Analýza rozhraní mezi oblastmi s lineárním a nelineárním kmitáním palivových proutků

Štěpán Dyk[1]

1 Úvod

Z hlediska mechaniky jsou palivové proutky (PP) tvořeny dvěma subsystémy; prvním z nich je dlouhá tenkostěnná zirkoniová trubička, tzv. *pokrytí PP* (P), a druhým sloupec palivových tablet (T) tvořený tzv. peletkami UO_2, který je umístěn uvnitř pokrytí a v němž probíhá řízená štěpná reakce. Mezi těmito subsystémy je radiální vůle, která se v průběhu kampaně reaktoru zmenšuje a díky níž dochází po rozkmitání PP tlakovými pulsacemi chladiva k potenciálním rázovým interakcím mezi pokrytím PP a sloupcem palivových tablet. Vzhledem ke zvýšenému namáhání a opotřebení součástí při rázovém kmitání je účelné analyzovat rozhraní mezi provozními stavy s rázovým (nelineárním) chováním a stavy s lineárním kmitáním.

2 Matematický model a výsledky numerických simulací

Oba subsystémy jsou nosníkového typu a pro jejich popis lze s výhodou užít modelování metodou konečných prvků pro jednorozměrná příčně nestlačitelná kontinua vyhovující předpokladům Eulerovy-Bernoulliovy teorie [Byrtus (2010)] při uvažování čtyř stupňů volnosti v každém uzlu (laterální výchylky a příslušná natočení). Tlakové pulsace chladiva představují kinematické buzení, přičemž pohyb odpovídajících komponent lze určit za použití globálního modelu reaktoru [Zeman a Hlaváč (2008)]. Zavedeme-li vektory zobecněných souřadnic $\boldsymbol{q}_F^{(X)} \in \mathbb{R}^{n_X}$, $X = P, T$, odpovídající volným (tj. nevetknutým) uzlům, globální matematický model systému lze formulovat ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_F^{(P)} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}_F^{(T)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}}_F^{(P)} \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_F^{(T)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_F^{(P)} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{B}_F^{(T)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{q}}_F^{(P)} \\ \dot{\boldsymbol{q}}_F^{(T)} \end{bmatrix} + \\ + \left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_F^{(P)} + \boldsymbol{K}_C & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_F^{(T)} \end{bmatrix} + \boldsymbol{K}_F \right) \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_F^{(P)} \\ \boldsymbol{q}_F^{(T)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_L^{(P)}(t) \\ \boldsymbol{f}_L^{(T)}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{DM}(t) \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{f}_{NS}}, \quad (1)$$

kde $\boldsymbol{Y}_F^{(X)} \in \mathbb{R}^{n_X, n_X}, \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{M}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{K}, X = P, T$, jsou po řadě matice hmotnosti, tlumení a tuhosti subsystémů pokrytí a sloupce palivových tablet a kde $n_X, X = P, T$ je počet stupňů volnosti daného subsystému. Vektory pravé strany představují po řadě kinematické buzení pohybem dolní upínací desky $\boldsymbol{f}_L^{(X)}(t) \in \mathbb{R}^{n_X}, X = P, T$ a pohybem obklopujících buněk distančních mřížek $\boldsymbol{f}_{DM}(t) \in \mathbb{R}^{n_P}$, které tvoří vektor kinematického buzení pohybem nosného skeletu $\boldsymbol{f}_{NS}$. Dále uváděné analýzy jsou prováděny v závislosti na frekvenci buzení f a na tuhosti buněk distančních mřížek k_g při uvážení různých radiálních vůlí $\delta_i = \delta, i = 1, 2, \ldots 15$ mezi P a T.

[1] student doktorského studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Aplikovaná mechanika, e-mail: sdyk@ntis.zcu.cz

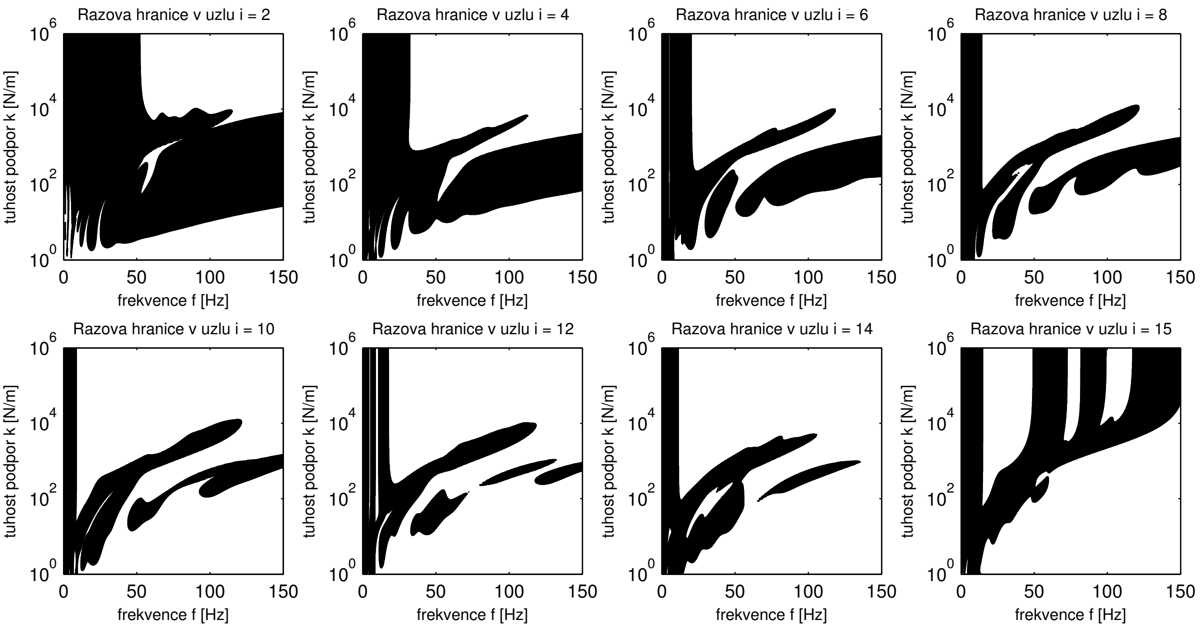
Pro potřeby identifikace oblastí s lineárním chováním je nutné analyzovat relativní amplitudy $e_i(t)$ mezi P a T ve všech uzlech i. Následně lze pomocí lineárního modelu (1) určit hledané množiny na základě srovnání maxim $\hat{e}_i = \max_t e_i(t)$ relativních amplitud s vůlemi δ_i jako

$$\mathcal{M}_i^{(-)} = \left\{k_g \in \mathbb{R}^+, \omega \in \mathbb{R}^+ : \hat{e}_i(\omega, k_g) < \delta\right\}, \quad i = 1, \ldots 15, \quad g = 1, \ldots 8, \tag{2}$$

$$\mathcal{M}_i^{(+)} = \left\{k_g \in \mathbb{R}^+, \omega \in \mathbb{R}^+ : \hat{e}_i(\omega, k_g) \geq \delta\right\}, \quad i = 1, \ldots 15, \quad g = 1, \ldots 8. \tag{3}$$

Obr. 1 ukazuje příklad výsledných množin v sudých uzlech. Za oblasti s výskytem rázového kmitání lze pak považovat ty oblasti, v nichž je identifikován kontakt alespoň v jednom uzlu, tj.

$$\mathcal{M}^{(+)} = \bigcup_{i=1}^{15} \mathcal{M}_i^{(+)}, \quad \mathcal{M}^{(-)} = \mathcal{M} \setminus \mathcal{M}^{(+)}. \tag{4}$$



Obrázek 1: Oblasti lineárního (bíle) a nelineárního rázového (černě) kmitání v uzlech podepřených distančními mřížkami při uvažování radiální vůle $\delta_i = \delta = 65$ [μm] $\forall i = 1, 2, \ldots 15$

3 Závěr

Uvedená analýza umožňuje rozlišit oblasti lineárního a rázového nelineárního kmitání v závislosti na provozních a konstrukčních parametrech, a poskytuje tedy nástroj k identifikaci oblastí s potenciálně vyšším dynamickým namáháním a s větším poškozujícím účinkem vibrací.

Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen grantem SGS-2016-038.

Literatura

Byrtus, M., Hajžman, M. a Zeman, V., 2010. *Dynamika rotujících soustav*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.

Zeman, V., Hlaváč, Z., 2008: Dynamic response of VVER 1000 type reactor excited by pressure pulsations. *Engineering mechanics 15(6), 2008.*