

NÁVRH A POSÚDENIE TENKOSTENÝCH OCEĽOVÝCH KONŠTRUKCIÍ ZAŤAŽENÝCH DYNAMICKÝMI ÚČINKAMI A SEIZMICITOU

*D. Bukov **

Abstrakt

Návrh a posúdenie tenkostenných konštrukcií zaťažených dynamickým zaťažením si vyžaduje zohľadnenie zmien tuhosti priereзов v čase spôsobených vydúvaním a šmykovým ochabnutím častí konštrukcie. V príspevku chcem poukázať na praktické prístupy z hľadiska riešenia odozvy a posúdenia mechanickej odolnosti. Na dvoch praktických príkladoch riešenia seizmickej odolnosti vzduchotechnického potrubia a na posúdení vynúteného kmitania komína sú stručne dokumentované princípy a úskalia posúdenia tenkostenných konštrukcií pri dynamickom zaťažení.

1. ÚVOD

Preukázanie mechanickej odolnosti konštrukcií je vždy spojené s uplatnením podmienok spoľahlivosti daných normovými alebo inými predpismi. Predpisy obyčajne uvádzajú vzťahy pre porovnávajúc únosnosť s vnútornými silami získanými z riešenia odozvy na pôsobiace zaťaženie. Pre výpočet vnútorných síl na tenkostenných staticky neurčitých konštrukciách je vždy potrebné použiť iteračný postup vzhľadom na zmeny tuhosti. Pri dynamickom zaťažení narastá počet iterácií s ohľadom na zmeny vnútorných síl v čase. Tenkostenné potrubia s kruhovým alebo obdĺžnikovým prierezom (napr. vzduchotechnické (VZT)) sú namáhaného okrem zaťaženia z celkového pôsobenia potrubia aj zaťažením vnútorný alebo vonkajším tlakom.

Dynamické zaťaženie môže mať charakter harmonického budenia alebo zaťaženia seizmicitou, ktoré sú špecifikované akcelerogramom alebo častejšie podlažným lineárnymi spektrami odozvy.

2. METÓDY RIEŠENIA ODOZVY

Všeobecne je možné odozvu na dynamické zaťaženie riešiť priamou numerickou integráciou pohybových rovníc alebo rozvojom do vlastných tvarov kmitania. Pre riešenie odozvy tenkostennej konštrukcie zaťaženej okrem vynúteného kmitania aj vonkajším alebo vnútorným tlakom (napr. VZT potrubia) je nutné zohľadniť

* Daniel Bukov, Ing., Daniel Bukov OK TEAM s.r.o., Bohrova 1; 851 01 Bratislava, d.bukov@okteam.sk

geometrickú nelinearitu. Odozva môže byť riešená priamou numerickou integráciou pohybových rovníc so zahrnutím geometrickej nelinearity (THA- Time history analysis)).

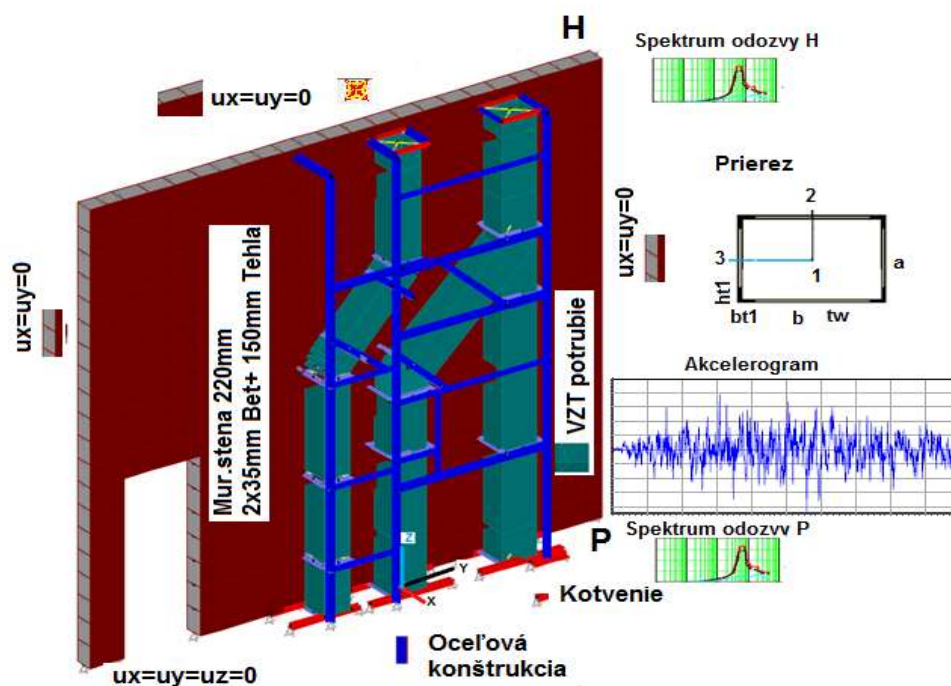
Výpočtový model konštrukcie musí byť priestorový a potrubie musí byť modelované ako škrupinová konštrukcia zložená zo škrupinových alebo 3D doskostenových prvkov. Spojie potrubia (príruby) môžu byť modelované prúťovými prvkami. Spojenie škrupinových prvkov s prvkami prírub môže byť modelované prvkami typu LINK zohľadňujúcimi pôsobenie spoja. Ostané prvky konštrukcie uloženia a podpory bývajú modelované prúťovými prvkami. Okrajové podmienky v miestach ukotvenia uložení potrubia na stavebnú konštrukciu sú modelované tuhými alebo pružnými podporami.

Takáto úloha je aj pri súčasnom rozvoji výpočtových metód a výkonoch súčasnej výpočtovej techniky veľmi náročná z hľadiska stability a konvergencie riešenia. Použitie v praktických výpočtoch sa dá vymedziť len na kalibráciu zjednodušených postupov.

Pri riešení odozvy na seizmické zaťaženie je najprv potrebné s podlažných spektier odozvy odvodiť syntetické akcelerogramy a tie následne použiť ako budenie sústavy s dodržaním požiadaviek noriem na takéto výpočtový postup (smery budenia, počet akcelerogramov atď.).

Pri analýze konštrukcie zaťaženej seizmickým zaťažením sa štandardne používa metóda lineárnych spektier odozvy (RSA Response spectra analysis). Metóda lineárnych spektier odozvy z princípu neumožňuje zahrnúť akýkoľvek nelineárny účinok. Metóda vychádza z výpočtu vlastných tvarov kmitania a sčítania maximálnych modálnych odoziev podľa špecifických pravidiel (SRSS, CQC, atď.) Pre výpočet vlastného kmitania konštrukcie je vzhľadom na vydúvanie a šmykové ochabnutie stien potrebné znížiť tuhosť konštrukcie.

2.1 PRÍKLAD VZDUCHOTECHNICKÉHO POTRUBIA



Obr. 1 Výpočtový model VZT potrubia

Prierez potrubia podľa metodiky SMACNA (Sheet metal & Air Conditioning Contractors' National Association) použíwanej v USA sa nahrádza prútom zloženým zo štyroch rovnoramenných uholníkov s rameno šírky 32x hrúbka plechu potrubia (viď Obr.1). Konštrukcia musí byť modelovaná, tak aby jej pôsobenie vystihlo skutočné pôsobenie systému pri seizmickom zaťažení (tuhosti konštrukcií a rozloženie hmoty pri seizmickej udalosti).

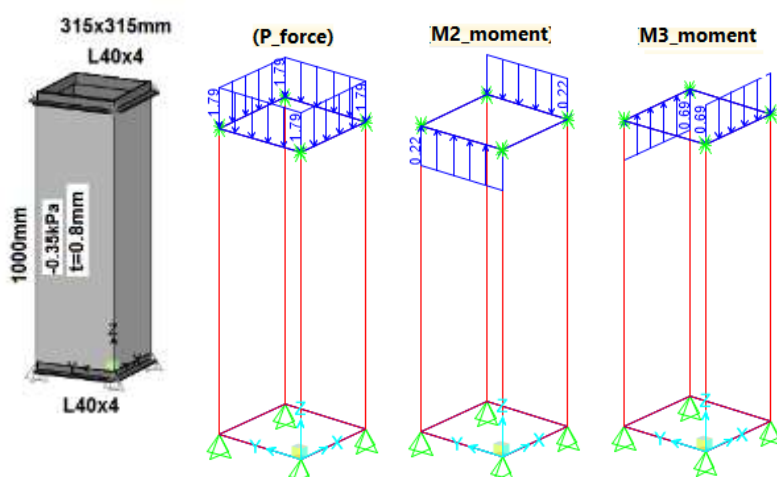
Potrubie je modelované 3D nosíkovými prvkami so znížením ohybovej a osovej tuhosti. Súvisiace konštrukcie sú modelované plošnými alebo prútovými prvkami.

Spektrá odozvy charakterizujúce seizmické zaťaženie sú spravidla udávané pre podlažia objektu. Ak potrubie prechádza dvomi podlažiami normy požadujú použiť spektrum s priemernými hodnotami z obidvoch spektier. Spektrá však majú rozličný frekvenčný obsah, a preto takýto postup nemusí byť vždy konzervatívny. Považujem za vhodné použiť spektrum z vyššieho podlažia.

Pevnostné posúdenie časti potrubia je možné vykonať podľa niektorých z normových predpisov s ohľadom na podmienky spoľahlivosti. Pre výpočet vzduchotechnických potrubí zaťažených seizmickými účinkami je možné použiť normu ASME A-G1, kde sú uvedené postupy a vzorce pre posúdenie potrubia namáhaného kombináciami zaťažení. Pre posúdenie je možné použiť aj STN EN 1993 1-3 je však potrebné zahrnúť aj účinok zaťaženia vnútorným alebo vonkajším tlakom. Pri riešení konkrétneho prípadu sme použili postup podľa ASME A-G1 a riešenie pomocou nelineárnym riešení so zahrnutím geometrickej nelinearity vo forme veľkých premiestnení.

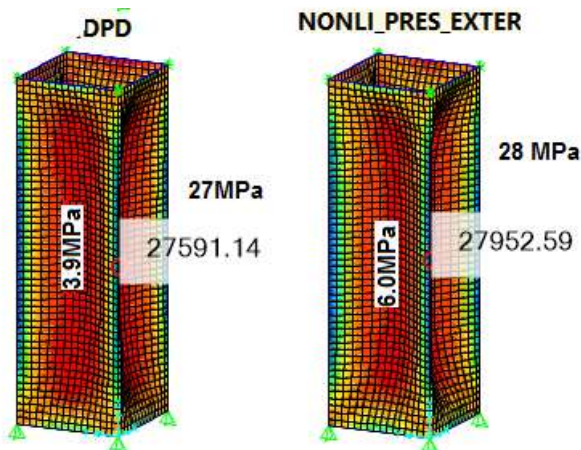
Ďalším možným postupom doporučeným aj ASME A-G1 je použitie podrobného modelu na vybranej časti konštrukcie kde sa očakávajú extrémne namáhania. Riešený úsek je namodelovaný ako výrez z konštrukcie kde sú ekvivalentné okrajové podmienky a pôsobiace zaťaženie. Zaťaženie sa do tenkostenej konštrukcie zavádza membránovými účinkami.

Výsledkom takéhoto riešenia môžu byť v prípade riešenia úlohy lineárnej stability kritické zaťaženia ktoré sa použijú pre posúdenie prierezu podľa normy.



V prípade, že použijeme riešenie so zahrnutím veľkých deformácií pri extrémnej kombinácii zaťažovacích stavov získame napätia, ktoré môžeme priamo porovnať s dovolenými resp. medznými napätiami.

Obr. 2 Výpočtový model výseku potrubia



Podľa Obr. 3 zahrnutie vplyvu geometrickej nelinearity má vplyv na napätosť v stene potrubia. V prípade daného riešeného rozmeru potrubia nie vplyv výrazný (štíhlosť 388). Pri inej konfigurácii potrubia resp. jeho výseku (dĺžka a pričný rozmer) sa dá očakávať výraznejší vplyv. Výpočet s vplyvom geometrickej nelinearity má význam aj z hľadiska presnejšieho výpočtu deformácií priečného rezu potrubia, a to hlavne pri zaťažení tlakom.

Obr. 3 Zrovnávacie napätia pri lineárnom výpočte (DPD) a pri nelineárnom

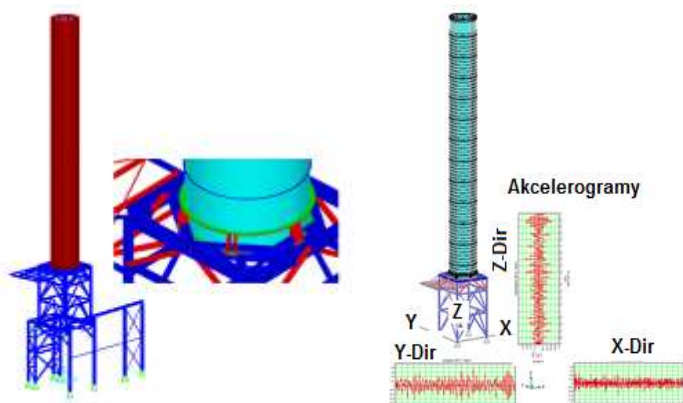


Zaťaženie, pri ktorom dochádza k strate stability je podľa výpočtu lineárnej stability rovné 2.18 násobok zaťaženia, ktoré vstúpilo do výpočtu t.j. zaťaženie z kritickej (rozhodujúcej pre napätosť z výpočtu na globálnom modeli) kombinácie. Vo vzťahoch pre posúdenie pevnosti potrubia podľa noriem potom bude kritické zaťaženie nahradené vypočítanou hodnotou z 3D modelu. V danom prípade ide o zjednodušenie, ale z hľadiska presnosti výpočtu je zjednodušenie akceptovateľné, pretože lepšie zohľadňuje konkrétne pôsobenie konštrukcie s ohľadom na stabilitu ako vzorce z normy.

Obr. 4 Kritický tvar a násobok kritického zaťaženie

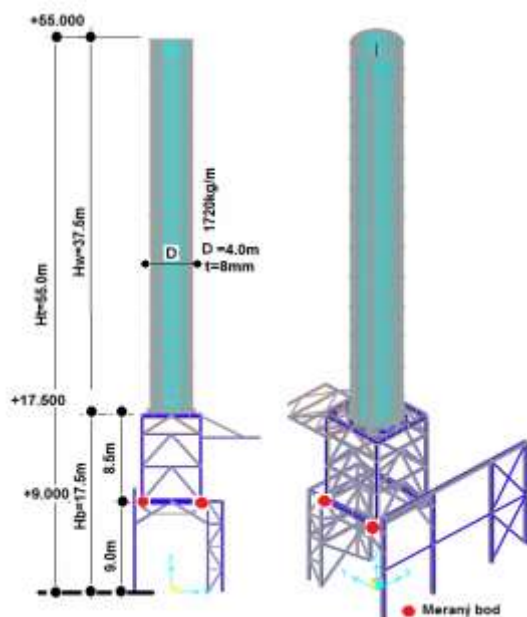
2.2 PRÍKLAD KONŠTRUKCIE KOMÍNA

Komín odvádzajúci spaliny do atmosféry pri nábehu plynovej 50MW turbíny sa nadmerne rozkmital a vnútorné časti tlmíča boli poškodené. Po demontáži



poškodených častí tlmíča boli uskutočnené merania výchyliek pri rôznom výkone turbíny. Meranie uskutočnil TSÚS. Výsledkom meraní boli akcelerogramy v mieste podpornej konštrukcie. Akcelerogramy boli použité na posúdenie vplyvu nábehu turbíny na kmitanie komína.

Obr. 5 Schéma zaťaženie komína akcelerogramami z merania

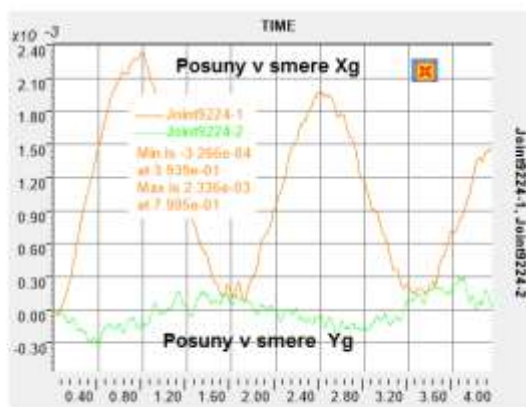
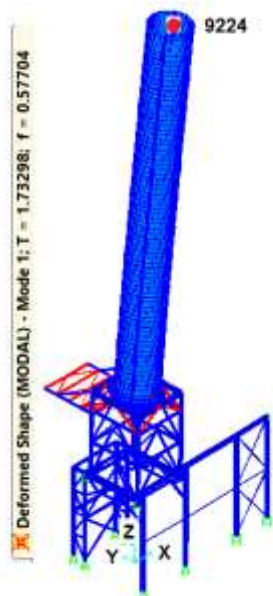


Výpočtový model konštrukcie komína a podpornej konštrukcie je vytvorený z dosko-stenových prvkov a prútových 3D prvkov. Komínové teleso je modelované dosko-stenovými prvkami. K plášťu komína je plošne pridaná hmotnosť izolácie a vnútorného plášťa. Plošiny sú modelované diskretnými hmotami v osi komína. Tlmič v hornej časti komína je modelovaný ako pružne pripojená hmota. Oblasť kotvenia je modelovaná plošnými prvkami. Výpočtový model komína bol modelovaný plošnými prvkami pre lepšie vystihnutie pôsobenia kotvenia z hľadiska tuhosti. Prvá vlastná frekvencia sústavy bola 0.58Hz.

Obr. 6 Výpočtový model komína a body merania

Pre riešenie odozvy na budenie akcelerogramami bola použitá metóda rozvoja do vlastných tvarov kmitania, bolo použitých 12 vlastných tvarov.

Výsledkom riešenia na budenie akcelerogramami boli deformácie a napätia v jednotlivých častiach nosnej konštrukcie.



Deformácie komína a napätosť v konštrukcii od vynúteného kmitania spôsobeného nábehom a prevádzkou turbíny bola na základe merania a následného výpočtu podstatne nižšia ako napätosť pri zaťažení vetrom.

Obr. 7 Prvý vlastný tvar ($f_1=0.557\text{Hz}$) a priebeh posunov v hlave komína

3. ZÁVER

Na dvoch príkladoch sú stručne uvedené postupy riešenia odozvy tenkostenných konštrukcií pri dynamickom zaťažení.

Prvý príklad prezentuje postup riešenia odozvy vzduchotechnického potrubia. Postup je založený na redukcii tenkostennej konštrukcie potrubia z 3D škrupinovej konštrukcie na 3D prúťovú konštrukciu. Pevnostné posúdenie potrubia je možné vykonať podľa normových vzťahov alebo na podrobne modelovanom výseku potrubia s okrajovými podmienkami globálneho modelu.

Druhý príklad dokumentuje použitie riešenie odozvy komína na budenie akcelerogramami získanými z meraní. Komín s priemerom 4.0m s hrúbkou steny 8mm je modelovaný ako škrupinová konštrukcia. Účelom takéhoto modelu je vystihnúť pôsobenie v mieste kotvenia ako aj zahrnutie prípadného vplyvu tuhosti priečneho rezu.

Dostupnosť výkonných počítačov a sofistikovaných programov ani v súčasnej dobe neumožňuje riešiť úlohy v oblasti mechanickej odolnosti konštrukcií bez zavedení predpokladov o pôsobení a rozumnom zjednodušení riešených úloh.

LITERATÚRA

- [1] Z. Bittnar, P. Řeřicha : Metoda konečných prvků v dynamice konštrukcií ,SNTL Praha 1981
- [2] ASME AG-1 Code on Nuclear Air and Gas Treatment (ASME AG-1-2009 Revision of ASME AG-1-2003) 611 strán.
- [3] Anil K. Chopra.: Earthquake Dynamics of Structures Theory and Application to Earthquake Engineering Prentice Hall , Second Edition 2001
- [4] Anil K. Chopra.: Earthquake Dynamics of Structures A Primer, Earthquake Engineering Research Institute, 2005
- [5] Klaus-Jürgen Bathe : Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey , 1982
- [6] Mario Paz, William Leigh: Structural Dynamics – Theory and Computation, Springer Science + Business Media. LLC, Fifth edition, 2004
- [7] Edward L. Wilson: Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA (2002).