

MODELOVÁNÍ KMITÁNÍ REAKTORU VVER 1000 METODOU DEKOMPOZICE

V. Zeman, Z. Hlaváč¹

Summary: *The paper deals with the modelling of vibration and modal analysis of the nuclear WWER 1000 type reactor. This coupled multibody system is decomposed into subsystems modeled in the special configuration spaces of supporting subsystems. In comparison with original reactor models the spatial localization of the nuclear reactor fuel assembly and protection tubes, continuously mass distribution of beam type components and more accurate modelling of the linear stepper drives for actuation of control cassettes are respected. This new reactor mathematical model is aimed to the vibration analysis of internal components of the reactor excited by pressure pulsation generated by main circulation pumps. A model verification is performed by means of eigenfrequencies and eigenmodes.*

1. Úvod

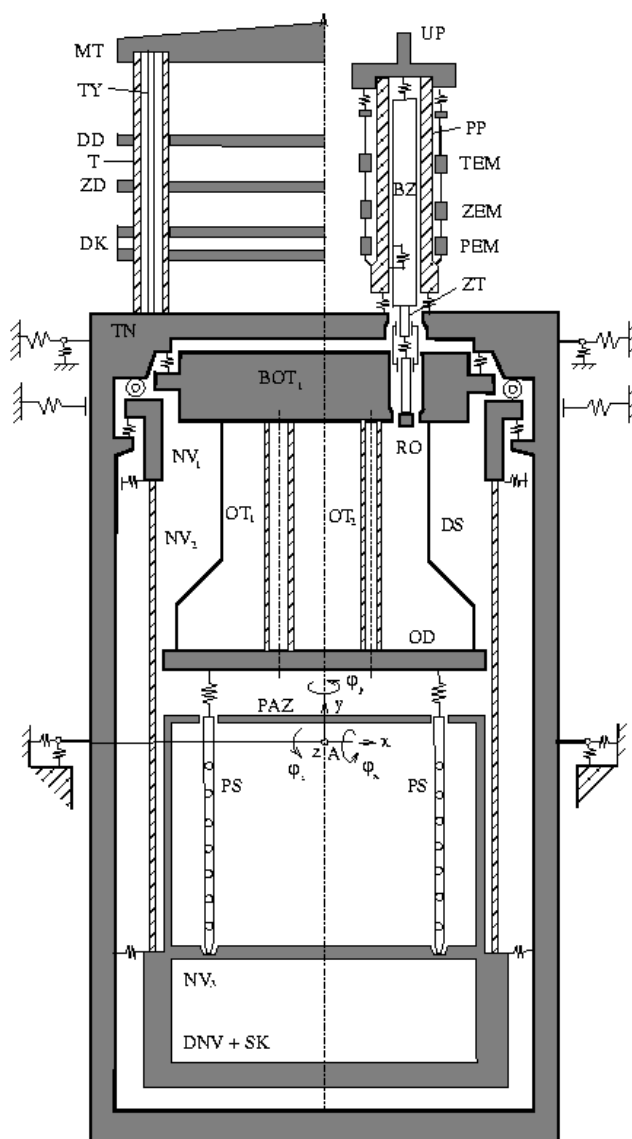
Důležitým provozním požadavkem reaktorů typu VVER je zajištění stability uložení jejich vnitřních komponent ve vertikálním směru, ve smyslu zachování kontaktu po celých stykových plochách. Dynamické účinky, jako jsou např. tlakové pulzace v prostoru mezi stěnou tlakové nádoby a nosným válcem, by mohly tuto stabilitu narušit ([Pečínka 2000]). Jak vyplynulo z modální analýzy izolovaného reaktoru a reaktoru v interakci s chladicími smyčkami v práci [Zeman a Hlaváč 1999], vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání komponent reaktoru jsou jen velmi málo ovlivněny interakcí tlakové nádoby s chladicí smyčkou. Vnitřně buzený reaktor lze proto uvažovat jako izolovaný od smyček. Naopak modely vnitřních komponent i komponent řízení a ochrany reaktorů je nutné, oproti zjednodušeným diskrétním modelům aplikovaným pro nízkofrekvenční seizmické buzení např. v práci [Zeman a Hlaváč 1998], upřesnit. Cílem tohoto příspěvku je proto uvést novou metodiku modelování kmitání komponent reaktoru a aplikovat ji na reaktor VVER 1000 instalovaný v elektrárně Temelín.

Modelováním kmitání reaktorů typu VVER, jako jednoho ze subsystémů primárního okruhu, se zabývala celá řada prací souhrnně citovaných např. v závěrečné zprávě grantového projektu [Zeman a kolektiv 2002] a v dizertaci [Jedlička 2003]. Tyto modely byly určeny pro seizmickou

¹ Prof. Ing Vladimír Zeman, DrSc., Doc. RNDr. Zdeněk Hlaváč, CSc.: Katedra mechaniky, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel. +420 377 63 23 32, e-mail zemanv@kme.zcu.cz, hlavac@kme.zcu.cz

analýzu komponent a vyšetřování odezvy potrubních větví primárního okruhu na buzení vyvolané tlakovými pulzacemi generovanými hlavními cirkulačními čerpadly. Model reaktoru byl v těchto pracích sestaven za zjednodušujících předpokladů, jako např. centrování umístění kontinuí nosníkového typu, náhrady ochranných trub a pouzder pohonů diskretními modely, zjednodušeného modelování komponent řízení a ochrany reaktoru a uvažováním některých komponent ve tvaru tuhých těles. Takový zjednodušený diskretní model reaktoru vyhovuje přibližně pro analýzu kmitání tlakové nádoby a nosné konstrukce horního bloku reaktoru při nízkofrekvenčním (např. seizmickém) buzení.

2. Fyzikální struktura a dekompozice reaktoru



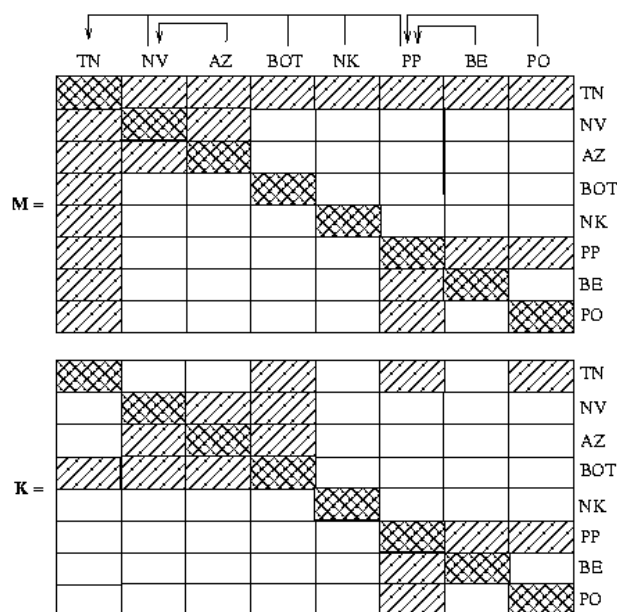
Obr.1 Dynamický model reaktoru

Pro vytvoření matematického modelu reaktoru (obr.1) je, vzhledem k jeho velmi složité struktuře, účelné jej dekomponovat na následující subsystémy:

- tlakovou nádobu s víkem (TN) uloženou na úrovni bodu A ve stavební šachtě;

- *nosný válec* (NV) složený ze tří částí (NV1, NV2, NV3), z nichž dolní část je chápána jako tuhé těleso tvořené dnem nosného válce (DNV), ze stojáků kazet (SK) a pláště aktivní zóny (PAZ);
- *aktivní zónu* (AZ) tvořenou 163 palivovými soubory (PS);
- *blok ochranných trub* (BOT) tvořený deskami a pláštěm (BOT1) spojeným s opěrnou deskou (OD), soustavou 61 ochranných trub (OT1), 60 ochranných trub (OT2) a děrovanou skořepinou (DS);
- *nosnou konstrukci* (NK) horního bloku tvořenou třemi deskami (DK, ZD, DD) a montážní traverzou (MT), jež jsou navzájem provázány šesti trubkami (T) a tyčemi (TY) uvnitř trubek;
- soustavu 61 *pouzder pohonů* (PP) s ukazateli polohy (UP);
- soustavu 61 *bloků elektromagnetů* (BE) složených z přídržných (PEM), záchytných (ZEM) a tažných (TEM) elektromagnetů provázaných trubkami a umístěných vně pouzder pohonů;
- soustavu 61 vlastních *pohonů* tvořených mechanismy bloků zdvihání (BZ) a dělenou závěsnou tyčí (ZT) s regulačním orgánem (RO).

Subsystémy jsou navzájem provázány jednak diskretizovanými vazbami charakterizovanými translačními a rotačními tuhostmi v souřadnicových systémech rovnoběžných s globálním souřadnicovým systémem x, y, z , které mají počátky v centrech pružnosti vazeb a jednak vazbami typu ideálního vetknutí nebo ideální podpěry. Dekompozici reaktoru na 8 subsystémů a jejich zobecněným souřadnicím uvedeným v tab.1 – výchylkám středů hmotnosti tuhých těles a výchylkám uzlů (bodů diskretizace) kontinuí v příslušných konfiguračních prostorech – odpovídá struktura matic hmotnosti a tuhosti reaktoru znázorněná na obr.2.



Obr.2 Struktura matic matematického modelu reaktoru

Tab. 1 Označení a význam zobecněných souřadnic komponent reaktoru

Komponenta	Označ.	Počet stupňů volnosti	Pořadí	Zobecněné souřadnice	Konfigurační prostor
Tlaková nádoba	TN	6	1 až 6	$x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Stavební šachta
Nosný válec (NV1+NV2+NV3)	NV	15	7 až 21	$y_1, \varphi_{x1}, \varphi_{z1},$ $x_2, y_2, z_2, \varphi_{x2}, \varphi_{y2}, \varphi_{z2},$ $x_3, y_3, z_3, \varphi_{x3}, \varphi_{y3}, \varphi_{z3}$	Tlaková nádoba
Aktivní zóna (163*PS)	AZ	21	22 až 42	$x_1, \dots, x_7, y_1, \dots, y_7,$ z_1, \dots, z_7	Nosný válec (dno)
Blok ochranných trub (BOT1+61*OT1+60*OT2+DS+OD)	BOT	9	43 až 51	$y_1, \varphi_{x1}, \varphi_{z1},$ $x_2, y_2, z_2, \varphi_{x2}, \varphi_{y2}, \varphi_{z2}$	Tlaková nádoba
Nosná konstrukce (DK+ZD+DD+MT+6*T+6*TY)	NK	24	52 až 75	$x_i, y_i, z_i, \varphi_{xi}, \varphi_{yi}, \varphi_{zi},$ $i = 1, 2, 3, 4$	Tlaková nádoba
Pouzdra pohonů (61*PP s UP)	PP	36	76 až 111	$x_i, y_i, z_i, \varphi_{xi}, \varphi_{yi}, \varphi_{zi},$ $i = 1, \dots, 6$	Tlaková nádoba
Blok elmagnetů (61*PEM+61*ZEM+61*TEM)	BE	8	112 až 119	$y_1, y_2, y_3, y_4,$ $\varphi_{y1}, \varphi_{y2}, \varphi_{y3}, \varphi_{y4}$	Pouzdra pohonů
Vlastní pohony (61*BZ+61*ZT+61*RO)	PO	18	120 až 137	$y_1, \varphi_{y1}, y_2, \varphi_{y2},$ $x_3, y_3, z_3, \varphi_{x3}, \varphi_{y3}, \varphi_{z3},$ $x_4, y_4, z_4, \varphi_{x4}, \varphi_{y4}, \varphi_{z4},$ y'_4, y_5	Tlaková nádoba

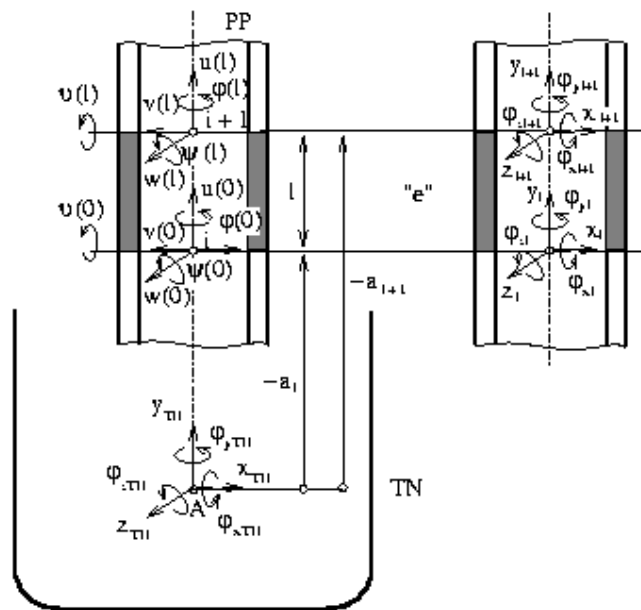
Každý subsystém je modelován ve vhodně vybraném konfiguračním prostoru některého z "nosných" subsystémů. Nosným subsystémem pro NV, BOT, NK a PP je tlaková nádoba, pro AZ tlaková nádoba a nosný válec, pro BE a PO tlaková nádoba a pouzdra pohonů. Diagonální blokové submatice matic M a K reaktoru popisují pohyb jednoho nebo skupiny subsystémů při znehýbněných nosných subsystémech. Vzájemné interakce subsystémů jsou v obr.2 vyjádřeny slabě vyšrafovanými mimodiagonálními bloky. Nevyšrafované bloky v obr.2 jsou nulovými maticemi.

Subsystémy Y=NV, BOT, NK a PP přispívají do matice hmotnosti reaktoru M "svými" submaticemi na pozicích XX, XY, YX a YY, přičemž subsystém X=TN je pro ně nosným subsystémem. Subsystémy Z=AZ, BE a PO přispívají do matice hmotnosti reaktoru submaticemi XX, XY, XZ, YX, YY, YZ, ZX, ZY, ZZ, přičemž subsystém X=TN je nosným subsystémem pro Y (u Z=AZ je Y=NV, u Z=BE nebo PO je Y=PP) a Y je nosným subsystémem pro Z. Matice hmotnosti reaktoru je symetrická, pročež postačuje určovat jen submatice v jejím blokovém horním trojúhelníku.

3. Princip modelování dekomponovaného reaktoru

Pohyb *tuhých těles* (v obr.1 šedě zbarvených) v příslušném konfiguračním prostoru je popsán šesti souřadnicemi (u NV1 a BOT1 třemi). Palivové svazky jsou nahrazeny *nehmotnými nosníky s hmotností soustředěnou do sedmi uzlů*. Jejich parametry byly identifikovány na základě experimentálně vyšetřených modálních veličin ([Zeman a Hlaváč 1998]). Ostatní komponenty (NV2, OT1, OT2, DS, T, TY, PP, BZ, ZT) byly uvažovány jako jednorozměrná kontinua. Kmitání stejných početných komponent PS, OT1, OT2 a subsystémů PP, BE a PO bylo uvažováno, vzhledem k velmi málo odlišným okrajovým podmínkám, pro každý typ jako soufázné. Model však, narozdíl od dosavadních zjednodušených postupů, respektuje prostorové uspořádání palivových souborů v aktivní zóně a ochranných trub OT1 a OT2 v bloku ochranných trub. Umístění lineárních krokových pohonů (subsystémů PP, BE a PO) na víku tlakové nádoby bylo uvažováno jako centrální.

Zcela nový přístup byl zvolen v *modelování kontinuí nosníkového typu*. Tato kontinua nejsou nahrazována nehmotnými nosníky se soustředěnou hmotností do bodů diskretizace, ale jejich příspěvek do modelu systému je uvažován spojitě. Princip vysvětlíme na vybraném subsystému PP. Pouzdro pohonu (obr.3) rozčleníme pomocí m uzlů na nosníkové prvky $e = 1, 2, \dots, m - 1$.



Obr. 3 Výchyšky TN a uzlů prvku PP

Absolutní výchylky nosníkového prvku v lokálním souřadnicovém systému prvku

$$\mathbf{q}_{PP}^{(e)} = [v(0), \psi(0), v(l), \psi(l), w(0), \vartheta(0), w(l), \vartheta(l), u(0), u(l), \varphi(0), \varphi(l)]^T,$$

v němž jsou odvozeny matice hmotnosti a tuhosti $\mathbf{M}_{PP}^{(e)}$ a $\mathbf{K}_{PP}^{(e)}$ prvku (viz (8.2.16) v monografii [Slavík, Stejskal a Zeman 1997]), vyjádříme pomocí zobecněných souřadnic \mathbf{q}_{TN} nosného subsystému TN a zobecněných souřadnic uzlů i a $i + 1$, omezujících nosníkový element e subsystému PP v konfiguračním prostoru TN. Dostáváme tak tvar

$$\mathbf{q}_{PP}^{(e)} = \mathbf{T}_{PP,TN}^{(e)} \mathbf{q}_{TN} + \mathbf{T}_{PP} \mathbf{q}_{PP}^{(i,i+1)}. \quad (1)$$

Zavedeme-li vektory deformací PP v uzlech (v obr.3 je vypuštěn index PP) jako

$$\mathbf{q}_{i,PP} = [x_{i,PP}, y_{i,PP}, z_{i,PP}, \varphi_{xi,PP}, \varphi_{yi,PP}, \varphi_{zi,PP}]^T, \quad (2)$$

dostáváme pak

$$\mathbf{q}_{PP}^{(i,i+1)} = [\mathbf{q}_{i,PP}^T, \mathbf{q}_{i+1,PP}^T]^T. \quad (3)$$

Kinetická a potenciální (deformační) energie PP potom je

$$E_k^{(PP)} = \sum_e \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{q}}_{PP}^{(e)})^T \mathbf{M}_{PP}^{(e)} \dot{\mathbf{q}}_{PP}^{(e)}, \quad (4)$$

$$E_p^{(PP)} = \sum_e \frac{1}{2} (\mathbf{q}_{PP}^{(i,i+1)})^T \mathbf{T}_{PP}^T \mathbf{K}_{PP}^{(e)} \mathbf{T}_{PP} \mathbf{q}_{PP}^{(i,i+1)}. \quad (5)$$

Po dosazení výrazu (1) do (4) a po úpravě dostaneme

$$\begin{aligned} E_k^{(PP)} = & \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_{TN}^T \left[\sum_e (\mathbf{T}_{PP,TN}^{(e)})^T \mathbf{M}_{PP}^{(e)} \mathbf{T}_{PP,TN}^{(e)} \right] \dot{\mathbf{q}}_{TN} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_{TN}^T \sum_e (\mathbf{T}_{PP,TN}^{(e)})^T \mathbf{M}_{PP}^{(e)} \mathbf{T}_{PP} \dot{\mathbf{q}}_{PP}^{(i,i+1)} + \\ & + \frac{1}{2} \sum_e (\dot{\mathbf{q}}_{PP}^{(i,i+1)})^T \mathbf{T}_{PP}^T \mathbf{M}_{PP}^{(e)} \mathbf{T}_{PP} \dot{\mathbf{q}}_{PP}^{(i,i+1)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Z ekvivalencí

$$\frac{\partial E_k^{(PP)}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_{TN}} = \mathbf{M}_{TN}^{(PP)} \dot{\mathbf{q}}_{TN} + \mathbf{M}_{TN,PP} \dot{\mathbf{q}}_{PP}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_k^{(PP)}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_{PP}} = \mathbf{M}_{PP,TN} \dot{\mathbf{q}}_{TN} + \mathbf{M}_{PP} \dot{\mathbf{q}}_{PP}, \quad (8)$$

kde $\dot{\mathbf{q}}_{PP} = [\dot{\mathbf{q}}_{1,PP}^T, \dot{\mathbf{q}}_{2,PP}^T, \dots, \dot{\mathbf{q}}_{6,PP}^T]^T$ jest vektor zobecněných rychlostí všech uzlů PP, vyplývají submatice hmotnosti pouzder pohonů ve výsledné matici hmotnosti reaktoru \mathbf{M} . Zřejmě je

$$\mathbf{M}_{TN}^{(PP)} = \sum_e (\mathbf{T}_{PP,TN}^{(e)})^T \mathbf{M}_{PP}^{(e)} \mathbf{T}_{PP,TN}^{(e)} \in R^{6,6}, \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_{TN,PP} = \sum_e \widetilde{\mathbf{M}}_{TN,PP}^{(e)} \in R^{6,36}, \quad (10)$$

kde jednotlivé sčítance (všechny typu 6x36) mají zaplněn pouze blok typu 6x12 mezi sloupci pořadových čísel $6e - 5$ a $6e + 6$ ($e = 1, \dots, 5$). Zaplněné bloky přitom mají tvar

$$(\mathbf{T}_{PP,TN}^{(e)})^T \mathbf{M}_{PP}^{(e)} \mathbf{T}_{PP} \in R^{6,12}.$$

Dále platí

$$\mathbf{M}_{PP} = \sum_e \widetilde{\mathbf{M}}_{PP}^{(e)} \in R^{36,36}, \quad (11)$$

kde jednotlivé sčítance (všechny řádu 36) mají zaplněn pouze blok řádu 12 mezi řádky a sloupci pořadových čísel $6e - 5$ a $6e + 6$ ($e = 1, \dots, 5$). Zaplněné bloky přitom mají tvar $\mathbf{T}_{PP}^T \mathbf{M}_{PP}^{(e)} \mathbf{T}_{PP} \in R^{12,12}$. Symetricky uložené mimodiagonální bloky matice hmotnosti reaktoru jsou navzájem transponované.

V horním uzlu $i = 6$ každého pouzdra pohonu je soustředěna hmotnost ukazatele polohy (UP) nahrazená tuhým tělesem o parametrech m_{UP} , I_{UP} a $I_{0,UP}$. Kinetická energie tohoto tělesa je vyjádřena výrazem

$$\begin{aligned} E_k^{(UP)} = & \frac{1}{2} m_{UP} \left[\dot{x}_{TN} + a_{6,PP} \dot{\varphi}_{z,TN} + \dot{x}_{6,PP} \right]^2 + (\dot{y}_{TN} + \dot{y}_{6,PP})^2 + \\ & (\dot{z}_{TN} - a_{6,PP} \dot{\varphi}_{x,TN} + \dot{z}_{6,PP})^2 \Big] + \\ & + \frac{1}{2} I_{UP} \left[(\dot{\varphi}_{x,TN} + \dot{\varphi}_{x6,PP})^2 + (\dot{\varphi}_{z,TN} + \dot{\varphi}_{z6,PP})^2 \right] + \frac{1}{2} I_{0,UP} (\dot{\varphi}_{y,TN} + \dot{\varphi}_{y6,PP})^2. \end{aligned}$$

Z ekvivalence parciálních derivací $E_k^{(UP)}$ podle $\dot{\mathbf{q}}_{TN}$ a $\dot{\mathbf{q}}_{PP}$, analogicky k (7) a (8), vyplývají submatice $\mathbf{M}_{TN}^{(UP)}$, $\mathbf{M}_{TN,PP}^{(UP)}$ a $\mathbf{M}_{PP}^{(UP)}$, jež doplní příslušné submatice spojitě rozložené hmotnosti pouzder pohonu.

Z ekvivalence

$$\frac{\partial E_p^{(PP)}}{\partial \mathbf{q}_{PP}} = \mathbf{K}_{PP} \mathbf{q}_{PP} \quad (12)$$

vyplývá submatice tuhosti pouzder pohonů \mathbf{K}_{PP} , která má stejnou strukturu jako matice \mathbf{M}_{PP} , zaměníme-li matice $\mathbf{M}_{PP}^{(e)}$ za $\mathbf{K}_{PP}^{(e)}$. Protože pouzdra pohonů jsou v dolní části přírubami vázána šesti předepnutými šrouby k nátrubkům víka tlakové nádoby, respektujeme jejich poddajnost diskretní vazbou. Ta doplní matici tuhosti \mathbf{K}_{PP} na pozicích řádků a sloupců pořadových čísel 1 až 6 o diagonální matici vazby TN s uzlem 1PP, která bude mít tvar

$$\mathbf{K}_{TN,1PP} = \text{diag}[k_{x,PP}, k_{y,PP}, k_{z,PP}, k_{xx,PP}, k_{yy,PP}, k_{zz,PP}].$$

Uvedenou metodiku modelování můžeme aplikovat i na ostatní subsystémy $Y=NV$, BOT , NK , pro které je tlaková nádoba také nosným subsystémem ($X=TN$). Podobně jako u pouzder pohonů vyplývá příspěvek subsystému Y do matice hmotnosti reaktoru z ekvivalence

$$\frac{\partial E_k^{(Y)}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_X} = \mathbf{M}_X^{(Y)} \dot{\mathbf{q}}_X + \mathbf{M}_{X,Y} \dot{\mathbf{q}}_Y, \quad (13)$$

$$\frac{\partial E_k^{(Y)}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_Y} = \mathbf{M}_{Y,X} \dot{\mathbf{q}}_X + \mathbf{M}_Y \dot{\mathbf{q}}_Y. \quad (14)$$

Lokalizace submatic v matici hmotnosti reaktoru je dána jejich indexováním. Submatice s jedním indexem dole jsou symetrické a umístěné na diagonále a se dvěma indexy dole jsou umístěné mimo diagonálu na pozici určenou indexy, přičemž platí $\mathbf{M}_{Y,X} = \mathbf{M}_{X,Y}^T$. Horní

index v závorce představuje příspěvek modelovaného subsystému Y do submatice nosného subsystému (nosných subsystémů).

Metodiku modelování lze zobecnit i na subsystémy Z=AZ, BE, PO "nesené" subsystémem Y (pro AZ je Y=NV a pro BE a PO je Y=PP), který jest sám unášen tlakovou nádobou X=TN. Příspěvek těchto "dvojitě nesených subsystémů" do matice hmotnosti reaktoru vyplývá z ekvivalence

$$\frac{\partial E_k^{(Z)}}{\partial \dot{q}_X} = \mathbf{M}_X^{(Z)} \dot{q}_X + \mathbf{M}_{X,Y}^{(Z)} \dot{q}_Y + \mathbf{M}_{X,Z} \dot{q}_Z, \quad (15)$$

$$\frac{\partial E_k^{(Z)}}{\partial \dot{q}_Y} = \mathbf{M}_{Y,X}^{(Z)} \dot{q}_X + \mathbf{M}_Y^{(Z)} \dot{q}_Y + \mathbf{M}_{Y,Z} \dot{q}_Z, \quad (16)$$

$$\frac{\partial E_k^{(Z)}}{\partial \dot{q}_Z} = \mathbf{M}_{Z,X} \dot{q}_X + \mathbf{M}_{Z,Y} \dot{q}_Y + \mathbf{M}_Z \dot{q}_Z. \quad (17)$$

O lokalizaci a vlastnostech submatic determinovaných indexováním platí shora uvedené vývody. Stačí pouze dodat, že výsledné submatice v bloku nosného subsystému na diagonále jsou dány součtem vlastní submatice a submatic všech jím nesených subsystémů. Tedy

$$\mathbf{M}_{TN}^{\Sigma} = \mathbf{M}_{TN} + \mathbf{M}_{TN}^{(NV)} + \mathbf{M}_{TN}^{(AZ)} + \mathbf{M}_{TN}^{(BOT)} + \mathbf{M}_{TN}^{(NK)} + \mathbf{M}_{TN}^{(PP)} + \mathbf{M}_{TN}^{(BE)} + \mathbf{M}_{TN}^{(PO)},$$

$$\mathbf{M}_{NV}^{\Sigma} = \mathbf{M}_{NV} + \mathbf{M}_{NV}^{(AZ)}, \quad \mathbf{M}_{PP}^{\Sigma} = \mathbf{M}_{PP} + \mathbf{M}_{PP}^{(BE)} + \mathbf{M}_{PP}^{(PO)}.$$

Stejnou vlastnost mají i submatice mimo blokovou diagonálu. Platí tedy

$$\mathbf{M}_{TN,NV}^{\Sigma} = \mathbf{M}_{TN,NV} + \mathbf{M}_{TN,NV}^{(AZ)}, \quad \mathbf{M}_{TN,PP}^{\Sigma} = \mathbf{M}_{TN,PP} + \mathbf{M}_{TN,PP}^{(BE)} + \mathbf{M}_{TN,PP}^{(PO)}.$$

Uvedenou metodikou jsou postupně zaplňovány bloky v globálních maticích hmotnosti i tuhosti reaktoru v obr.2.

4. Modální analýza reaktoru

Model reaktoru je natolik rozsáhlý, že sestavování matic hmotnosti a tuhosti bylo ověřováno a testováno výpočtem modálních veličin postupně pro jednotlivé subsystémy a skupiny subsystémů. Pro ilustraci uvádíme v tab.2 nejnižší vlastní frekvence a stručnou charakteristiku jim přiřazených vlastních vektorů pro skupinu subsystémů TN, NV, AZ, BOT a NK o 75 stupních volnosti, skupinu subsystémů PP, BE a PO popisující komponenty řízení a ochrany reaktoru o 62 stupních volnosti a v tab.3 pro celý reaktor o 137 stupních volnosti.

Tab. 2 Vlastní frekvence a charakteristika vlastních tvarů kmitání skupin subsystémů

Skupina subsystémů	Pořadí frekvencí	Vlastní frekvence [Hz]	Charakteristika vlastních tvarů kmitání
TN+NV+AZ +BOT+NK	1,2	3.31	Příčné kmity PS (1.tvar)
	3,4	4.58	Příčné kmity NK (1.tvar), slabě AZ
	5	6.26	Torzní kmity NK (1.tvar)
	6,7	7.04	Příčné kmity PS (2.tvar)
	8,9	10.8	Příčné kmity PS (3.tvar), NK a horiz. kmity TN
	10,11	12.77	Příčné kmity PS (3.tvar), NK a horiz. kmity TN
	12	13.49	Vertikální kmity TN,NV,AZ,BOT a NK ve fázi
	13,14	15.99	Příčné kmity NK (2.tvar)
	15	16.95	Torzní kmity NK (2.tvar), TN
	16,17	18.29	Příčné kmity PS (4.tvar), slabě NK
	18	20.94	Torzní kmity NK (2.tvar)
19,20	21.35	Příčné kmity NK (2.tvar) a PS (5.tvar)	
PP+BE+PO	1	4.16	Vertikální kmity PO
	2,3	8.92	Příčné kmity PP a BE ve fázi s PO
	4,5	9.36	Příčné kmity PP a BE v protifázi a PO
	6	19.65	Vertikální kmity BZ s HZT v protifázi s DZT
	7,8	21.95	Příčné kmity PO
	9	27.47	Torzní kmity PO

Tab. 3 Vlastní frekvence a charakteristika vlastních tvarů kmitání reaktoru

Pořadí frekvencí	Vlastní frekvence [Hz]	Charakteristika vlastních tvarů kmitání
1,2	3.31	Příčné kmity PS (1.tvar)
3	4.16	Vertikální kmity PO
4,5	4.58	Příčné kmity NK(1.tvar), slabě AZ
6	6.26	Torzní kmity NK (1.tvar)
7,8	7.04	Příčné kmity PS (2.tvar), slabě NK, PP s BE, PO
9,10	8.69	Příčné kmity PP s BE ve fázi s PO, slabě AZ, NK
11,12	9.26	Příčné kmity PP s BE v protifázi s PO
13,14	11.0	Příčné kmity PS (3.tvar), TN, NK, PP s BE, PO
15,16	12.87	Příčné kmity PS (3.tvar), TN, NK, PP s BE, PO
17	13.37	Vertikální kmity TN, NV, AZ, NK v protifázi s PO
18,19	15.99	Příčné kmity NK (2.tvar)
20	16.95	Torzní kmity TN, NV, NK, PO
21,22	18.3	Příčné kmity PS (4.tvar), NK, PP s BE, PO
23	19.66	Vertikální kmity BZ s HZT v protifázi s DZT
24	20.93	Torzní kmity NK (2.tvar)
25,26	21.2	Příčné kmity PO a PP s BE

5. Závěr

V příspěvku je uvedena metoda vytváření matematických modelů reaktoru. Metoda je aplikována na sestavení plně parametrizovaného modelu reaktoru VVER 1000 v ETE o 137 stupních volnosti, který byl podroben modální analýze. Přehledné grafické zobrazení vlastních tvarů kmitání v konfiguračních prostorech nosných subsystémů umožňuje operativně analyzovat podíl kmitání a velikost deformací jednotlivých komponent reaktoru i deformací diskrétních vazeb. Model je připraven pro citlivostní analýzu, naladění tuhosti vybraných vazeb na základě experimentálně vyšetřených vlastních frekvencí a po doplnění buzení tlakovými pulzacemi i pro analýzu stability uložení vnitřních komponent reaktoru.

6. Poděkování

Práce byla podpořena výzkumným záměrem MSM 4977751303 MŠMT České republiky.

7. Literatura

- [Pečínka 2000] Pečínka, L. 2000: *Rozbor statické a dynamické stability uložení částí reaktorů VVER 440/213 EDU a návrh diagnostických opatření*. Výzkumná zpráva DITI 300/95, ÚJV Řež.
- [Zeman a Hlaváč 1999] Zeman, V. - Hlaváč, Z. 1999: Seizmická analýza primárního okruhu jaderné elektrárny a jeho komponent, in *Sborník Inženýrská mechanika '99* (C. Kratochvíl, V.Kotek a J. Krejsa ed.), Ústav mechaniky těles, VUT Brno, str. 295-300.
- [Zeman a Hlaváč 1998] Zeman, V. - Hlaváč, Z. 1998: *Seizmická analýza reaktoru VVER 1000 s americkým palivem*. Výzkumná zpráva 102-07-98, ZČU Plzeň.
- [Zeman a kolektiv 2002] Zeman, V. a kol. 2002: *Modelování, dynamická analýza a optimalizace parametrů těleso-potrubních systémů s viskoelastickými tlumiči*. Závěrečná výzkumná zpráva grantového projektu GAČR 101/00/0345. Katedra mechaniky FAV ZČU Plzeň.
- [Jedlička 2003] Jedlička, Z. 2003: *Modelování a seizmická analýza rozsáhlých těleso-potrubních systémů s frekvenčně závislými parametry*. Dizertační práce, ZČU Plzeň.
- [Slavík, Stejskal a Zeman 1997] Slavík, J. - Stejskal, V. - Zeman, V. 1997: *Základy dynamiky strojů*. Vydavatelství ČVUT Praha.