

INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005 NÁRODNÍ KONFERENCE s mezinárodní účastí Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

""THE CONTRIBUTION TO THE HIGH-ENERGY PIPING """WHIP LIMITER PROPERTIES OPTIMIZATION

I. Sedlák^{*}, H. Konečná

Summary: The aim of this contribution is comparing the results of the solution of steam piping response to the guillotine rupture at the variation of some parameters of the selected Skoda type axial whip limiter, using discrete absorbtion elements with viscoplastic deformation characteristics. The limiter has been installed in the high-energy steam piping system of the secondary circuit of a VVER type nuclear power plant.

1. Aktuální problémy dynamiky potrubních systémů

Rozsáhlé systémy potrubí středního a velkého průměru představují velmi důležitý subsystém provozního technologického zařízení výrobních jednotek v oboru průmyslové chemie, hutnictví a energetiky. Přepravovaná média (chemikálie, nafta, plyn, pára) jsou zpravidla potenciálně nebezpečná, jejich únik představuje velké riziko pro okolí a krátkodobé i dlouhodobé poškození životního prostředí. Provozní bezpečnost a spolehlivost potrubních systémů představuje zásadní podmínku pro provozní bezpečnost a spolehlivost výrobní jednotky jako celku. Statistiky poruch a havárií výrobních jednotek v uvedených oborech jednoznačně prokazují, že příčinou většiny problémů jsou právě mechanické závady na potrubí. Zpravidla jde o komplexní problémy zasahující kromě všech oblastí mechaniky i do speciálních oblastí zdánlivě vzdálených oborů. Jejich řešení vyžaduje vesměs interdisciplinární přístup, aplikaci vybraného souboru poznatků nejen z mechaniky těles, termomechaniky, hydromechaniky, nauky o materiálu, ale např. i z geotechniky, fyziky, fyzikální chemie a matematické statistiky.

Rozsáhlý okruh problémů vyskytujících se u potrubních systémů je odvozován od různých případů kmitání potrubí. Potrubní systémy (často včetně integrovaných úložných konstrukcí) představují zpravidla velmi poddajné konstrukce, náchylné ke kmitání. Kmitání může být buzeno jak vnitřně - časově proměnným tlakem pracovního média, tak vnějším časově proměnným zatížením. V případě výskytu kmitání v důsledku vnitřního buzení v provozu je odpovídající degradace spolehlivosti potrubního systému zpravidla rozložena do delšího časového období, ve kterém lze připravit a realizovat vhodná nápravná opatření vedoucí k normalizaci provozních podmínek.

^{*} Ing. Ivan Sedlák, Ph.D., Ing. Hana Konečná, Ph.D. : Katedra mechaniky a částí strojů, Univerzita obrany Brno, Kounicova 65, tel.: +420.973 443 681, e-mail: <u>Ivan.Sedlak@unob.cz</u>; <u>Hana.Konecna2@unob.cz</u>

K významným zdrojům vnějšího buzení potrubních systémů patří především technická i přirozená seizmicita vedoucí ke kmitání základových kotevních a nosných konstrukcí potrubí. Buzení potrubí z hlediska dynamiky je charakterizováno jako buzení kinematické.

Kmitání vlivem technické seizmicity odvozené od dlouhodobě probíhajících stacionárních dynamických procesů v okolí základů úložných konstrukcí potrubního systému není zpravidla intenzivní a když, tak v zásadě jde o teoreticky vždy, prakticky už hůře kontrolovatelný problém. Návrhové výpočty potrubí vycházejí ze specifikací provozního prostředí, nebo ze zkušeností. Dynamické odezvy potrubního systému se zde posuzují především se zřetelem na mezní stav vysokocyklové únavy. Krátkodobé kmitání potrubí způsobené mimořádnými událostmi (např. pád břemene z jeřábu, odstřel v blízkosti základů nosné konstrukce, havárie části nosné konstrukce) může být často velmi intenzivní. Podle statistik je výskyt těchto jevů se závažnými následky výjimečný.

Odezva potrubního systému na pohyb úložných konstrukcí, resp. jejich základů při zemětřesné události má v podstatě charakter krátkodobého kmitání s vysokou intenzitou. Se zřetelem k velkým odezvovým výchylkám a deformacím potrubí mohou být následky velmi závažné. Katastrofický scénář musí dokonce počítat s možností náhlého totálního porušení potrubí křehkým lomem s následným výtokem provozního média a s řetězcem mimořádných následků pro potrubní systém i okolí prostředí. Stupeň závažnosti následků v obecné rovině vyplývá z charakteru výrobního oboru, resp. pracovního média v potrubí.

V souvislosti s přehodnocováním bezpečnosti jaderných elektráren typu VVER v České republice (a ve Slovenské republice) jsou realizována technická opatření zaměřená na zvýšení seizmické odolnosti konstrukcí a zařízení pro jaderné elektrárny Temelín, Dukovany, Mochovce a Jaslovské Bohunice V2. Kritickou konstrukcí je potrubní systém sekundárního okruhu.

Z uvedeného je zřejmé, proč se řešení odezvy potrubního systému na lom potrubí v jaderné energetice stalo problémem dynamiky s aktuálně nejvyšší prioritou.

Základní vstupní informací pro řešení odezvy potrubního systému na zatížení při výtoku média je postulace místa a mechanizmu porušení potrubí (viz publikace American nuclear society: Design basis for protection of light water nuclear power plants against the effects of postulated pipe rupture.). K dílčímu nebo úplnému lomu potrubí dojde v zásadě náhodně v náhodném místě. Předpokládá se, že rozhodujícími faktory pro vznik lomu jsou jisté vysoké úrovně intenzity napětí a únavového poškození v místě lomu. Potenciálními místy lomu jsou proto svarové spoje potrubí v oblastech pevných kotev, podpěr, průchodek, přechodových kusů, tvarových kusů, armatur, atd. To znamená, že místo lomu lze postulovat především na základě podrobného řešení polí napjatosti potrubí pro předpokládané spektrum provozního a seizmického zatížení.

Popis mechanizmu porušení potrubí a konfigurace poruchy (trhlina, podélný lom, obvodový lom) je výsledkem nesmírně náročných teoretických a experimentálních studií. Pro projekční a konstrukční praxi má tedy prioritu řešení těch dynamických problémů potrubních systémů, které souvisejí s náhlým a totálním porušením integrity potrubí. K tomuto jevu může dojít s velkou pravděpodobností vlivem seizmického zatížení.

Kritický stav potrubních systémů se zřetelem k bezpečnosti jaderných elektráren typu VVER při seizmické události je charakterizován úplným obvodovým lomem (vžil se termín "gilotinový" lom) vysokoenergetického potrubí s následným nekontrolovaným pohybem

oddělených konců, tzv. švihem potrubí. K tomuto pohybu dochází při úplném obvodovém lomu účinkem sil vznikajících při výtoku pracovního média plným průřezem potrubí. Tyto síly (hybnostní a tlakové složky) se určují obecně kombinovaným hydrodynamickým a termodynamickým výpočtem. Zpravidla lze výsledné budicí síly švihu vyjádřit jako funkce času a přemístění koncových průřezů oddělených částí potrubí.

Síly vznikající při výtoku pracovního média jsou orientovány vzhledem k ose potrubí. Vzhledem k velkým hodnotám přemístění koncových průřezů tvoří síly časově a prostorově proměnnou soustavu sil. Potrubní systém je obecně prostorově konfigurován a úložné konstrukce jsou poddajné. Dynamická odezva potrubí je proto charakterizována jako prostorový kmitavý pohyb s velkými přemístěními.

Při řešení se uvažují dvě fáze odezvy. První fázi počínající oddělením částí porušeného potrubí je nutno řešit jako krátkodobý nestacionární dynamický proces. Ten je způsobený intenzivním zatížením časově a prostorově proměnnými silami. Druhá fáze začíná okamžikem uklidnění. Výtok média je ustálený a odezvu lze řešit kvazistaticky. Při této úvaze se vychází z toho, že volný švih potrubí se prakticky nepřipouští, tj. že vždy se činí opatření omezující výkmit potrubí v první fázi švihu. Řešení první fáze odezvy (tj. vlastního švihu) potrubí má pro praxi zpravidla rozhodující význam. V průběhu této fáze dochází k maximálnímu zatížení potrubního systému a úložných konstrukcí, včetně konstrukcí omezující švih potrubí. Výsledky výpočtů jsou proto podkladem pro návrh konstrukce omezující švih potrubí.

V uvažovaném případě vysokoenergetického potrubního systému sekundárního okruhu jaderné elektrárny typu VVER vedou potrubí napájecí vody pro parogenerátory a páry z parogenerátorů do strojovny souběžně v nedostatečné vzájemné vzdálenosti přes kontejnment a mezistrojovnu. Postulované porušení lomem jednoho z potrubí s následným švihem s jistotou přivodí havárii druhého potrubí resp. poškození bohatě instrumentovaného kontejnmentu a okamžité havarijní odstavení elektrárny. Tyto vysoce nepravděpodobné situace nemohou být absolutně vyloučeny vzdor všem promyšleným preventivním opatřením v celém procesu výroby a v provozu potrubí. Proto je realizován projekt seizmického zodolnění zařízení jaderných elektráren VVER. V rámci tohoto projektu se řeší problematika švihu s návrhem omezovačů.

Aktualizovaný problém švihu potrubí lze zkráceně formulovat takto:

- Je popsán prostorově rozsáhlý větvený vysokoenergetický potrubní systém jaderné elektrárny typu VVER s úložnými konstrukcemi a s okolním technologickým zařízením.
- Je popsána globální stavba a lokální stavební situace. Pro danou lokalitu jsou specifikovány seizmické poměry. Je dán soubor specifikací provozních podmínek potrubí.
- Pro potrubní systém jsou postulována místa porušení integrity potrubí gilotinovým lomem s následným švihem a provozní podmínky, za kterých může k lomu dojít.
- Jsou dány požadavky na omezení následků švihu potrubí a na způsob realizace omezení. Aktuální je použití axiálního omezovače švihu integrovaného do potrubního systému.
- Požaduje se výpočet a vyhodnocení dynamické odezvy potrubního systému na postulovaný gilotinový lom. Pro volný švih potrubí se má stanovit a posoudit příslušné dynamické zatížení vlastního potrubí a s ním integrovaných konstrukcí, úložných a okolních konstrukcí. Analogická analýza se má provést pro potrubní systém s omezovačem dle předběžného návrhu. Dalšími výpočty se mají optimalizovat parametry

deformační charakteristiky omezovače švihu tak, aby švih potrubí byl omezen na předepsanou úroveň.

 Mají se připravit podklady pro dimenzování konstrukce omezovače švihové odezvy s korektním modelem potrubí. Je třeba odpovídajícím způsobem zavést síly vznikající při výtoku do výpočtu. Musí se korektně popsat chování materiálu při vysokých rychlostech deformace a velkých přetvořeních.

Pro daný problém připadají v úvahu pouze integrované omezovače na potrubí, realizované vesměs jako speciální vazební elementy obou konců přerušeného potrubí s elastoplastickými (např. tažené tvče, tlačené skořepiny, tvarované ohýbané tvče viz LUNGMEN UNITS 1 & 2. Preliminary Safety Analysis Report. Section 3L - Evaluation of Postulated Ruptures in High Energy Pipes. 2003.) nebo viskoplastickými (tlačené bloky, tlumiče LISEGA, tlumiče GERB) deformačními charakteristikami (viz dílčí přehled v disertační práci ŠÍP, J.: Omezovače švihu vysokoenergetických potrubí jaderných elektráren. Plzeň, 2000). V dalším se budeme zabývat aplikací axiálního omezovače typu ŠKODA (principy, vývoj, konstrukce, realizace a aplikace) se soustavou tvarovaných viskoplastických stlačovaných elementů s alternativními charakteristikami. Funkční schéma omezovače je naznačeno na obrázku 1. Měřením byla určena charakteristika axiální brzdné síly jako funkce rychlosti a přemístění. Její znázornění je na obrázku 2. Úkolem omezovače švihu je odpovídajícím způsobem omezit nežádoucí relativní pohyb konců potrubí vzhledem k sobě v místě lomu, s ohledem na velikost přemístění a namáhání konstrukce. V axiálním směru je výsledný brzdný účinek určen chováním absorpčního elementu, který plastizuje. S ohledem na konstrukční řešení zde lze změnou tvaru a materiálu v určitém rozsahu měnit hodnoty brzdné síly. V příčném směru jsou účinky omezovače dány tuhostí potrubí a konstrukce omezovače. Možnosti optimalizace jsou zde poměrně omezené.



Pro řešení odezvy potrubního systému na gilotinový lom až do úplného zastavení systému byl vyvinut následující model omezovače švihu, který respektuje chování zplastizovaného absorpčního elementu v celém funkčním rozsahu. Modelování dle této varianty bylo použito při řešení potrubí pro JE Temelín.

Při modelování základní křivky brzdného účinku pro nulovou rychlost se použije prutový prvek s elasto-plastickým chováním daným materiálovou bilineární charakteristikou.



Obr. 3 Model omezovače

Rychlostní přírůstek brzdné síly se modeluje vazebním prvkem typu GAP. Závěrečný nárůst síly dle deformační charakteristiky se realizuje dalším prvkem GAP (obr. 3).

Druhou funkci omezovače švihu - omezení relativního příčného přemístění obou konců potrubí v místě poruchy lze s výhodou modelovat např. křížem ze 4 radiálně axiálních pružin, které jsou na jednom konci navzájem spojené na ose potrubí a druhým

koncem připojené do uzlů pláště potrubí. Příslušné tuhosti plynou z konstrukčního provedení omezovače a jeho uchycení na potrubí.



1-pružiny modelující ohybovou a radiální tuhost konstrukce omezovače 2-příčné vedení

Obr. 4 K modelování omezovače

požadovány průběhy sil v omezovači. Z toho plyne, že je výhodné modelovat omezovač obecně tak, aby bylo možné relativně snadno získat průběhy příslušných silových účinků a to nejlépe i v grafické formě. Vzhledem k tomu, že omezovač švihu je mnohdy aplikován mezi obě části přerušeného potrubí, je výhodné k odečítání těchto sil využít zařazený nosníkový třírozměrný prvek. Vnitřní síly v nosníku potom vhodně volených isou při materiálových geometrických a charakteristikách nosníku požadovanými silami, které vznikají v omezovači švihu.

Analýza vlivu změny charakteristiky omezovače 2.

Analyzoval se zjednodušený potrubní systém JEDU. Řešila se odezva systému s omezovačem na gilotinový lom. Hlavním cílem bylo srovnání výsledků řešení odezvy při změnách



některých parametrů charakteristiky vybraného modelu funkce omezovače (obr. 5).

Byl vytvořen korektní výpočtový model potrubního systému s odpovídajícím výchozím stavem. Simulování procesu náhlého lomu bylo provedeno potrubí způsobem popsaným v disertační práci I.Sedláka Dynamická analýza krátkodobých nestacionárních jevů potrubních systémů.

Hydrodynamické síly byly převzaty z výpočtové zprávy pro JEDU.

Byl zkoumán vliv následujících parametrů omezovače na velikost brzdné síly a dráhy volného konce potrubí:

1. Změna počáteční strmosti charakteristiky (80 %, 100 %, 120 %,130 % - viz obr. 6). To bylo realizováno změnou modulu pružnosti E prutového prvku.

2. Změna hodnoty brzdné síly ve střední oblasti charakteristiky (plastizace) (100 %, 110 %, 120 %, 130 % - viz obr. 7). Změny charakteristik bylo docíleno odpovídající volbou parametrů prutového prvku.



3. Analýza vlivu konstrukčních vůlí u příčného vedení omezovače. Byly řešeny tři alternativy modelu: bez vůle, radiální vůle v příčném vedení, úhlová vůle v příčném vedení. Vůle byly modelovány použitím nelineárních pružin v modelu subkonstrukcí k omezení příčných posuvů. Schéma subkonstrukce je na obr. 4, charakteristiky pružin modelujících radiální a ohybovou tuhost příčného vedení v omezovači jsou na obr. 8 a 9. Pro vyšetření vlivu velikosti vůle v pružinách modelujících ohybovou tuhost byly uvažovány následující hodnoty: (0, 0.005, 0.002, 0.01, 0.015). Pro pružiny modelující radiální tuhost byla uvažována vůle 4mm.



4. Byl zkoumán vliv změny tuhosti příčného vedení omezovače, který je závislý na jeho konstrukčním provedení, pomocí změny tuhosti pružin modelujících ohybovou a radiální tuhost omezovače (80 %, 90 %, 100 %, 110 %, 120 %, 130 %).

K řešení všech výše uvedených odezev byla použita metoda přímé integrace pohybových rovnic Newmark/Newton-Raphson.

Změna počáteční strmosti charakteristiky

Porovnání časových průběhů odezvových veličin pro alternativy počáteční strmosti charakteristiky je na obr. 10. (axiální síla v omezovači), obr. 11. (složka posuvů volného konce potrubí u_x). Síly v příčném vedení se liší maximálně o 15%. Nejvýhodnější je varianta 1,3 násobku původního modulu pružnosti. Varianta 0.8 je z hlediska konstrukce omezovače hraniční..



Obr. 10



Obr. 11

Změna hodnoty brzdné síly ve střední oblasti charakteristiky

Pro čtyři alternativy hodnoty brzdné síly ve střední oblasti charakteristiky omezovače jsou uvedeny následující grafy brzdné síly, přemístění volného konce a síly $F_y v$ příčném vedení.



Obr. 12



Obr. 13



Obr.14



Z výsledků výpočtů je zřejmý rozdílný stupeň ovlivňování různých odezvových veličin modelovanými vůlemi.Rozdíly v maximálních hodnotách sil vznikajících v příčném vedení byly pro výše uvedené vůle v pružinách modelujících ohybovou tuhost příčného vedení vůle do 13 %.



Obr.15



Obr.16

Na následujícím grafu je na průběhu F_y porovnán charakter vlivu vůle v pružinách modelujících axiální a ohybovou tuhost v reálném omezovači švihu.



Obr.17

Vliv změny tuhosti příčného vedení omezovače

Pro výše uvedené alternativy hodnoty tuhostí příčného vedení omezovače jsou například uvedeny následující grafy síly F_z a momentu M_v v příčném vedení.



Obr.18



Obr.19

Z grafu je patrné, že změny tuhosti příčného vedení ve zkoumaném rozsahu neměly podstatný vliv na maximální velikosti silových účinků.

3. Závěr

Z výsledků výpočtů je zřejmé podstatné ovlivňování odezvových veličin změnou charakteristik omezovače a to především v axiálním směru. Bylo prokázáno, že hledání optimální varianty charakteristiky brzdné síly je racionální. V rámci kontrolních výpočtů byl také zkoumán vliv doby procesu lomu, který je samozřejmě pro účely výpočtů v jaderné energetice předepsán. Byly zkoumány varianty doby lomu (1/3 ms, 1,0 ms, 3.0 ms). K řešení odezvy byla použita metoda přímé integrace pohybových rovnic Newton-Raphson.

Z výsledků výpočtů vyplynul zřejmý rozdílný - ale nepodstatný - stupeň ovlivňování různých odezvových veličin (např. změny maxima brzdné síly jsou v rozpětí 1%).

4. Literatura

American nuclear society (1988) Design basis for protection of light water nuclear power plants against the effects of postulated pipe rupture. ANSI/ANS

Lungmen units (2003)1 & 2. Preliminary Safety Analysis Report. Section 3L - Evaluation of Postulated Ruptures in High Energy Pipes.

Sedlák, I. (2003) Dynamická analýza krátkodobých nestacionárních jevů potrubních systémů. (Disertační práce.) *VA Brno*

Šíp, J.(2000) Omezovače švihu vysokoenergetických potrubí jaderných elektráren. (Disertační práce.) *Plzeň*