



IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF THE DYNAMIC MODEL OF THE REACTOR WWER 1000 SUPPORT CYLINDER BY SPECTRAL TUNING

A. Musil*, Z. Hlaváč*

Summary: *The paper deals with the optimization of parameters (mass parameters of stiff bodies) of the dynamic model of the reactor WWER 1000 support cylinder. Within the model of the whole reactor, support cylinder appears to be a significant subsystem for its modal properties having dominant influence on the behaviour of the reactor as a whole. Relative sensitivities of eigenfrequencies to the change of the discrete parameters of the model were determined. Obtained values were applied in the following spectral tuning process of the (selected) discrete parameters. Tuning itself is formulated as an optimization problem.*

1. Úvod

Dynamický model byl laděn na základě hodnot vlastních frekvencí, které byly zjištěny na detailním MKP modelu a které lze zároveň postihnout modelem jednodušším. Výpočtový model, vytvořený v programu Cosmos/M, obsahuje nosný válec s pláštěm aktivní zóny. Vlastní frekvence získané na tomto modelu potom představují cílové hodnoty pro vlastní frekvence laděného dynamického modelu nosného válce.

Ladění hmotových parametrů dynamického modelu tělesa nosného válce představuje první fázi identifikace parametrů modelu celého reaktoru VVER 1000. Bylo zapotřebí, aby okrajové podmínky byly v obou modelech uvažovány stejné a na modální vlastnosti nosného válce tak neměly vliv žádné další faktory. V případě tohoto výpočtu to znamená, že tuhosti od ucpávky, spodní opěry a toroidních trubek byly vypuštěny. Jedinou uvažovanou okrajovou podmínkou tak bylo zavěšení nosného válce na přírubu tlakové nádoby.

Po provedení ladění hmotových parametrů tělesa nosného válce bude dynamický model otestován modální analýzou. V případě, že bude dosaženo požadovaných výsledků, bude možno v další fázi model rozšířit o zmiňované tuhostní prvky. Zároveň bude do modelu včleněna aktivní zóna a další ladicí procesy budou následovat.

* Ing. Aleš Musil, doc. RNDr. Zdeněk Hlaváč, CSc.: Západočeská univerzita v Plzni, FAV, Katedra mechaniky; Univerzitní 22; 306 14 Plzeň; tel.: +420.377 632 301, fax: +420.377 632 302; e-mail: amusil@kme.zcu.cz

2. Spektrální ladění

Cílem ladění matematického modelu mechanické soustavy je změnit hodnoty parametrů (hmotových, tuhostních, geometrických) na nové hodnoty zaručující dosažení předepsaných charakteristických hodnot, v případě spektrálního ladění vlastních frekvencí.

Mechanická soustava je uvažována netlumená. Hmotové, tuhostní, popř. geometrické parametry, jejichž změnami chceme matematický model ladit, uspořádáme do vektoru $\mathbf{p} = [p_j]$, $j = 1, \dots, s$ ladicích parametrů. Charakteristické hodnoty, kterými jsou vybrané vlastní frekvence Ω_i , na něž klademe určité požadavky, uspořádáme do vektoru $\mathbf{l} = [l_i]$, $i = 1, \dots, k$. Tento vektor nazveme vektorem naladění.

Vybrané laděné veličiny závisí (přes koeficientové matice \mathbf{M} a \mathbf{K} matematického modelu) na vybraných ladicích parametrech. Lze proto psát $\mathbf{l} = \mathbf{l}(\mathbf{p})$, kde $\mathbf{l}(\mathbf{p})$ je zobrazení z prostoru R^s do prostoru R^k . Úlohu ladění lze potom formulovat jako úlohu nalezení vektoru \mathbf{p}^* , pro který

$$\mathbf{l}(\mathbf{p}^*) = \mathbf{l}^*, \quad (1)$$

kde \mathbf{l}^* jsme označili vektor požadovaných hodnot vlastních frekvencí. Dimenze vektoru je k .

Předpokládejme, že zobrazení $\mathbf{l}(\mathbf{p})$ je v okolí startovacího bodu \mathbf{p}_0 diferencovatelné. Zavedeme Jacobiho matici zobrazení $\mathbf{l}(\mathbf{p})$

$$\mathbf{L}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \text{grad}^T l_1(\mathbf{p}_0) \\ \dots \\ \text{grad}^T l_k(\mathbf{p}_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_i}{\partial p_j}(\mathbf{p}_0) \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, k; \\ j = 1, \dots, s. \end{matrix} \quad (2)$$

Jacobiho matici \mathbf{L} označujeme jako matici citlivosti. Je to obecně obdélníková matice typu (k, s) , jejíž prvek v i -tém řádku a j -tém sloupci udává míru změny veličiny l_i při jednotkové změně veličiny p_j . Vyjadřuje tedy citlivost změny i -té laděné veličiny (vlastní frekvence Ω_i) na změnu j -tého ladicího parametru. Jedná se o absolutní citlivost, jež má svůj rozměr vyplývající z rozměrů parametrů modelu.

Větší vypovídací schopnost, umožňující srovnání jednotlivých citlivostí, má tzv. relativní citlivost, tedy citlivost vztahovaná na jednotkovou frekvenci a jednotkový parametr p_j . Označíme-li l_{ij} relativní citlivost změny i -té vlastní frekvence na změnu j -tého parametru, je potom

$$l_{ij} = \frac{\partial \Omega_i}{\partial p_j} \cdot \frac{p_j}{\Omega_i}. \quad (3)$$

3. Ladění jako optimalizační úloha

Uspořádáme-li (vybrané) laděné veličiny do vektoru naladění $\mathbf{l} = [l_i]_{i=1}^k$, (vybrané) ladicí parametry do vektoru $\mathbf{p} = [p_i]_{i=1}^s$ a požadavky do vektoru $\mathbf{l}^* = [l_i^*]_{i=1}^k$, lze úlohu ladění popsat k -kriteriální cílovou funkcí tvaru

$$y(p) = \sum_{i=1}^k g_i \left[1 - \frac{l_i(p)}{l_i^*} \right]^2. \quad (4)$$

Každý ladicí parametr p_i se musí pohybovat v přípustném uzavřeném intervalu $p_i \in \langle p_i^d, p_i^h \rangle$. Čísla p_i^d (dolní závora i -tého ladicího parametru) a p_i^h (horní závora tohoto parametru) jsou volena vhodným způsobem, přičemž startovací bod leží uvnitř této oblasti. Incidence s přípustnou oblastí je popsána celkem $2s$ nerovnicemi

$$p_i^d \leq p_i \leq p_i^h, \quad i = 1, \dots, s. \quad (5)$$

Z definice je vidět, že $y(p) \geq 0$. Pokud by bylo dosaženo všech požadavků, hodnota cílové funkce by byla nulová. Pokud by k -kriteriálnost funkce (4) nebyla pro $k > 1$ vhodná, je možno vybrat nejdůležitější (i_0 -tý) požadavek, jehož splnění optimalizujeme a ostatní zahrneme do nerovnicových omezení. Optimalizační úloha bude mít cílovou funkci

$$y(p) = \left[1 - \frac{l_{i_0}(p)}{l_{i_0}^*} \right]^2. \quad (6)$$

Kromě omezení (5) bude přípustná oblast definována ještě omezeními

$$l_i^d \leq l_i(p) \leq l_i^h, \quad i = 1, \dots, k, \quad i \neq i_0 \quad (7)$$

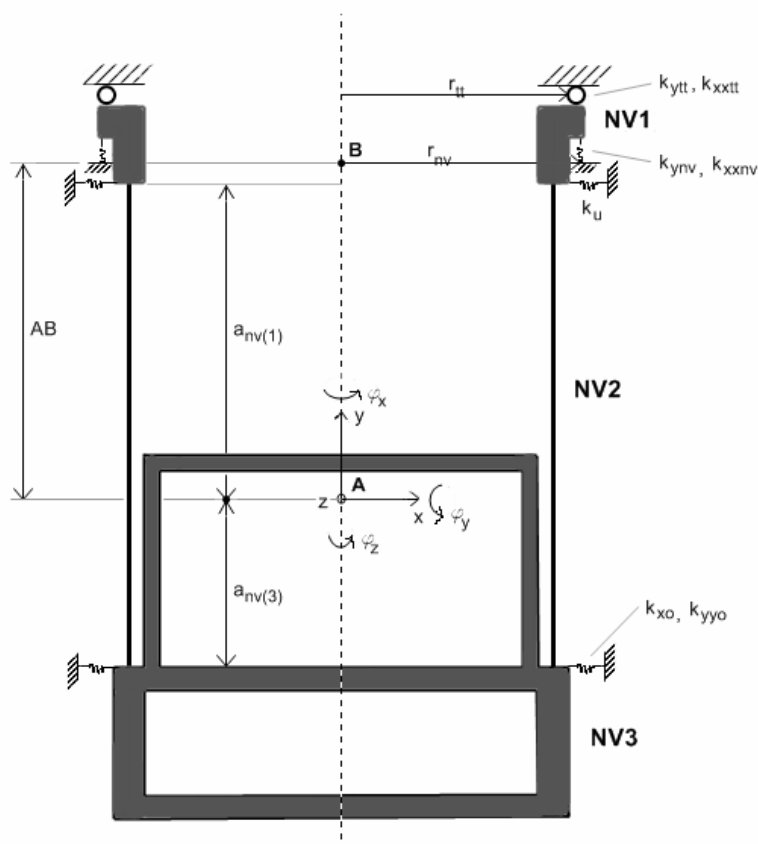
při vhodně definovaných závorách l_i^d a l_i^h .

4. Dynamický model nosného válce reaktoru VVER 1000

Na katedře mechaniky Západočeské univerzity v Plzni byl vyvinut matematický model reaktoru VVER 1000 instalovaného v elektrárně Temelín. Vývoj metodiky, která byla vyvinuta k modelování kmitání reaktoru a jeho jednotlivých komponent, dokumentuje práce Zeman & Hlaváč (2006). Reaktor je zde dekomponován na 8 subsystémů, kterými jsou tlaková nádoba, nosný válec s aktivní zónou a palivovými soubory, blok ochranných trub, nosná konstrukce horního bloku, pouzdra pohonů, blok elektromagnetů a soustava vlastních pohonů. Každý subsystém je modelován ve vhodně vybraném konfiguračním prostoru některého z dalších subsystémů a tuhosti vzájemných vazeb jsou diskretizovány translačními nebo rotačními tuhostmi.

Nosný válec (NV) je modelován v konfiguračním prostoru tlakové nádoby (TN). Jeho model je tvořen dvěma tuhými tělesy (NV1 a NV3), která jsou spojena jednorozměrným kontinuem nosníkového typu (NV2). Tělesu NV1 jsou zamezeny relativní příčné posuvy v místě zavěšení na přírubu tlakové nádoby a relativní natočení kolem osy reaktoru vzhledem k tlakové nádobě. NV1 se vůči rámu (tlakové nádobě) tedy může podélně (svisle) posouvat a ohybově natáčet – zobecněné souřadnice y_1, j_{x_1}, j_{z_1} . NV2 je uzlem v polovině délky rozdělena na 2 prvky. Řez v uzlu může vůči rámu (tlakové nádobě) konat obecný prostorový pohyb – zobecněné souřadnice $x_2, y_2, z_2, j_{x_2}, j_{y_2}, j_{z_2}$. NV3 se vůči rámu může pohybovat obecně prostorově – zobecněné souřadnice $x_3, y_3, z_3, j_{x_3}, j_{y_3}, j_{z_3}$. Celkem má model nosného válce 15 stupňů volnosti. Vektor zobecněných souřadnic tělesa nosného válce má tedy následující podobu:

$$q_{NV} = [y_1, j_{x_1}, j_{z_1}, x_2, y_2, z_2, j_{x_2}, j_{y_2}, j_{z_2}, x_3, y_3, z_3, j_{x_3}, j_{y_3}, j_{z_3}]. \quad (8)$$



Obrázek1 Schéma nosného válce

bod A – úroveň uložení TN k rámu (stavební šachta)

bod B – úroveň uložení NV k TN

Geometrické parametry popisující model:

- § $AB = 4,72$ m – vzdálenost bodů A a B
- § $a_{nv(1)} = 4,02$ m – vzdálenost horního uzlu trubky NV2 od horizontální roviny procházející bodem A
- § $a_{nv(3)} = 2,56$ m – vzdálenost spodního uzlu trubky NV2 od horizontální roviny procházející bodem A
- § $r_{nv} = 1,82$ m – vzdálenost středu dotykové plochy horního uložení NV na TN od osy reaktoru
- § $r_{tt} = 1,8$ m – vzdálenost dotykové křivky toroidních trubek s NV od osy reaktoru

Hmotové parametry popisující model:

§ $m_1 = 1,32 \cdot 10^4$ kg – hmotnost NV1

§ $I_1 = 2,69 \cdot 10^4$ kgm² – moment setrvačnosti NV1 k příčné ose procházející těžištěm

§ $m_3 = 7,97 \cdot 10^4$ kg – hmotnost tělesa NV3

§ $I_3 = 2,31 \cdot 10^5$ kgm² – moment setrvačnosti NV3 k příčné ose procházející těžištěm

§ $I_{o,3} = 9,94 \cdot 10^4$ kgm² – moment setrvačnosti NV3 ke svislé ose reaktoru

Tuhostní parametry popisující model:

Tuhostní parametry, kterými jsou osová tuhost ucpávky k_u , osová resp. torzní tuhost spodní opěry NV k_{xo} , resp. k_{xco} , tuhost toroidní trubky při svislém posuvu, resp. při ohybovém posuvu k_{yt} , resp. k_{xct} nebyly v tomto výpočtu uvažovány tak, aby okrajové podmínky byly totožné s těmi, které jsou uvažovány v MKP modelu. Kontaktní resp. ohybová tuhost horního uložení NV na přírubu TN k_{ynv} , resp. k_{xnv} byla zvolena dostatečně vysoká, aby bylo možno uložení NV považovat za opření.

5. Citlivost vlastních frekvencí na změnu diskretních parametrů

Konzervativní matematický model nosného válce je popsán v prostoru zobecněných souřadnic (8) maticovou rovnicí ve známém tvaru

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0}. \quad (9)$$

Konkrétní tvar symetrické, pozitivně definitní matice hmotnosti \mathbf{M} a symetrické matice tuhosti \mathbf{K} vyplývá z kinetické a deformační energie soustavy po dosazení do Lagrangeových rovnic 2.druhu.

Podle Hlaváč & Zeman (2006), platí pro relativní citlivost i -té vlastní frekvence Ω_i modelu na j -tém hmotovém parametru m_j (na kterém nezávisí matice tuhosti) vztah

$$l_{ij} = -\frac{m_j}{2} \mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial m_j} \mathbf{v}_i. \quad (10)$$

V těchto výrazech \mathbf{v}_i je vlastní vektor přiřazený vlastní frekvenci Ω_i znormovaný \mathbf{M} -normou, tedy pro který platí

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{M} \mathbf{v}_i = 1. \quad (11)$$

Ve vztahu (10) hrají dominantní úlohu kvadratické formy v souřadnicích i -tého vlastního vektoru s maticí $\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial m_j}$. Tuto matici lze z matematického modelu snadno vyčíslit. Pro diskretní

hmotové parametry nosného válce pak dostaneme

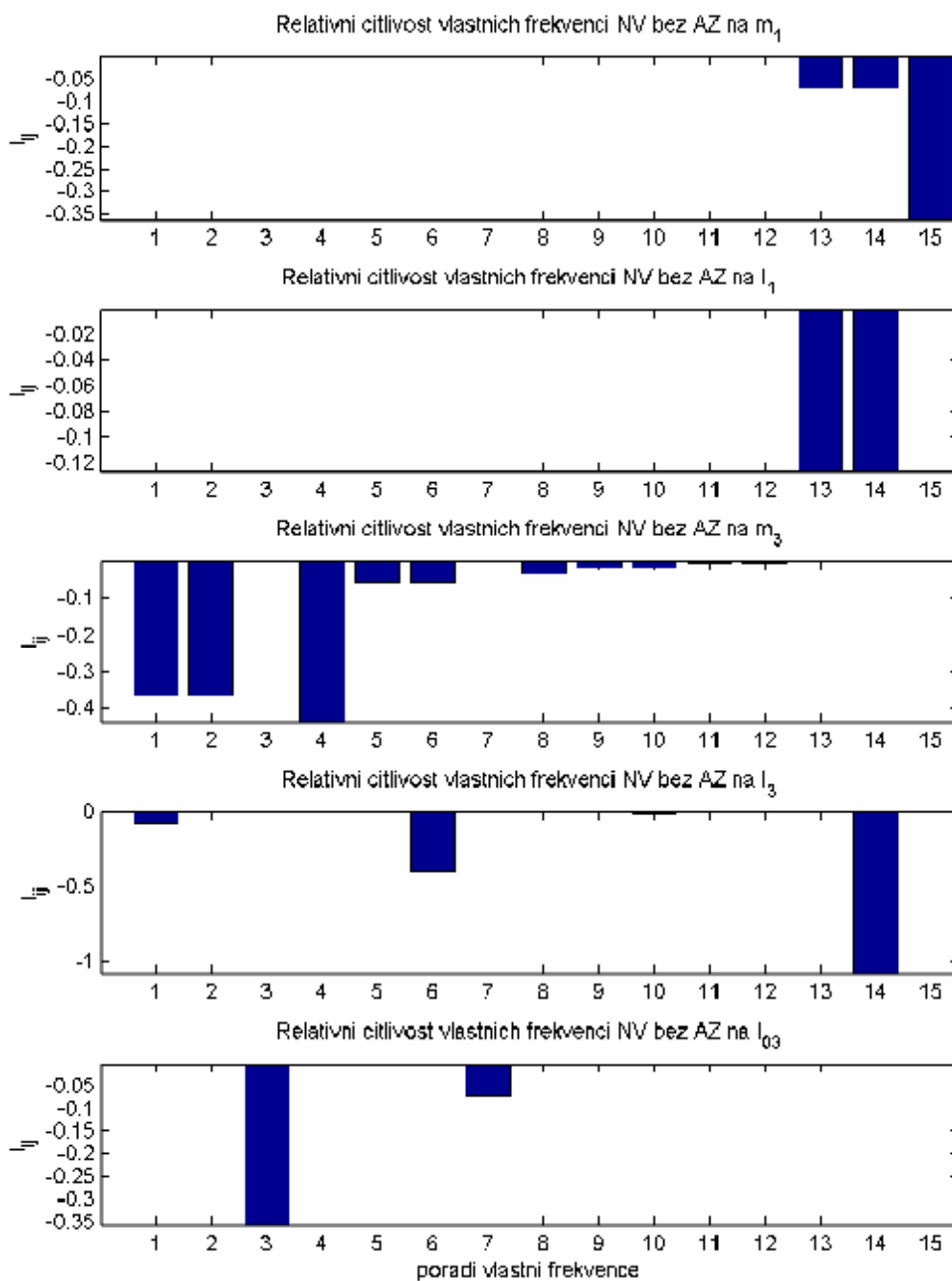
$$\mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial m_1} \mathbf{v}_i = v_{1i}^2 + b_1^2 (v_{2i}^2 + v_{3i}^2), \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial I_1} \mathbf{v}_i = v_{2i}^2 + v_{3i}^2, \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial m_3} \mathbf{v}_i = v_{1i}^2 + v_{10i}^2 + v_{11i}^2 + v_{12i}^2 + b_3^2 (v_{2i}^2 + v_{3i}^2) + 2[v_{1i}v_{11i} + b_3(v_{3i}v_{10i} - v_{2i}v_{12i})], \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial I_3} \mathbf{v}_i = v_{2i}^2 + v_{3i}^2 + v_{13i}^2 + v_{15i}^2 + 2(v_{1i}v_{13i} + v_{5i}v_{15i}), \quad (15)$$

$$\mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial I_{03}} \mathbf{v}_i = v_{14i}^2. \quad (16)$$



Obrázek2 Relativní citlivosti vlastních frekvencí nosného válce na změny hmotových parametrů

Pomocí (11) – (16) byly vyčísleny relativní citlivosti vybraných vlastních frekvencí modelu na výše vybrané hmotové parametry. Pro konkrétní hodnoty parametrů nosného válce reaktoru byly určeny relativní citlivosti všech 15 vlastních frekvencí diskrétního modelu nosného válce na změny výše uvedených parametrů. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny ve formě sloupcových grafů na obr.2.

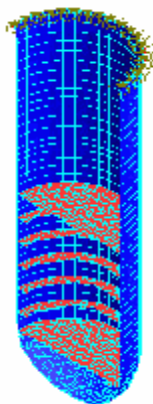
Nutno poznamenat, že vlastní frekvence diskrétního modelu tvoří dvojice odpovídající ohybovým tvarům kmitu vždy v rovině xy (výrazný posuv ve směru x a natočení kolem z) a současně v rovině yz (výrazný posuv ve směru z a natočení kolem x). Citlivosti obou frekvencí dvojice na změnu většiny parametrů musí být stejné. Kromě toho obsahuje spektrum vlastních frekvencí jednoduché hodnoty odpovídající podélným a torzním tvarům kmitu.

6. MKP model nosného válce reaktoru VVER 1000

Na obr.3 je výpočtový model nosného válce, který byl v programu Cosmos/M modelován jako tenkostěnná nádoba. Model obsahuje koš aktivní zóny, do kterého budou později včleněny palivové kazety.

Těleso nosného válce sestává ze 14 segmentů o různých průměrech a tloušťkách stěny. Otvory pro potrubí chladicích smyček, vyskytující se ve dvou oblastech stěny nosného válce, nebyly modelovány. Místo toho byly tloušťky v segmentech, které tyto otvory obsahují, redukovány v poměru povrchu stěny s otvory ku povrchu „plné“ stěny. Tímto zjednodušením, již dříve uplatněným ve výpočtu Markov & Majer (1990), by se ohybově-tuhostní vlastnosti stěny neměly výrazně změnit.

Koš aktivní zóny, jehož celková výška činí 4,07 m, je složen ze dvou vodorovných desek a šesti prstenců. Jejich vnější plášť tvoří kruhový válec o průměru 3,47 m. Vnitřní povrch prstenců je vytvarován tak, aby do koše aktivní zóny bylo možno vložit 163 palivových kazet o vnějším průřezu tvaru pravidelného šestiúhelníku o průměru vepsané kružnice 0,236 m. Pět horních prstenců má výšku 0,705 m, spodní je vysoký 0,545 m. Těchto šest prstenců je navzájem provrtáno a propojeno šesti dutými šrouby (vnější průměr 0,125 m, vnitřní 0,1 m) se závitem v desce M 76. 12 šroubů, kterými je spodní prstenec přitažen ke spodní desce koše aktivní zóny, nebylo modelováno. Tloušťka horní a spodní desky koše aktivní zóny je 0,1 m. 163 dutých trubek, které propojují spodní desku se dnem nosného válce prozatím rovněž nebylo modelováno. Budou zakomponovány až do modelu nosného válce s aktivní zónou.



Obrázek3 MKP model nosného válce

Nosný válec je zasunut do tlakové nádoby shora ve směru osy y a zavěšen za přírubu. V místě zavěšení, kterým je hranice mezi prvním a druhým segmentem, byl model opřen ve směrech x , y a z v odpovídajících uzlech po obvodu.

Nosný válec reaktoru VVER 1000 je vyroben z oceli 08X18H10T. Ve shodě s předchozími výpočty je průměrná provozní teplota nosného válce uvažována 305 °C. Této teplotě odpovídá hodnota Youngova modulu pružnosti $E = 1,894 \cdot 10^{11}$. Poissonova konstanta ν a hustota ρ prakticky nejsou na teplotě závislé. Materiálové vlastnosti pro modální analýzu jsou uvedeny v tab.1.

Tabulka1 Materiálové vlastnosti

Hustota ρ [kg/m ³]	Youngův modul pružnosti E [Pa]	Poissonova konstanta ν
7850	$1,894 \cdot 10^{11}$	0,3

7. Ladicí proces

V tab.2 jsou zaznamenány hodnoty prvních 8 vlastních frekvencí vypočtených na obou modelech. Tučně jsou vyznačeny ty, podle kterých je vhodný ladicí proces provést (hodnota zjištěná na MKP modelu představuje cílovou funkci). Odpovídají prvnímu tvaru ohybovému, torznímu a podélnému. V tab.3 jsou potom uvedeny relativní citlivosti zmíněných vlastních frekvencí dynamického modelu na relativní změny hmotových parametrů nosného válce.

Tabulka2 Vlastní frekvence nosného válce reaktoru VVER 1000

Dynamický model			MKP model		
Pořadové číslo	Vlastní frekvence f [Hz]	Tvar kmitu	Pořadové číslo	Vlastní frekvence f [Hz]	Tvar kmitu
1	25,84	ohybový	1	15,07	ohybový
2	25,84	ohybový	2	15,07	ohybový
3	69,02	torzní	3	47,51	skořepinový
4	73,14	podélný	4	47,52	skořepinový
5	104,47	ohybový	5	48,07	torzní
6	104,47	ohybový	6	71,92	skořepinový
7	291,93	torzní	7	71,92	skořepinový
8	427,54	podélný	8	72,09	podélný

Tabulka3 Relativní citlivost vlastních frekvencí na změny hmotových parametrů nosného válce reaktoru VVER 1000

Pořadové číslo vl.frekvence	m_1	I_1	m_3	I_3	I_{o3}
1	$-1,1901 \cdot 10^{-11}$	$-2,1180 \cdot 10^{-11}$	$-3,6483 \times 10^{-1}$	$-7,4932 \cdot 10^{-2}$	$-2,4663 \cdot 10^{-24}$
2	$-1,1901 \cdot 10^{-11}$	$-2,1180 \cdot 10^{-11}$	$-3,6483 \times 10^{-1}$	$-1,9349 \cdot 10^{-6}$	$-4,4523 \cdot 10^{-24}$
3	$-1,7087 \cdot 10^{-31}$	$-2,1379 \cdot 10^{-33}$	$-2,8553 \cdot 10^{-21}$	$6,6924 \cdot 10^{-23}$	$-3,5740 \times 10^{-1}$
4	$-3,0493 \cdot 10^{-11}$	$-2,6731 \cdot 10^{-33}$	$-4,3464 \times 10^{-1}$	$8,1098 \cdot 10^{-12}$	$-2,3254 \cdot 10^{-21}$

Tučně zvýrazněné citlivosti naznačují, kterými hmotovými parametry je vhodné ladění dominantních vlastních frekvencí uskutečnit, aby proces mohl být efektivní. Z uvedeného vyplývá, že hodnota frekvence prvního torzního kmitu je nejvíce ovlivněna změnami momentu setrvačnosti ke svislé ose reaktoru I_{o3} . Podobně je možné tvrdit, že hodnoty frekvence prvního ohybového a prvního podélného kmitu citlivě reagují na relativní změny hmotnosti m_3 (dno NV + plášť aktivní zóny).

Proveďme nejprve tedy ladění třetí vlastní frekvence, která odpovídá torzního kmitu. Laděním parametrem je v tomto případě I_{o3} . Naladěním této frekvence na požadovanou hodnotu dostáváme změnu hodnoty I_{o3} z $9,94 \cdot 10^4 \text{ kgm}^2$ na hodnotu $1,84 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$, což představuje relativní změnu $\Delta I_{o3} = 0,849$.

Dále je možné ladit hmotností m_3 , čímž změníme hodnoty frekvencí jak ohybového tak podélného tvaru kmitu. Chceme-li ladit podle vlastní frekvence podélného tvaru kmitu, dosáhneme změny hmotnosti m_3 z $7,97 \cdot 10^4 \text{ kg}$ na $8,23 \cdot 10^4 \text{ kg}$. Zde se jedná o relativní změnu $\Delta m_3 = 0,033$. Naproti tomu, pokud budeme chtít ladit hmotností m_3 frekvenci ohybového tvaru kmitu, bude třeba uskutečnit relativní změnu $\Delta m_3 = 1,142$, která se rovná nárůstu z $7,97 \cdot 10^4 \text{ kg}$ na $1,71 \cdot 10^5 \text{ kg}$.

8. Závěr

Příspěvek je úvodem do výzkumu, jehož cílem má být začlenění modelu nosného válce s aktivní zónou a palivovými kazetami do dynamického modelu reaktoru VVER 1000. Popisovaný ladicí proces ukázal, že dosažení hodnot vybraných vlastních frekvencí MKP modelu spektrálním laděním je možné pouze výraznými změnami hmotových parametrů. Proto se zdá být vhodnější provést nejprve korekci vybraných geometrických parametrů a až poté uskutečnit spektrální ladění.

Po přeladění modelu nosného válce bude včleněna vnitřní vestavba aktivní zóny. MKP model bude doplněn o palivové kazety a reálné okrajové podmínky. Vzniklý jednoduchý dynamický model bude aplikací metody identifikace parametrů frekvenčně naladěný na frekvence dominantních vlastních tvarů MKP modelu prostřednictvím podstatně rozšířeného výběru ladicích parametrů (o tuhosti a geometrické parametry).

9. Poděkování

Práce byla podpořena výzkumným záměrem MSM 4977751303 MŠMT České republiky.

10. Literatura

Hlaváč, Z., (1995) *Dynamická syntéza a optimalizace*. Skriptum. Vydavatelství ZČU, Plzeň.

Markov, P.& Majer, J., (1990) *Tvorba výpočtových modelů a výpočet frekvenčně modálních charakteristik hlavních komponent reaktorového zařízení VVER 1000*. Výzkumná zpráva Škoda ZES, Plzeň.

Zeman, V. & Hlaváč, Z., (2006) Modelování kmitání reaktoru VVER 1000 metodou dekompozice, *Engineering Mechanics National Conference with International Participation, Svratka, Czech Republic*, 2006.