

# DYNAMICKÁ ANALÝZA KONŠTRUKCIÍ, VÝPOČTOVÉ MODELY A PRAKTICKÉ TYPY NA POSÚDENIE VÝSLEDKOV V NEXIS 3.50

Ing. Daniel Bukov OK TEAM autorizovaný inžinier , Bratislava

Príspevok sa zoberá možnosťami analýzy konštrukcií zaťažených dynamickým zaťažením s využitím programov systému NEXIS. Diskutovaná je problematika tvorby výpočtových modelov , druhov možných dynamických zaťažení ako aj možnosti modelovania interakcie základových konštrukcií s hornou stavbou. V príspevkoch sú uvedené niektoré poznatky z tvorby výpočtových modelov a vyhodnotenia výsledkov získaných z literatúry.

## 1.Úvod

Navrhovanie a posudzovanie konštrukcií vzhľadom na mechanickú odolnosť stability voči zmene tvaru a polohy ako aj úžitkové vlastnosti sa nezaobíde v mnohých prípadoch bez zahrnutia vplyvu zotrvačných síl vyvolaných pohybom konštrukcie alebo základov na deformácie vnútorné sily alebo reakcie konštrukcie .

K typickým príkladom dynamického zaťaženia pôsobiaceho prakticky na každú konštrukciu je zaťaženie vetrom alebo seizmicitou,. Menej častým zaťažením je zaťaženie kmitaním strojov alebo rázmi. V iných prípadoch je postačujúce poznanie dynamických charakteristík konštrukcie najčastejšie prvej vlastná frekvencie alebo niekoľko prvých vlastných frekvencií.

Základom pre riešenie dynamickej úlohy je rovnica rovnováhy vonkajších a vnútorných síl závislá na čase a zahrňujúca zotrvačné účinky hmoty , tlmenie a odpor konštrukcie proti účinkom časovo premenného zaťaženia. Pre sústavu s viacerými stupňami volnosti a hmotou sústredenou do uzlov konštrukcie môžeme napísať :

$$F(t)_I + F(t)_D + F(t)_S = F(t) \quad (1)$$

kde  $F(t)_I$  - je vektor síl zotrvačnosti pôsobiacich na hmotný bod

$F(t)_D$  - jvektor síl viskózneho tlmenia alebo s síl pohlcujúcich energiu

$F(t)_S$  - vektor vnútorných síl vznikajúcich v konštrukcii

$F(t)$  - vektor vonkajších budiacich síl

Rovnica (1) vychádza z fyzikálnych princípov a je platná pre lineárne aj nelineárne systémy.

Pre veľké množstvo konštrukcií vystačíme s predpokladmi o lineárnom správaní materiálu ako aj stanovení rovnováhy na nezdeformovanej sústave . Tieto predpoklady

umožňujú previesť rovnicu (1) na sústavu lineárnych diferenciálnych rovníc druhého rádu dostávame potom známu sústavu rovníc dynamickej rovnováhy

$$M\ddot{u}(t)_a + C\dot{u}(t)_a + Ku(t)_a = F(t) \quad (2)$$

kde

- $M$  - matica hmotnosti konzistentná alebo matica sústredených hmotností
- $C$  - matica viskózneho útlmu popisuje tlmiace vlastnosti skutočnej konštrukcie
- $K$  - matica statickej tuhosti systému konečných prvkov
- $u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t)$  - časovo závislé vektory zovšeobecnené absolútne hodnoty posunov, rýchlostí a zrýchlení uzlových bodov .
- $F(t)$  - časovo závislý vektor všeobecného zaťaženia konštrukcie

Metódy riešenie odozvy vo všeobecnosti sú analytické alebo numerické. Analytické riešenia existujú len pre úzky okruh problémov čo do vystihnúť konštrukcie a zaťaženia. Pre riešenie praktických problémov sa častejšie využívajú numerické metódy riešenia odozvy.

V mnohých knihách o dynamike konštrukcií sú uvádzané rôzne metódy aplikovanej matematiky hľadajúce presné riešenie rovnice (2). S rozvojom výkonnosti a dostupnosti výkonných počítačov sa riešenie rovnice (2) cez numerické metódy stalo široko dostupným aj pre tých , ktorí neovládajú komplexný matematický aparát nevyhnutý pri hľadaní analytického riešenia rovnice (2) .

Súčasný moderný statik , ktorý pozná princíp dynamickej rovnováhy a tlmenia (disipácie kinetickej energie) môže s pomocou vhodného programového vybavenia riešiť zložité konštrukčné sústavy. Jedným z takýchto programov je program NEXIS.

## 2. Riešenie úloh dynamiky konštrukcií s programovým systémom NEXIS

Výpočtový systém NEXIS je ako mnoho ďalších aplikačných programových systémov pre oblasť pevnostnej analýzy konštrukcií využívaných v súčasnosti založený na metóde konečných prvkov , môžeme povedať že je praktickou aplikáciou metódy konečných prvkov pre riešenie úloh statiky a dynamiky konštrukcií. Prudkým nárastom výkonnosti a hlavne dostupnosti výpočtovej techniky sa mení aj prístup k analýze konštrukcií. Súčasný trend analýzy konštrukcií jednoznačne smeruje v oblasti vedy a výskumu ale aj v praxi k numerickým metódam z ktorých jednou je aj metóda konečných prvkov (MKP).

### 2.1 Základné úlohy v dynamike konštrukcií a výpočtový model

Z hľadiska tvorby výpočtového modelu konštrukcie v aproximácií nosného systému alebo telesa nie je žiadny podstatný rozdiel. Náročnosti riešenej úlohy stúpa ak nemôžeme vzhľadom na rýchlosť zmeny polohy hmoty zanedbať pri tom vznikajúce zotrvačné sily .

V dynamickej úlohe pristupujú do výpočtu hmoty , budiace sily a tlmenie. Výpočtový model preto v záujme čo najlepšieho vystihnúť skutočného pôsobenia konštrukcie alebo telesa musí dobre vystihnúť pôsobenie konštrukcie čo do polohy hmoty ,pôsobenia budiacich síl ale aj tlmenia.

## 2.2 Vlastné netlmené kmitanie

Ak na konštrukciu prestane pôsobiť vonkajší impulz (zaťaženie) konštrukcia sa rozkmitá. Kmitanie konštrukcie je blízke vlastnému kmitaniu a zaniká vplyvom pohlcenia energie (tlmením pohybu) v reálnej skutočnej konštrukcii. Ak neuvažujeme z tlmením hovoríme o voľnom kmitaní. Frekvencie voľného netlmeného kmitania (hlavne tie najnižšie) sú potrebnou charakteristikou pre správanie konštrukcií. Napríklad podlahy administratívnych budov by nemali mať prvé vlastné frekvencie nižšie ako 3 Hz ešte opatrnejší musí byť projektant pri návrhu podláh v fitnes centrách pre šport a pod. Samozrejme, že je pri zvažovaní iných charakteristík podláh, resp konštrukcií je možné nájsť aj iné kritériá.

Pre výpočet vlastného kmitania je problémom hľadania vlastných hodnôt. Pre matice s malou šírkou pásu je vhodná metóda hľadania determinantu, pre sústavy sa používa metóda inverznej iterácie, metóda iterácie podpriestoru (použitá v NEXIS) Lanczosova metóda a iné.

Vo všeobecnosti nie je priama závislosť medzi presnosťou výpočtu vlastných hodnôt a vlastných tvarov a presnosťou výpočtu odozvy s využitím metódy rozvoja do vlastných tvarov kmitania. V počiatkoch seizmického inžinierstva s využívala Rayleigh-Ritzova metóda ako metóda hľadania približného riešenia. S rozvojom vysokovýkonných počítačov boli Rayleigh-Ritzove vlastné vektory pri seizmických analýzach nahradené presnými vektormi. V súčasnosti sa používajú tzv. LDR vektory (Load-Dependent-Ritz) pri lineárnej aj nelineárnej analýze a dávajú presnejšie výsledky pri menších nárokoch na výpočtový čas /14/.

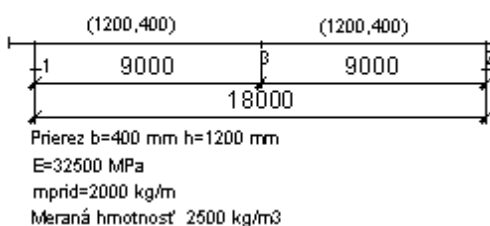
### 2.2.1 Výpočet vlastného kmitania a výpočtový model MKP

Vlastné kmitanie konštrukcie je nielen základnou charakteristikou dynamického správania konštrukcie ale aj prostriedkom na vyhodnotenie jej správania. V tejto kapitole uvedieme niekoľko príkladov jednoduchých konštrukcií s výpočtom pomocou NEXIS-u a podľa vzorcov. Pri každom príklade je uvedené porovnanie a čitateľ si sám urobí obraz o vplyve diskretizácie MKP na výsledky výpočtu

Nosník delený na 2 prvky

$$E = 32500.00 \text{ MPa} \quad J_y = 0.058 \text{ m}^4 \quad m_{\text{prid}} = 2000.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad m_{\text{vlhmo}} = 1248.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad L = 18.000 \text{ m}$$

Výpočtový model



$$f_{v_1} := \frac{6.93}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_y}{0.486 (m_{\text{prid}} + m_{\text{vlhmo}}) \cdot L^4}}$$

$$f_{1\text{NEXIS\_Prut2}} := 3.659 \text{ Hz}$$

$$f_{v_1} = 3.707 \text{ Hz}$$

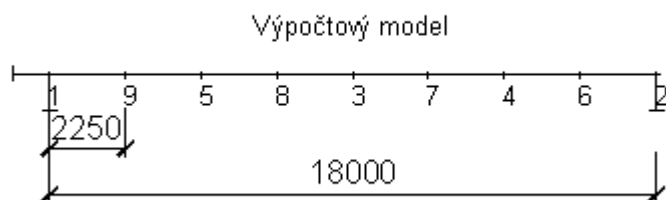
$$\frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS\_Prut2}}}{f_{1\text{NEXIS\_Prut2}}} = 1.31476\%$$

### Nosník delený na 8 prvkov

$$f_{1\text{NEXIS\_Prut2}} := 3.659\text{Hz}$$

$$f_{v_1} = 3.707\text{Hz}$$

$$\frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS\_Prut2}}}{f_{1\text{NEXIS\_Prut2}}} = 1.31476\%$$



$$m_{\text{prid}} := 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad n := 1..5$$

$$E = 32500.000\text{MPa} \quad J_y = 0.058\text{m}^4 \quad m_{\text{prid}} = 2000.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad m_{\text{vlhmo}} = 1248.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad L = 18.000\text{m}$$

$$K := \begin{pmatrix} 9.87 \\ 39.5 \\ 88.8 \\ 158 \\ 247 \end{pmatrix} \quad f_n := \frac{K_n}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_y}{(m_{\text{prid}} + m_{\text{vlhmo}}) \cdot L^4}} \quad f = \begin{pmatrix} 3.681 \\ 14.730 \\ 33.116 \\ 58.922 \\ 92.112 \end{pmatrix} \text{Hz}$$

$$f_{\text{NEXIS8}} := \begin{pmatrix} 3.689 \\ 14.523 \\ 31.137 \\ 53.851 \\ 78.363 \end{pmatrix} \cdot \text{Hz}$$

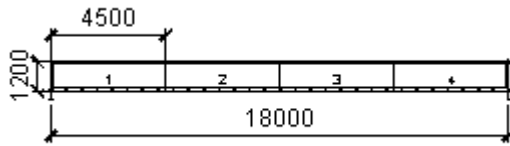
$$\frac{f_n - f_{\text{NEXIS8}_n}}{f_n} =$$

-0.224	%
1.409	
5.975	
8.606	
14.927	

S uvedených porovnaní sú najväčšie rozdiely pri vyšších vlastných frekvenciách čo je podľa očakávania. Výrazné zhustenie však presnosť až tak výrazne neovplyvnilo.

V nasledujúcich príkladoch je ten istý nosník modelovaný ako stena s rôznym delením na konečné elementy . Kým pri statickom riešení vystačíme v modeli nosníka s jedným prvkom po výške nosníka pri výpočte vlastného kmitania je chyba 28 % a s zhustením delenia po dĺžke nosníka výrazne neklesá.

Stena 4 elementy

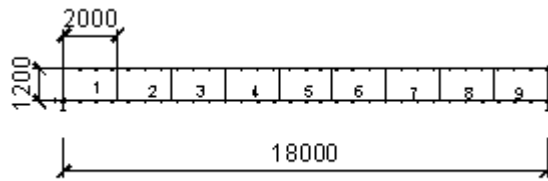


$$f_{1NEXIS\_S4} := 5.202 \text{ Hz}$$

$$\frac{fv_1 - f_{1NEXIS\_S4}}{f_{1NEXIS\_S4}} = -28.7368\%$$

vplyv hustoty delenia na presnosť vlastnej frekvencie sa znížil.

Stena 9 elementov



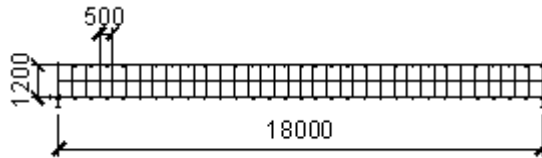
$$f_{1NEXIS\_S9} := 4.114 \text{ Hz}$$

$$\frac{fv_1 - f_{1NEXIS\_S9}}{f_{1NEXIS\_S9}} = -9.89044\%$$

Stena 18 elementov

$$f_{1NEXIS\_S18} := 3.809 \text{ Hz}$$

$$\frac{fv_1 - f_{1NEXIS\_S18}}{f_{1NEXIS\_S18}} = -2.67506\%$$



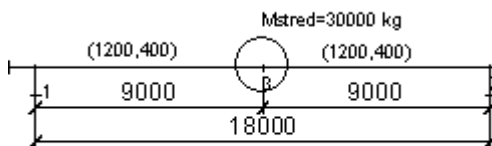
Stena 72 elementov

$$f_{1NEXIS\_S72} := 3.680 \text{ Hz}$$

$$\frac{fv_1 - f_{1NEXIS\_S72}}{f_{1NEXIS\_S72}} = 0.73661\%$$

Ďalej sú uvedené príklady konzolových prútov

Výpočtový model



Prierez  $b=400$  mm  $h=1200$  mm  
 $E=32500$  MPa  
 $m_{prid}=2000$  kg/m  
 Meraná hmotnosť  $2500$  kg/m<sup>3</sup>

$$fv_1 := \frac{6.93}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_y}{M_{stred} \cdot L^3 + 0.486(m_{vlhmo} + m_{prid}) \cdot L^4}}$$

$$f_{1NEXIS} := 2.561 \text{ Hz} \quad fv_1 = 2.585 \text{ Hz}$$

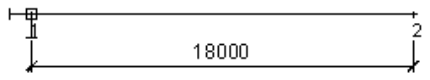
$$\frac{fv_1 - f_{1NEXIS}}{fv_1} = 0.947\%$$

Na konzole je vlastná hmota a prídavná hmota na bm.

Hodnota podľa vzorca 
$$f_{v_1} := \frac{3.52}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_y}{(m_{\text{prid}} + m_{\text{vlhmo}}) \cdot L^4}} \quad f_{v_1} = 1.313 \text{ Hz}$$

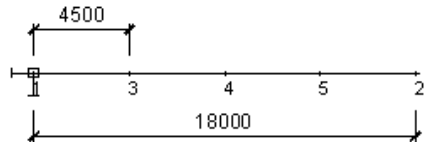
Hodnota podľa vzorca 
$$f_{v_1} := \frac{3.52}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_y}{(m_{\text{prid}} + m_{\text{vlhmo}}) \cdot L^4}} \quad f_{v_1} = 1.313 \text{ Hz}$$

Konzola = 1 prvok



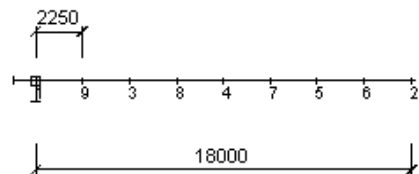
$f_{1\text{NEXIS}} := 0.919 \text{ Hz} \quad f_{v_1} = 1.313 \text{ Hz} \quad \frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS}}}{f_{v_1}} = 29.991\%$

Konzola = 4 prvky



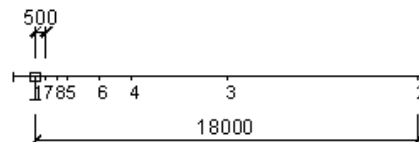
$f_{1\text{NEXIS}} := 1.281 \text{ Hz} \quad f_{v_1} = 1.313 \text{ Hz} \quad \frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS}}}{f_{v_1}} = 2.414\%$

Konzola = 8 prvkov



$f_{1\text{NEXIS}} := 1.309 \text{ Hz} \quad f_{v_1} = 1.313 \text{ Hz} \quad \frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS}}}{f_{v_1}} = 0.281\%$

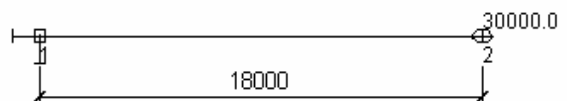
Konzola = 7 prvkov



$f_{1\text{NEXIS}} := 1.207 \text{ Hz} \quad f_{v_1} = 1.313 \text{ Hz} \quad \frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS}}}{f_{v_1}} = 8.052\%$

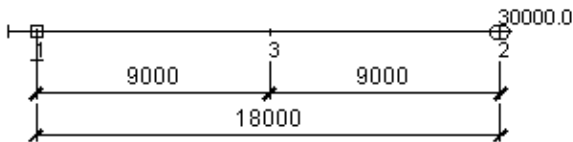
Konzola s hmotou na voľnom konci (ostatné parametre ako pri nosníku a konzole bez hmoty na konci)

Riešenie podľa vzorca

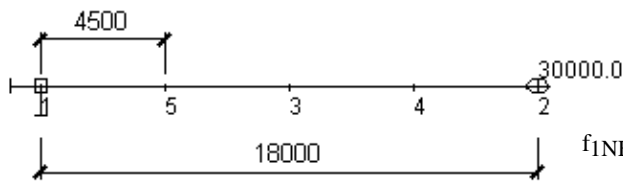


$$f_{v_1} := \frac{1.732}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_y}{M_{\text{kon}} \cdot L^3 + 0.236(m_{\text{vlhmo}} + m_{\text{prid}}) \cdot L^4}} \quad f_{v_1} = 0.746 \text{ Hz}$$

$$f_{1\text{NEXIS}} := 0.643\text{Hz} \quad f_{v_1} = 0.746\text{Hz} \quad \frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS}}}{f_{v_1}} = 13.836\%$$



$$f_{1\text{NEXIS}} := 0.717\text{Hz} \quad f_{v_1} = 0.746\text{Hz} \quad \frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS}}}{f_{v_1}} = 3.920\%$$



$$f_{1\text{NEXIS}} := 0.738\text{Hz} \quad f_{v_1} = 0.746\text{Hz} \quad \frac{f_{v_1} - f_{1\text{NEXIS}}}{f_{v_1}} = 1.106\%$$

Niekoľko poznámok k uvedeným výpočtovým modelom

- pri použití prútových prvkov je potrebné mať na pamäti, že pri výpočte vlastného kmitania sa používa matica sústredených hmotností čo pri riedkom delení vedie k nepresnostiam vo výpočte vlastného kmitania.
- pri tvorbe výpočtového modelu je potrebné brať do úvahy aj veľkosti hmôt
- pri neistote je potrebné overiť výpočet na jednoduchom modeli pomocou analytického vzorca

## 2.3 Vynútené kmitanie

Najvšeobecnejšími metódami pre riešenie odozvy konštrukcie na dynamické zaťaženie sú prírastkové metódy riešiace odozvu v diskretných časových úsekoch daných prírastkom času. K najznámejším metódam patria Newmarkova metóda a Wilsonova  $\theta$ . Pri analýze konštrukcií v lineárnej oblasti pre zaťaženia harmonické ale aj seizmické sa často používa metóda rozvoja do vlastných tvarov kmitania.

Nevýhodou prírastkových metód sú značné nároky na čas s ohľadom na malú dĺžku integračného kroku, ktorou je často podmienená presnosť riešenia ale aj vystihnutie pôsobiaceho zaťaženia. Pri riešení dostávame hodnoty vnútorných síl a deformácií v každom časovom kroku. Pre návrh konštrukcie sú však rozhodujúce extrémny.

Prírastkové metódy nevyžadujú riešenie vlastných tvarov. Pre zhodnotenie správania konštrukcie pri dynamickom zaťažení je poznanie vlastných tvarov kmitania veľmi vhodné pre zhodnotenie výsledkov. Prírastkovým metódam sa však nedá vyhnúť pri riešení nelineárnych úloh kde je často potrebné v každom časovom úseku znova vypočítať prvky matice tuhosti.

Metóda rozvoja do vlastných tvarov kmitania vyžaduje výpočet vlastných tvarov kmitania. Neznáme posunutia konštrukcie sa hľadajú ako kombinácie vlastných tvarov kmitania. Pomocou rozvoja posunutí sa rovnica (2) rozloží na systém nezávislých lineárnych diferenciálnych rovníc druhého rádu. Tieto rovnice sa potom riešia numerickou integráciou prírastkovými metódami.

V programovom systéme NEXIS je použitá metóda rozvoja do vlastných tvarov kmitania, ktorá neznámy priebeh pretvorenia aproximuje ako lineárnu kombináciu vlastných tvarov kmitania. Problematickým pri tejto metóde je zavedenie tlmenia do konštrukcie. V prípade že súčin  $[Y]^T[C][Y]$  (C-ortogonálnosť) bude diagonálna matica potom sa riešenie pohybovej rovnice sústavy rozpadne na riešenie (n) nezávislých diferenciálnych rovníc druhého rádu ktoré sa riešia numerickou integráciou v systéme NEXIS Newmarkovou metódou. Newmarkova metóda je podmiennečne stabilná. Podmiennečná stabilita metódy vyjadruje stabilitu riešenia v závislosti na dĺžke integračného kroku. Pre riešenie odozvy na v čase premenlivé zaťaženie je potrebné prihliadať na vystihnutie zaťaženia. Dĺžka integračného kroku musí byť zvolená tak aby nedochádzalo k odrezávaniu amplitúd zaťaženia.

Pri malej dĺžke integračného kroku narastá čas riešenia. Metóda rozvoja do vlastných tvarov kmitania je vhodná pre sústavy s veľkým podielom statickej zložky.

### **2.3.1 Riešenie odozvy konštrukcií dynamickým výpočtom**

Výpočtový model pre riešenie odozvy na dynamické účinky je v zásade taký istý ako pri riešení odozvy na statické zaťaženie alebo pri riešení vlastného kmitania.

Pre riešenie odozvy na dynamické zaťaženie je potrebné samozrejme zadať aj časový priebeh budiacich síl včítane vzájomných posunov. V NEXIS\_e je možné budiace sily zadávať ako kombinácie modálnej a základnej funkcie. V prípade harmonického budenia a jeho modifikácií je tento spôsob vhodný, ale v prípade iných zaťažení ako napríklad akcelerogramami je potrebné vzhľadom na veľký objem údajov tieto načítať s súboru.

Ako bolo popísané už v predchádzajúcom odseku vždy je potrebné si uvedomiť už pri tvorbe výpočtového modelu akú triedu úloh je programovým vybavením možné riešiť. Budiace sily strojov majú obyčajne vysoké frekvencie okolo 50 Hz kým frekvencie stavebných konštrukcií sú menšie v rozmedzí od 0.2 do 30 Hz. Výpočet odozvy rozvojom do vlastných tvarov kmitania jednoznačne vyžaduje výpočet vlastných frekvencií sústavy.

Presnosť riešenia je závislá na počte vlastných tvarov aproximujúcich riešenie. Vzhľadom na veľmi výkonné riešenie vlastného kmitania v systéme NEXIS nie je počet vlastných tvarov problémom ani z hľadiska času ani kapacitných možností súčasných počítačov. Limitujúcim sa javí len použitie proporcionálneho útlmu, ktorý je pre efektívne použitie metódy rozvoja do vlastných tvarov kmitania podmienkou.

Značná časť vlastných tvarov sa neuplatní z dôvodov ich ortogonálnosti k budiacej sile.

### **2.3.2 Riešenie odozvy na seizmické zaťaženie**

V praxi posudzovania a navrhovania konštrukcií s ohľadom na seizmické zaťaženie sa najčastejšie používa metóda lineárnych spektier odozvy. Metóda je založená na hľadaní riešenia v tvare rozvoja do vlastných tvarov kmitania a však z odoziev vlastných tvarov sa s



použitím spektra odozvy vyberajú iba maximá , ktoré sa vhodnou formou sčítajú. Najkonzervatívnejším metódou pre získanie extrémnych hodnôt je metóda sčítania absolútnych maxim modálnych odoziev. Táto predpokladá , že všetky extrémny nastanú v jednom čase. Bežnou metódou je metóda SRSS ( odmocnina zo sumy druhých mocnín) predpokladá , že extrémny sú štatisticky nezávislé. Toto kritériom nie splnené pre troj dimenzionálne konštrukcie . V roku 1981 bola publikovaná metóda CQC (kompletná kvadratická kombinácia) metóda je založená na princípe teórie náhodných vibrácií. Metóda je vhodná pre 3D konštrukcie a prakticky nie potrebné a ani vhodné používať metódu SRSS aj keď NEXIS umožňuje použitie oboch metód.

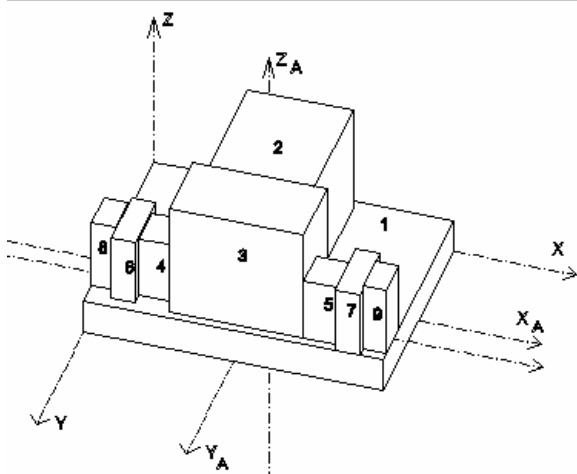
## 2.4 Výpočtové modely niektorých konštrukcií pri použití systému NEXIS

### 2.4.1 Základové konštrukcie

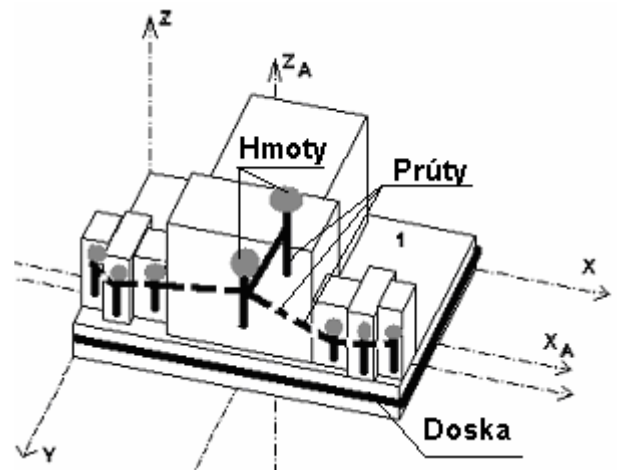
Výpočtový model základovej konštrukcie môže byť vytvorený ako model priestorový s využitím 3D priestorových elementov , ktorým prisúdime vlastnosti základovej pôdy (systém NEXIS zatiaľ nemá možnosť použitia 3D prvkov), povrchovým modelom kde je interakcia s geologickým prostredím nahradená pôsobením na kontaktnej ploche alebo diskretnými väzbami v mieste ukotvenia konštrukcie do základov (obidve možnosti NEXIS obsahuje) .

#### 2.4.1.1 Blokové základy strojov

Programový systém NEXIS neobsahuje 3D prvky telies preto blokový základ môžeme modelovať ako sústavu hmôt a prútov .



Obr.1 Blokový základ



Obr.2 Výpočtový model

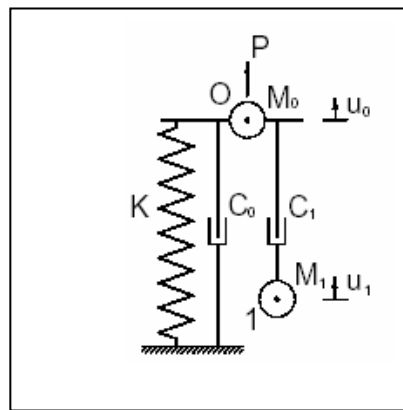
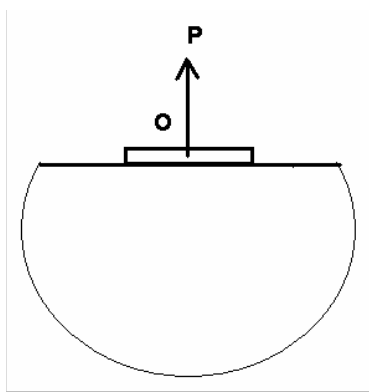
Základovú dosku pol.1 je možné modelovať ako dosku s podložími ostatné časti (bloky pol.2 až 8) môžu byť modelované hmotou sústredenou v ťažisku a prútom spájajúcim hmotu s doskou. Vzájomné prepojenie prvkov je možné modelovať nehmotnými prútmi prípadne stenami. Samozrejme , že o takéhoto približného modelu nemôžeme očakávať napätia v bloku základu alebo sily v základovej doske. Z modelu môžeme získať vlastné frekvencie prípadne pri vynútenom kmitaní aj deformácie resp. posuny bloku. Riešenie

takýchto blokových základov je dobre popísané v literatúre /7/ a hlavne 12. Výhodou takéhoto postupu je využitie algoritmu programu pre riešenie danej úlohy na základe výpočtového modelu ,ktorý je prebratý s analitického riešenia .

### 2.4.1.1.1 Náhrada základu diskretnými väzbami

Pri náhrade základu diskretnými väzbami je potrebné nahradiť celkové pôsobenie čo do hmoty základu a okolitej spolupôsobiacej hmoty , tlmenia, a samozrejme náhrada tuhosti spolupôsobenia základu a základovej pôdy. V literatúre je pre výpočet náhradných veličín uvedené veľké množstvo vzťahov uvádzané vzťahy sú podľa /13/.

#### Výpočtový model pre zvislé kmitanie



K- pružina (posun alebo rotácia) statická tuhosť

$M_0$  – Hmota pripojená cez tlmič  $C_0$  k základu

$M_1$  – Hmota pripojená cez tlmič  $C_1$  k základu

Pre náhradu vodorovného zložky pôsobenia je postačujúca pružina K a hmota  $M_0$  všetky komponenty sú potrebná iba pre náhradu zvislej zložky pôsobenia základu.

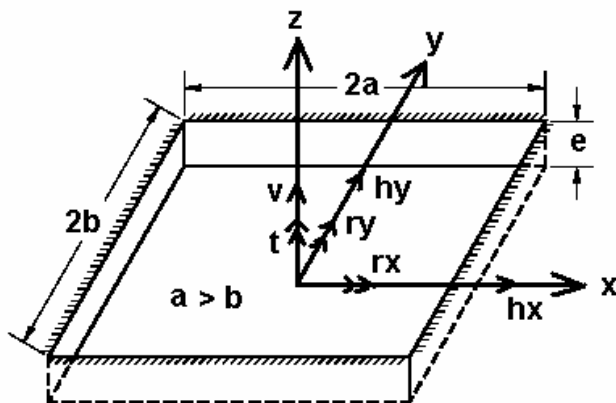
Ako príklad výpočtu uvedieme vzťahy pre pravouhlý základ .

Základ má nasledovné parametre ich identifikácia je zrejma z obrázku:

$$a := 4.5 \cdot m \quad b := 3.0 \cdot m \quad e := 1.5 \cdot m \quad \rho := 2500 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho_{Zp} := 1800 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \nu := 0.25$$

$$E_{\text{def}} := 20 \cdot \text{MPa} \quad G := E \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad G = 13000.000 \text{ MPa} \quad c_s := 200 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### 2.4.1.1.1 Pravouhlý základ



Obr.3 Pravouhlý základ

- 2b- dĺžka základu  $l > b$
- 2l- šírka základu
- e- hĺbka zapustenia základu
- hx- horizontálny posun základu v smer osi X
- hy- horizontálny posun základu v smer osi Y
- v- zvislý posun
- rx- pootočenie základu okolo osi X
- ry- pootočenie základu okolo osi Y
- t- pootočenie základu okolo osi Z
- G- Šmykový modul polopriestoru
- v- Hmotnosť polopriestoru
- $\rho$ - Hmotnosť polopriestoru

Náhrada základu diskretnými modelom podľa /13/

Tuhosti základu

Vodorovná tuhosť v smere osy x 
$$K_{hx} := \frac{Gb}{2-v} \cdot \left[ 6.8 \left( \frac{a}{b} \right)^{0.65} + 2.4 \right] \cdot \left[ 1 + \left( 0.33 + \frac{1.34}{1 + \frac{a}{b}} \right) \cdot \left( \frac{e}{b} \right)^{0.8} \right]$$

Vodorovná tuhosť v smere osy y 
$$K_{hy} := \frac{Gb}{2-v} \cdot \left[ 6.8 \left( \frac{a}{b} \right)^{0.65} + 0.8 \frac{a}{b} + 1.6 \right] \cdot \left[ 1 + \left( 0.33 + \frac{1.34}{1 + \frac{a}{b}} \right) \cdot \left( \frac{e}{b} \right)^{0.8} \right]$$

Tuhosť vo zvislom smere z 
$$K_v := \frac{Gb}{2-v} \cdot \left[ 3.1 \cdot \left( \frac{a}{b} \right)^{0.75} + 1.6 \right] \cdot \left[ 1 + \left( 0.25 + \frac{0.25b}{a} \right) \cdot \left( \frac{e}{b} \right)^{0.8} \right]$$

Tuhosť pri otáčaní základu okolo osi x 
$$K_{rx} := \frac{Gb^3}{1-v} \cdot \left[ 3.2 \cdot \left( \frac{a}{b} \right) + 0.8 \right] \cdot \left[ 1 + \frac{e}{b} + \frac{1.6}{0.35 + \frac{a}{b}} \cdot \left( \frac{e}{b} \right)^2 \right]$$

Tuhosť základu pri otáčaní okolo osy y  $K_{ry} := \frac{G b^3}{1 - \nu} \cdot \left[ 3.73 \left( \frac{a}{b} \right) + 0.27 \right] \cdot \left[ 1 + \frac{e}{b} + \frac{1.6}{0.35 + \frac{a}{b}} \cdot \left( \frac{e}{b} \right)^2 \right]$

Tuhosť pri otáčaní okolo osy z  $K_t := G b^3 \cdot \left[ 4.25 \left( \frac{a}{b} \right)^{2.45} + 4.06 \right] \cdot \left[ 1 + \left( 1.3 + \frac{1.32 \cdot b}{a} \right) \cdot \left( \frac{e}{b} \right)^{0.9} \right]$

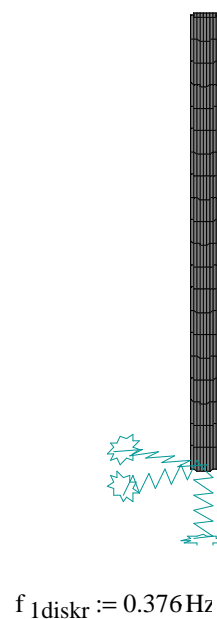
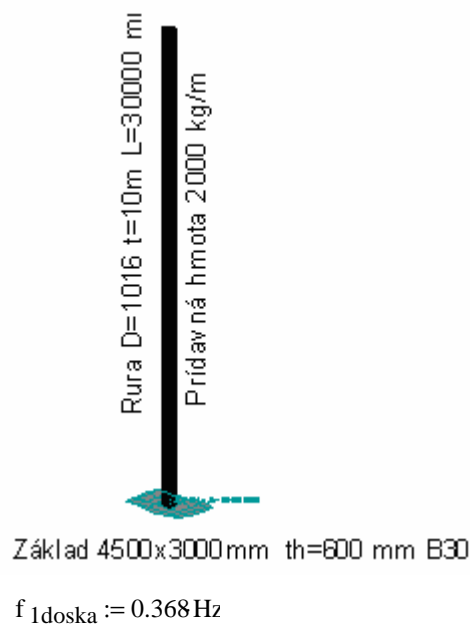
Koeficient tlmenia  $\gamma_{oh} := 0.75 + 0.2 \cdot \left( \frac{a}{b} - 1 \right)$   $\gamma_{ov} := 0.9 + 0.4 \cdot \left( \frac{a}{b} - 1 \right)^{\frac{2}{3}}$

$C_{ox} := \frac{a}{c_s} \cdot K_{hx} \cdot \gamma_{oh}$   $C_1 := \frac{a}{c_s} \cdot K_v \cdot \gamma_{ov}$

Hmoty

$M_o := \frac{a^2}{c_s^2} \cdot K \cdot \mu_o$   $M_1 := \frac{a^2}{c_s^2} \cdot K \cdot \mu_1$

### Porovnanie výpočtov

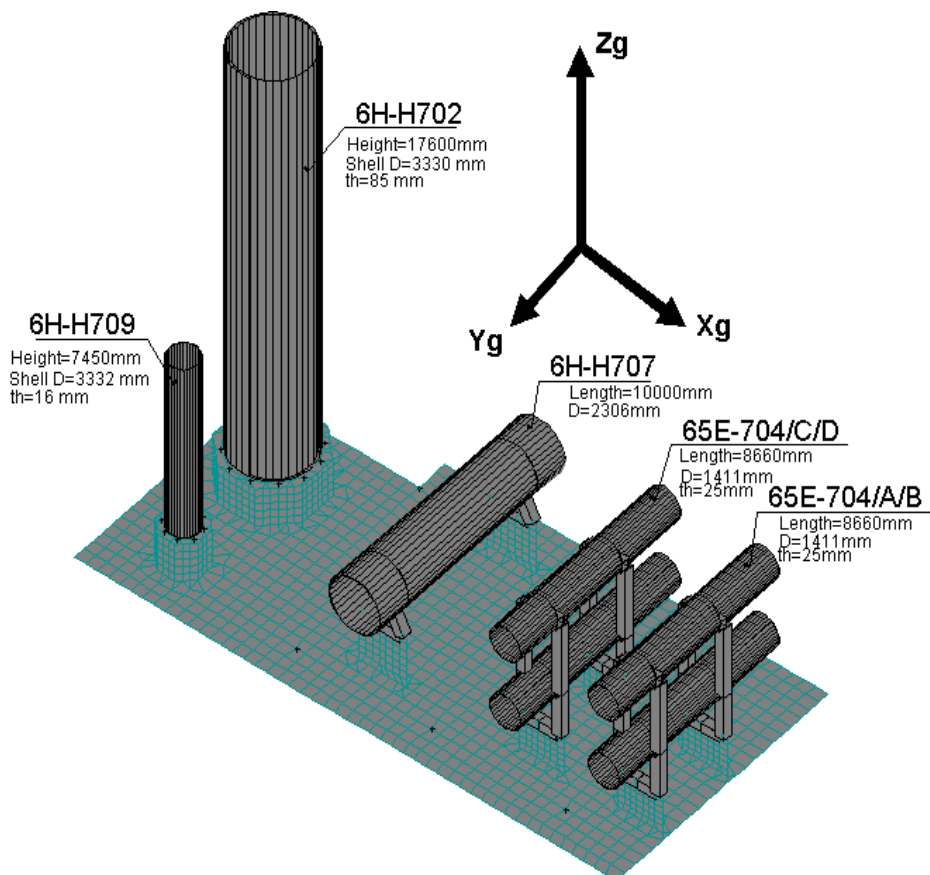


Výpočtový model z 2D modelom pätky      Výpočtový model s diskretnými pružinami

Porovnanie výsledkov výpočtov vlastného kmitania  $\frac{f_{1doska} - f_{1diskr}}{f_{1diskr}} = -2.128\%$

Podobné vzťahy ako pre pravouhlý základ sú v literatúre uvádzané aj pre iné tvary a typy základov vrátane hlbinných. Vzhľadom na značnú odlišnosť tvarovú a funkčnú rozmanitosť je vhodné základové pätky, pásy a pilóty modelovať pomocou diskretných pružín. Je vhodné ak programový systém umožňuje prepočet navrhnutého základu na systém diskretných pružín a hmôt.

## 2.4.2 Výpočtové modely technologických konštrukcií



Výpočtový model zahŕňa model výmenníkov kolón a základov. Pri tvorbe výpočtového modelu je potrebné hlavne dbať na :

- zachovanie polohy hmôt
- modelovať pripojenia technologických zariadení a pomocné konštrukcie pomocou nehmotných prvkov
- podložie pre dynamický výpočet modelovať tak aby malo cca 5x vyššiu tuhosť ako pri statickom výpočte

Vyhodnotenie výsledkov :

Pri vyhodnotení výsledkov je potrebné skontrolovať podiel efektívnej hmoty s odpočítaním hmotnosti základu alebo hmotnosť základu vo výpočte neuvažovať.

Pre účinky jednotlivých zariadení na základ je potrebné skontrolovať šmykové sily v mieste ukotvenia zariadení. Je možné že niektoré zariadenia sa vplyvom malého počtu

tvarov nerozkmitajú a budú mať zanedbateľné účinky na oporné konštrukcie čo nemusí zodpovedať skutočnosti.

#### 4.Záver

Príspevok poukazuje na niektoré problémy modelovania konštrukcií zaťažených dynamickým zaťažením. Na jednoduchých príkladoch je demonštrovaný vplyv výpočtového modelu na presnosť riešenia. Malá časť je venovaná aj spôsobu modelovania interakcie konštrukcie s podložíom . V závere je uvedený zoznam literatúry , ktorý umožní záujemcovi podrobnejšie a hlbšie poznanie danej problematiky.

Programový systém NEXIS v oblasti schopnosti riešiť veľmi rozsiahle konštrukcie je pre užívateľa nástrojom analýzy náročných konštrukcií . Užívateľa sa však nesmie vzdať práva na vlastný úsudok.

#### LITERATÚRA

- [1] Manuály k programu NEXIS 32.40
- [2] Klaus-Jurgen Bathe : Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall,Inc.,Englewood Cliffs,New Jersey ,1982
- [4] Z. Bittnar,P.Řeřicha : Metoda konečných prvku v dynamice konštrukcií , SNTL Praha1981
- [5] Ray W. Clough,Joseph Penzien : Dynamics of structures,
- [6] Kol.autorov: Dynamika stavebných konštrukcií ,T.P. 33, SNTL,Praha 1989
- [7] E. Juhásová : Seismic Effects on Structures, Elsevier,1991
- [8] Suresh C.Arya, Michael W . O'Neill,George Pincuse : Design of structures and Foundations for Vibrating Machines , Gulf Publishing Company Houston,London, Paris McGraw-Hill,Inc.,Second Edition ,New York ,1993
- [9] Recommended lateral force requirements and tentative commentary, SEAOC (Seismology Committee Structural Engineers Association of California), San Francisco , California 1988, 1999
- [10] NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for Buildings and other Structures (Building Seismic Safety Council), (FEMA 302) 1997 Edition
- [11] Uniform Building Code 1997, ICBO 1997
- [12] Barkan D.D. Dynamics of bases and foundations . New York : McGraw-Hill 1962 (Preklad z ruštiny)
- [13] EC 1110-2-6051 Appendix E Engineering Circulars , HQUSACE Civil Works guidance publications 31 Aug 2000
- [14] Edward L. Wilson Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures Csi,Berkeley,California,USA ,Third Edition January 2002