

OPONENTNÍ POSUDEK

disertační práce Ing. Štěpána Dyka

KMITÁNÍ KOMPONENT JADERNÉHO PALIVOVÉHO SOUBORU S RÁZOVÝMI ÚČINKY

Oponent: Ing. Ladislav Pečínka, CSc. ÚJV Řež a.s.

Oponovanou práci tvoří 101 stran základního textu, 6 stran obrazových příloh, seznam vstupních parametrů a rozsáhlý seznam publikací v impaktovaných časopisech včetně seznamu výzkumných zpráv.

Práce se zabývá mechanickým chováním palivových souborů TVSA-T provozovaných v reaktorech VVER 1000/320 prvního a druhého bloku JE Temelín. Obecným cílem disertace je rozbor faktorů majících vliv na bezpečnost palivového souboru při provozu tj.

-rozbor otěru Zr pokrytí ve všech osmi mřížkách s uvážením vlivu polohy mřížky

-rázů systému tabletky-Zr pokrytí v průběhu vyhořívání

-chování vodících trubek

-vlivu příčného proudu ve spodní části PS

přičemž základem všeho bylo vypracování matematického modelu palivového souboru.

Stejnými problémy se zabývají všichni výrobci jaderného paliva a renomované výzkumné ústavy např. Korean Atomic Energy Research Institute. Nutno ale konstatovat, že většina těchto prací má spíše experimentální charakter, zatímco disertant se zaměřil na teoretickou stránku problému. Vytčené problematice odpovídá i skladba disertace. Jedna kapitola je zaměřena na popis konstrukce palivového souboru včetně vstupních parametrů pro následující výpočty. Ty byly odsouhlaseny provozovatelem paliva.

Zbývající kapitoly popisují použité metody řešení tj.

-matematické metody rázu a metody řešení nehladkých soustav

-matematický model palivového souboru

-matematický model kmitání palivových proutků s uvažováním interakce mezi Zr pokrytím a sloupcem palivových tabletek.

Konkrétní výsledky práce z hlediska aplikace na JE Temelín lze formulovat takto:

- otěr palivových proutků, což zahrnuje síly přenášené buňkami a práci třecích sil

-velikost tzv. hodinového otěru jako funkce polohy mřížky, radiální vůle mezi Zr pokrytím a tabletkami, přepínací síly buněk v distanční mřížce a osově síle fixátoru

-mapy rázových rozhraní, které v závislosti na budící frekvenci a pro dané provozní podmínky oddělují oblasti, kdy je systém lineární od oblasti, kdy dochází k rázům. Důležitý je závěr studie, že aby v daném buzení a zvolené vůli nedocházelo k rázům mezi subsystemy, tableta Zr pokrytí by musela být vůle podstatně vyšší než v reálném palivovém proutku. Naopak pokud by nemělo při konstrukčně dané vůli docházet k rázům, pak by buzení muselo být podstatně nižší

-bifurkační analýzy kmitání palivového proutku, který je modelován jako nelineární systém a jako bifurkační parametry byly zvoleny vůle mezi sloupcem tablet a Zr pokrytím.

-tuhost buněk distančních mřížek budící frekvence tlakových pulsací generovaných HCČ.

Pro všechny tři případy byly sestrojeny bifurkační diagramy, které vymezily oblasti chaotického pohybu. Dosažené výsledky jsou zajímavé z hlediska možné interpretace "nevýsledků" měření vibrací PS pomocí SPN detektorů.

-vytvoření modelu palivového proutku s uvažováním tření v kontaktních bodech. Koeficient tření je aproximován jako funkce skluzové rychlosti Zr pokrytí vůči buňce. Pro předem nadefinované provozní stavy byly jako funkce času vypočteny skluzové rychlosti, které prokázaly ulpívání normálové síly, rázové síly mezi sloupcem palivových tablet a Zr pokrytím.

Možno konstatovat, že všechna popsaná řešení včetně výsledků jsou původní a není mě známo, že existují zahraniční analogy.

Předložená práce má logický sled kapitol, formální úpravu nutno pochválit. Použitá čeština je gramaticky nezávadná a slohově perfektní.

Je uvedeno celkem 22 publikací se spoluautory, které byly předneseny na renomovaných konferencích a otištěny ve většině případů v impaktovaných časopisech. Citovaných osm výzkumných zpráv bylo vypracováno pro potřeby jaderného a automobilového průmyslu.

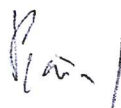
Vyjádření k obhajobě disertační práce:

Oponovaná práce řeší důležité problémy jaderného paliva TVSA-T a dosažené výsledky lze označit jako unikátní. Je známo, že výrobce paliva firma OKBM Nižnij Novgorod nic takového nepublikovala. Z těchto důvodů

doporučuji

předloženou disertační práci i obhajobě.

V Řeži 19. 07. 2017



Ing. L. Pečínka, CSc.

pracovník vědy a výzkumu ÚJV Řež a.s.

Posudek disertační práce

Ing. Štěpán Dyk: Kmitání komponent jaderného palivového souboru s rázovými účinky.

Práce o rozsahu 115 stran byla vypracována na Fakultě aplikovaných věd ZČU v Plzni. Po úvodu je úžeji specifikováno zaměření na palivový soubor reaktoru VVER 1000, uveden přehled současného stavu řešené problematiky a v 10 bodech jsou blíže definovány cíle disertační práce.

V druhé kapitole je uvedeno několik typů matematických modelů rázů pevných těles a stručně naznačené řešení soustav s vysokým počtem nelinearit. Třetí kapitola je věnována podrobnějšímu odvození metody konečných prvků, která je dále použita pro matematické modelování dynamických vlastností jednorozměrných kontinuí. Tyto „konečné prvky“ jsou dosti dlouhé a proto jejich deformace jsou modelovány kubickými polynomy. Osová stlačitelnost se zde neuvažuje.

Komponenty palivového souboru jsou popsány v kapitole 4. Při popisu distančních mřížek autor zavádí pojem *buňka* bez jakéhokoliv vysvětlení. Doporučuji doplnit při obhajobě.

Další kapitola 5 je věnována odvození matematického modelu vodících trubek a výpočtu jejich kmitání i vzpěrné stability. Bohužel je zde použito jiné označení základních os – podélná osa je označena z na rozdíl od předešlých kapitol, kde podélná osa je x . Navíc je zde použit opět pojem *buňka distanční mřížky* nijak blíže nedefinovaný, bez popisu struktury buňky a její funkce. Tento pojem se v dalším textu mnohokrát opakuje a koliduje i s popisem distančních mřížek s kruhovými otvory. Grafické znázornění, např. na obr. 5.1 i další popis naznačuje, že autor pro výpočet nahradil kruhové otvory v distančních mřížkách šestiúhelníkovými (resp. někdy trojúhelníkovými) otvory u nichž dochází k dotyku s vodícími trubkami jen ve středech rovinných úseků.

Do tohoto matematického modelu jsou zavedeny budící účinky pohybu dolní a horní upínací desky vybuzeného tlakovými pulzacemi hlavních cirkulačních čerpadel. Dále jsou v místech kontaktu vodící tyče s distančními mřížkami modelovány rázy a třecí síly a to jak tečnou tak axiální složkou. Do pohybových rovnic jsou symbolicky zavedeny vektory kinematického buzení pohybem upínacích desek (str. 34). V místech dotyku vodící tyče s distanční mřížkou zavádí autor - opět symbolicky - radiální a tangenciální tuhosti buňky a třecí sílu s tečnou a axiální složkou, za předpokladu vysoké axiální tuhosti skeletu a pohybu upínací desky jako tuhého tělesa.

Ustálené kmitání tohoto odvozeného, velmi složitého (více než 100 DOF) nelineárního, matematického modelu vodící tyče je řešeno numericky metodou Runge-Kutta v systému MATLAB v časovém intervalu $t \in \langle 0, 0.4 \rangle s$ a na obr. 5.5 až 5.8 jsou uvedeny některé grafické výsledky. Vstupní číselné hodnoty systému jsou uvedeny v příloze B, číselná velikost buzení od pohybu upínací desky však není bohužel nikde uvedena. Protože u nelineárních soustav jsou odezvy vždy silně závislé na velikosti buzení, charakterizují presentované výsledky výpočtu jen jeden částečně definovaný případ.

V šesté kapitole je sestaven matematický model kmitání palivových proutků. Postup řešení je obdobný postupu použitého u vodících tyčí (MKP), ovšem vzhledem k strukturní složitosti palivových proutků (dva subsystémy: PP, C) jsou analyzovány postupně komplexnější modely. Kinematické buzení ve formě tří harmonických je pouze od dolní upínací desky (velikosti opět číselně nedefinované) a dále také od proudícího chladiwa. Mezi sloupcem palivových tablet a zirkoniovém pokrytím je vůle, pokrytí je pružně uloženo v distančních mřížkách vždy ve třech místech (buňkách). Na základě řešení takto sestavených pohybových rovnic je stanoven výkon třecích sil a ořez palivových proutků. Výsledky numerického výpočtu jsou shrnuty do grafických diagramů.

V podkapitole 6.1.3 věnované vyhodnocení vlivu parametrů na ořez PP postrádám při popisu obr. 6.6 a 6.7 vysvětlení výrazně menšího opotřebení buňky 3. V podkapitole 6.1.4 je použita metoda linearizace, která dle závěrů na str. 69 nevedla k žádoucímu výsledku. Dovoluji si poznamenat, že metoda ekvivalentní linearizace používaná v teorii nelineárního kmitání dává dobré výsledky, ovšem vždy jen pro jednoznačně zadaný systém, u něhož linearizace každého nelineárního prvku závisí na amplitudě kmitání tohoto prvku. Zcela universální náhradní linearizovaný model s pevnými parametry neexistuje.

Zajímavé výsledky jsou obsaženy také v podkapitole 6.1.5. Při určování rázových rozhraní mezi palivovým sloupcem a pokrytím je uvažován dokonale tuhý nosný skelet. Parametry jeho budícího pohybu nejsou uvedeny, ale diagramy na obr. 6.15 a 6.16 dávají nový podrobnější pohled na chování palivového proutku. Velmi podrobně jsou propočítány a graficky znázorněny bifurkační jevy a to v závislosti na změně vůlí δ , na tuhosti buněk k_g nebo na budící frekvenci f .

Jako další zpřesnění matematického modelu je uvažováno tření v kontaktech a to na obou stranách pokrytí. Výsledky numerického výpočtu (opět bez udání velikosti budících sil) jsou shrnuty do obr. 6.26 až 6.30. Skluzové rychlosti vykreslené na obr. 6.26 mají stále kladnou hodnotu, takže výsledná relativní posunutí v těchto kontaktech s časem by stále rostla, což třeba opravit. Obr. 6.29 již záporné rychlosti obsahuje. Pro tento zpřesněný výpočtový model jsou vypočteny hodinové ořezy pokrytí a porovnány s dřívějšími hodnotami.

Kapitola 6.3 je zaměřena na dynamické chování PP rozkmitávaného proudícím chladivem a to jak za předpokladu laminárního, tak vírového proudění. Je ukázáno, že tento typ buzení má řádově menší vliv než buzení od cirkulačních čerpadel.

V závěru práce uchazeč shrnuje dosažené poznatky, naznačuje další rozvoj řešené problematiky a definuje hlavní přínosy práce. S uvedenými závěry lze v plném rozsahu souhlasit.

Menší poznámky:

- 1) Str. 8, Kolize v označení: t - čas, t - tečná složka,
 l - délka, l - index buňky.
- 2) Str. 26² Doporučuji: .. vyjadřuje *ohybové* změkčení ... Je předpokládána absolutní tuhost v osovém směru.
- 3) Rovn. (3,38) Prvek 1,4 v matici P má být 0.
- 4) Str. 32, Rozpor ve značení: V rov. (5.2) jsou úhly φ, ϑ, ψ a na obr. 5.1 Φ, Ψ, U .
- 5) 34₁₃ Projevuje se tuhost resp. poddajnost skeletu na vazbě mezi dolní a horní upínací deskou?
- 6) Záznamy na obr. 5.5 neprokazují, že čas 0.4 s stačí na ustálený stav kmitání (str.39).
- 7) Obr. 5.10, Chybí popis vnitřních křivek.
- 8) Rov. (6.15): nejasný význam zápisu $\dots 4(i-1)+1$
- 9) 52₃ Jak jsou určeny velikosti harmonických složek od 4 čerpadel?
- 10) 71⁵ Platí zde uvedené numerické hodnoty i pro ostatní příklady?
- 11) 81, rov. (6.70) Třeba vysvětlit fyzikální význam pojmu „tečné a axiální tuhosti buněk“, též s ohledem na možnou náhradu kruhového otvoru n-úhelníkem. Proč se má blížit nule?
- 12) 92 Podle obr. 6.33 má být v rov. 6.86 místo α úhel β .

Celkové zhodnocení

- a) Disertační práce dále rozšiřuje poznatky o dynamickém chování důležitého elementu jaderných elektráren a vytváří důležité metodické podklady pro další zpřesňování matematického modelování podobných složitých silně nelineárních systémů.
- b) Zvolený postup řešení založený na postupném zdokonalování výpočetního modelu považuji za správný. Analytické metody vycházející z vhodných zjednodušujících předpokladů – např. náhrada dotyku tyčí s omezeným počtem bodů v distančních mřížkách – se ukázaly jako velmi účelné a umožnily splnit vytčené cíle.
- c) Výsledky disertační práce vidím především ve vypracování metodiky řešení složitých systémů a dále i v objasnění jevů probíhajících v jaderných reaktorech.
- d) Systematika, přehlednost, formální úprava i jazyková úroveň je dobrá a odpovídá stránkovému rozsahu práce. Přehlednost výkladu by se ovšem zlepšila při rozšíření rozsahu.
- e) Počet i kvalita publikací uchazeče je odpovídající.
- f) Disertační práci doporučuji k obhajobě.

V Praze, 11. září 2017



Ing. Ladislav Půst, DrSc.

