1	454 ~ 528	197 ~ 253	11,2 ~ 13,1	4,9 ~ 6,3
Bod 2	490 ~ 690	212 ~ 359	12,1 ~ 17,1	5,2 ~ 8,9

V následující tab.2 jsou uvedeny hodnoty doporučených přípustných vibrací ve veličinách efektivních zrychlení, kterých by mělo být dosaženo v obytných místnostech pro denní i noční dobu.

Tab.2 Doporučené hodnoty přípustných vibrací podlah v obytných místnostech pro ustálené kmitání pro neurčený směr expozice lidí vibracemi podle ČSN ISO 2631-2

Střední kmitočet pásma jedné třetiny oktávy [Hz]	Kombinovaná křivka	Obytné místnosti			Kanceláře	Dílny
		Den (od – do)		Noc		
	Korekční součinitel					
	1,0	2	4	1,4	4	8
Efektivní zrychlení kmitání [mm/s ²]						
1 až 2	3,6	7,2	14,4	5,04	14,4	28,8
2,5	3,72	7,44	14,88	5,21	14,88	29,76
3,15	3,87	7,74	15,48	5,42	15,48	30,96
4	4,07	8,14	16,28	5,70	16,28	32,56
5	4,3	8,6	17,2	6,02	17,2	34,4
6,3	4,6	9,2	18,4	6,44	18,4	36,8
8	5	10	20	7	20	40
10	6,3	12,6	25,2	8,82	25,2	50,4
12,5	7,8	15,6	31,2	10,92	31,2	62,4
16	10	20	40	14	40	80
20	12,5	25	50	17,5	50	100
25	15,6	31,2	62,4	21,84	62,4	124,8
31,5	19,7	39,4	78,8	27,58	78,8	157,6
40	25	50	100	35	100	200
50	31,3	62,6	125,2	43,82	125,2	250,4
Poznámka: přerušovanými vibracemi se rozumí také opakované rázy						

Dominantní naměřené frekvence vibrací hlav pilot, odpovídající buzení od provozu vlaků metra, jsou v oblasti od 32 do 40 Hz (tab.1). Z FFT spekter bylo zjištěno, že tato frekvenční složka odpovídá horizontálnímu ohybovému kmitání pilot v okolí 35 Hz (v závislosti na rozměrech jednotlivých měřených pilot). Další výrazná frekvenční složka, měřitelná na pilotách, je frekvence v okolí 10 Hz, jež zřejmě odpovídá otáčkám ventilátorů větrání metra.

Nízkofrekvenční kvazistatická složka kmitání v okolí do 1 Hz dosahuje amplitudových hodnot v řádu desítek mm/s^2 a odpovídá kvazistatickému naklání (ohybu pilot). Tato složka je pro objekt relativně málo nebezpečná, neboť její vliv bude zčásti eliminován v půdoryse dostatečně velkou základovou deskou.

Odpružením budovy jako celku se přesunou dominantní vibrace budovy do oblasti nejnižších vlastních frekvencí kmitání objektu jako celku. Maximální úroveň odezvy objektu je podle obr.6 a obr.7 ve špičkových výchylkách do cca 7 μm .

Tato hodnota odpovídá přibližně pro frekvence do 5 Hz špičkovému a_{peak} , případně efektivnímu a_{ef} zrychlení:

$$a_{peak} \approx 0,007 \cdot (4 \cdot \pi^2 \cdot 5^2) = 6,9 \text{ mm/s}^2$$

$$a_{ef} \approx 0,707 \cdot a_{peak} = 4,9 \text{ mm/s}^2$$

Pro třetinooktávové pásmo se střední frekvencí 5 Hz je pro obytné místnosti pro noční dobu přípustné efektivní zrychlení 6,02 mm/s^2 . Protože efektivní zrychlení vypočtené pro oba objekty je nižší než normová hodnota, vyhovují všechny místnosti v obou objektech hygienickým normám pro bydlení (i pro noční dobu).

8. Závěr

Príspevek je zaměřen na použití pružné antivibrační vrstvy na úrovni základové spáry pro eliminaci nadměrných vibrací, které se šíří do posuzované budovy geologickým prostředím od konstrukce metra. Hlavním zdrojem buzení je tedy provoz vlaků v metru.

Při pojezdu vlaků se do okolí přenášejí dominantní vibrace, které mají podobu rázového rozkmitání od přejezdu vlaků přes rozhraní nestejných typů konstrukce tubusu metra.

Na hlavách vybraných pilot byly měřeními zjištěny maximální vibrace. Časové průběhy těchto vibrací byly použity pro zatížení namodelované konstrukce budovy, v jejíž základové spáře byla navržena dělicí pružná pryžová vrstva. Pro takovýto model byla stanovena prognóza vibrací na jednotlivých podlažích. Vibrace v odpružené budově splňují hygienické předpisy vzhledem k jejich působení na člověka.

9. Poděkování

Práce na této problematice byla zčásti sponzorována firmou AED Praha a dále podporována grantovým projektem GAČR: 103/03/0082 „Nelineární odezva konstrukcí při mimořádných zatíženích a zatíženích způsobených pohybem člověka“. Autoři si dovoluji touto cestou vyslovit sponzorské firmě i grantové agentuře svůj dík.

10. Literatura

ČSN ISO 2631–1,2,3 / ČSN 01 1405 (1993) *Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím; Část 1: Všeobecné požadavky, Část 2: Nepřerušované vibrace a rázy v budovách (1 až 80 Hz), Část 3: Hodnocení expozice celkovým vertikálním vibracím, osa z, v kmitočtovém rozsahu 0,1 až 0,63 Hz*. ČNI, Praha.

ČSN 73 0040 (1995) *Zatížení stavebních objektů technickou seismicitou a jejich odezva*. ČNI, Praha.

Nařízení vlády č.502/2000 (27. listopadu 2000) *O ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. Úřad vlády, Praha.

- Makovička, D. (1991) Structural Analyses Under Technical Seismic Excitation. *Structural Dynamics*, (Krätzig, W. B. and All eds), Balkema, Rotterdam.
- Makovička, D. (1991) Zatížení stavebních konstrukcí seismickými účinky podpovrchové a povrchové dopravy. *Inženýrské stavby*, č.9.
- Makovička, D., Makovička, D. jr. (1993) Foundations of a Building Structure on Rubber Springs. *Acta Polytechnica*, 33, pp.67-82.
- Makovička, D., Makovička, D. jr. (2001) Analýza seismických účinků na segmentovou dálniční konstrukci. *Stavební obzor*, 10, č.2, pp.33-37.