

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Michal Chlud

STANOVENÍ METODIKY ANALÝZY SEISMICKÉ ODEZVY
POTRUBNÍCH SOUSTAV S VISKÓZNÍMI TLUMIČI

FORMULATION THE METHODOLOGY FOR ANALYSIS THE
SEISMIC RESPONSE OF THE PIPING SYSTEMS WITH
VISCOSE DAMPERS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. Ing. Eduard Malenovský, DrSc.
Oponenti: doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.
doc. Ing. Viktor Kanický, CSc.
Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

seizmická odezva, potrubní soustava, viskózní tlumič, jaderná elektrárna

KEY WORDS

seismic response, piping systems, viscous damper, nuclear power plant

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2

616 69 Brno

© Michal Chlud 2015

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE PRÁCE	6
3 REŠERŠNÍ STUDIE	7
3.1 Metody používané pro stanovení seizmické odezvy.....	7
3.2 Srovnání metody spekter a metody přímé integrace.....	9
3.3 Zvyšování seizmické odolnosti potrubních soustav.....	11
3.4 Analýza komplikovaných potrubních soustav s viskózními tlumiči	13
4 ANALÝZA PROBLÉMU A VOLBA METOD ŘEŠENÍ.....	15
5 PREZENTACE VYTVOŘENÉ METODIKY.....	17
5.1 Sestavení výpočtového modelu pro statickou úlohu v programu AutoPIPE.....	18
5.2 Popis vzájemného propojení výpočtových systémů	19
5.3 Stanovení parametrů pro Maxwellův rheologický model tlumiče.....	20
5.4 Generování syntetických akcelerogramů	21
5.5 Výpočet seizmické odezvy metodou přímé integrace v programu ANSYS	22
5.6 Určení tuhosti pružinových náhrad	23
5.7 Výpočet seizmické odezvy metodou spekter v programu AutoPIPE	23
5.8 Kombinace statické a dynamické odezvy a vyhodnocení.....	23
6 APLIKACE VYTVOŘENÉ METODIKY NA ÚLOHÁCH PRAXE.....	24
6.1 Stručný popis řešené soustavy	24
6.2 Výpočtový model a jeho zatížení.....	24
6.3 Vlastní frekvence a vlastní tvary smyčky bez tlumičů	26
6.4 Výpočet seizmické odezvy a stanovení tuhosti pružinových náhrad.....	26
6.5 Vlastní frekvence a vlastní tvary smyčky s tlumiči	27
6.6 Posuvy smyčky při seizmickém ději a reakce v tlumičích.....	27
6.7 Výpočet redukováného napětí smyčky	29
7 ZÁVĚR.....	31
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	32
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	34
AUTOROVO CURRICULUM VITAE.....	35
ABSTRACT	36

1 ÚVOD

Viskózní tlumiče pro tlumení seizmické odezvy potrubních soustav se v prostředí českých a slovenských jaderných elektráren (JE) poprvé objevily počátkem 90. let. Důvodem k jejich aplikaci na bezpečnostně významná potrubí a aparáty byl požadavek na zvýšení seizmické odolnosti provozovaných elektráren.

Zejména bylo nutné zajistit funkčnost hlavního cirkulačního potrubí a komponent primárního okruhu (I.O.) JE a souvisejících bezpečnostně významných potrubí během probíhajícího seizmického děje. Potrubí během provozu z důvodu vysokých teplot značně dilatují, což snižuje možnosti uplatnění standardně používaných prvků pro zvýšení seizmické odolnosti (zarážky, třmeny, vedení, dorazy, osová tlumiče atd.). Naopak viskózní tlumiče brání teplotním dilatacím pouze minimálně.

Potrubní viskózní tlumič je konstrukčně jednoduchý a je vytvořen z vnější nádoby, která je naplněna speciální viskózní kapalinou, v níž je ponořen píst spojený s druhou částí tlumiče. Tlumící síla je způsobena třením mezi pohybujícím se pístem a viskózní kapalinou a může mít obecně libovolný směr. Samotný pohyb pístu je omezen pouze vnější nádobou. Při běžném provozu tlumiče nebrání pomalému posuvu zařízení způsobeného teplotními dilatacemi, ale při seizmickém ději nedovolí rychlý pohyb a zařízení zatlumí.

Výraznějšímu rozšíření tlumičů v praxi brání zejména nelineární frekvenční závislost jeho tlumících charakteristik ([1][2][3]), která se komplikovaně zahrnuje ve výpočtovém modelování. Inženýrská praxe se s frekvenční závislostí tlumičů vyrovnává nejčastěji dvěma způsoby:

První možností je zjednodušeně popsat nelineární chování tlumiče pomocí lineární pružiny (někdy nazývanou pseudotuhostí) a následně pomocí metod spekter odezvy zjistit seizmickou odezvu řešeného systému. Zejména u komplikovaných konstrukcí, jakými jsou např. hlavní cirkulační potrubí, je korektní linearizace charakteristik tlumiče velice obtížná a často se spíše jedná o inženýrský odhad. Do výpočtu se tak mohou vnést nepřesnosti, které mohou vést k chybnému výpočtu odezvy na seizmické buzení. Další nevýhodou je konzervatismus metody spekter odezvy, který v praxi vede k aplikaci většího množství tlumičů, než je pro zajištění seizmické odolnosti nezbytně nutné. Výhodou tohoto přístupu je zejména relativně snadné a dostatečně rychlé stanovení seizmické odezvy.

Druhá možnost spočívá v popisu nelineárních vlastností tlumiče jeho rheologickým modelem a ve stanovení seizmické odezvy metodou přímé integrace pohybových rovnic v čase. Metoda přímé integrace pohybových rovnic vyžaduje vstupní buzení ve formě závislosti kinematické veličiny na čase (nejčastěji zrychlení). Samotný výpočet přímou integrací pohybových rovnic je ve srovnání s metodou spekter odezvy značně náročnější. Obtížné je i zpracování odezvy ve formě časové závislosti. Na druhou stranu je chování tlumičů popsáno výrazně přesněji.

V práci je vytvořen takový postup, který vhodně kombinuje používaná řešení, a který umožňuje stanovit seizmickou odezvu komplikovaných potrubních soustav s viskózními tlumiči s přijatelnou přesností a přitom v efektivním časovém rámci.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je vytvořit metodický postup pro stanovení seizmické odezvy komplikovaných potrubních soustav s viskózními tlumiči. Vytvořený postup by měl být schopen poskytnout dostatečně přesné řešení seizmické odezvy v efektivním časovém rámci.

Základní ideou je využití pozitivních vlastností dvou nejčastěji používaných metod pro stanovení seizmické odezvy potrubních soustav, tedy metody spekter odezvy a metody přímé integrace pohybových rovnic. Kombinace metod bude realizována pomocí vzájemného propojení dvou dostupných výpočtových systémů, a to obecného konečnoprvkového systému ANSYS a specializovaného systému pro výpočet napjatosti potrubí Bentley AutoPIPE.

Zároveň požadujeme, aby metodika splňovala soudobé požadavky praxe na pevnostní výpočty v prostředí jaderné energetiky. Kromě stanovení dostatečně přesné a rychlé dynamické odezvy potrubního systému s viskózními tlumiči se jedná zejména o snadné provedení kombinace statické a dynamické odezvy, následné vyhodnocení podle předepsaných pevnostních norem a pohodlnou tvorbu výpočtové dokumentace.

Vytvořenou metodiku by bylo vhodné ověřit na konkrétních praktických úlohách. Z množiny potrubí, které se vyskytují v prostředí českých a slovenských JE, a které jsou osazeny viskózními tlumiči, jsou z hlediska rozměrů nejrozsáhlejšími soustavami hlavní cirkulační potrubí a potrubí spojující kompenzátor objemu s barbotážní nádrží. Uvedená potrubí patří k bezpečnostně nejvýznamnějším potrubím a zároveň jsou osazeny největším množstvím viskózních tlumičů.

Aby mohl být metodický postup přijat a využíván inženýrskou praxí, je důležité osvětlit postupy vedoucí ke stanovení podstatných vstupních dat, které metodika využívá. Jedná se zejména o problematiku generování syntetických akcelerogramů, které slouží jako vstupní zatížení pro nelineární dynamickou analýzu a dále o postup určení parametrů Maxwelllova rheologického modelu, který se využívá k popisu frekvenčně závislých tlumících charakteristik tlumiče. Pro praktické využití metodického postupu bude dále nezbytné popsat strukturu vzájemného propojení využívaných programových systémů (ANSYS a AutoPIPE). Kombinace uvedených komerčních softwarů se u společností, které se zabývají výpočty v jaderné energetice, vyskytuje poměrně často. Nicméně popis struktury vzájemného propojení může být inspirativní i pro uživatele jiných softwarových balíčků.

Souhrnně lze cíle práce definovat následovně:

1. Vytvořit metodiku pro stanovení seizmické odezvy potrubních soustav s viskózními tlumiči. Při tvorbě metodiky zohlednit požadavky praxe na pevnostní výpočty v prostředí jaderných elektráren.
2. Aplikovat metodiku na bezpečnostně významná potrubí JE, která jsou osazena viskózními tlumiči.
3. Vytvořit návody pro stanovení dílčích vstupů do metodiky.
4. Popsat strukturu vzájemného propojení použitých výpočtových systémů.

3 REŠERŠNÍ STUDIE

Tato kapitola je zaměřena na rešeršní studii dostupných literárních pramenů. Úvodní část rešerše se zaměřuje na současně používané numerické metody pro stanovení odezvy konstrukcí na seizmické zatížení. Zejména jsou studovány takové výpočtové metody, které jsou pro řešení seizmické odezvy potrubních soustav doporučeny domácími nebo zahraničními normami, standardy a směrnicemi.

Dále jsou srovnány dvě nejpoužívanější metody, tedy metoda spekter odezvy a metoda řešení pohybových rovnic přímou integrací. Metody jsou srovnávány hlavně z hlediska jejich přesnosti, rychlosti a míry konzervatismu dosahovaných výsledků.

Následující část se věnuje možnostem zvyšování seizmické odolnosti zařízení a studuje vlastnosti viskózních tlumičů.

V závěrečné části rešerše jsou prezentována výpočtová řešení seizmické odezvy komplikovaných potrubních soustav s těmito tlumiči.

3.1 METODY POUŽÍVANÉ PRO STANOVENÍ SEIZMICKÉ ODEZVY

Popis níže uvedených metod pro stanovení seizmické odezvy vychází z metodik „Požadavky na seizmické výpočty a hodnocení seizmické odolnosti stavebních konstrukcí a technologického zařízení JE Temelín, JE Dukovany a zásady jejich provedení“ [4] a „Požiadavky na hodnotenie seizmickej odolnosti konštrukcií, systémov a komponentov JE Mochovce 3. a 4. blok“ [5], které jsou pro výpočty seizmické odezvy v prostředí českých a slovenských jaderných elektráren závazné.

Metoda spekter odezvy (označována zkratkou „RSMAM“ a někdy také „metoda rozkladu do vlastních tvarů kmitání“) je významnou metodou pro seizmické výpočty konstrukcí a zařízení JE. Konstrukce či komponenty zařízení jsou obvykle modelovány soustavami s konečným počtem stupňů volnosti nejčastěji na bázi metody konečných prvků. Zvolený postup metodou spekter odezvy má vzhledem k takovým soustavám splňovat zejména následující požadavky:

- dostatečný počet energeticky významných tvarů vlastních kmitů s frekvencemi zpravidla do 33 Hz (na základě zhodnocení příspěvků jednotlivých tvarů vlastních kmitů do celkové odezvy),
- „missing mass“ (někdy označován „ZPA“) efekt v případě kumulativní efektivní hmoty rozkmitávaného systému nižší než 80 % (90 % dle [5]) celkové hmoty soustavy
- příslušné kombinace vlastních tvarů (SRSS, ABS, CQC,...)

Zejména v minulosti se problému kombinování modálních odezev věnovalo mnoho autorů. Souhrnně se tímto fenoménem zabývají publikace „Seismic Analysis of Structures“ [6] a „Response Spectrum Method In Seismic Analysis and Design of Structures“ [7].

Integraci pohybových rovnic v čase je nutno použít v těch případech, kdy nejsou splněny podmínky pro aplikaci přibližné metody spekter odezvy ve smyslu linearit soustavy a proporcionálního malého útlumu, nebo je-li cílem odhalit rezervy v její dynamické odezvě. V tomto případě je seizmické buzení zadáno zpravidla v podobě akcelerogramů (některé národní normy požadují zadání časovými průběhy rychlosti – velocitygramy) a důležitým momentem je korektní volba časového integračního kroku. Velikost tohoto kroku je závislá na volbě integrační metody. Obvykle se požaduje, aby tento krok byl nejvýše 1/10 (1/20 [5]) nejkratší periody vlastních kmitů, které jsou pro seizmickou odezvu daného objektu významné.

Metoda ekvivalentního statického seizmického zatížení se volí v případě, jestliže konstrukce či technologické zařízení představují z hlediska mechaniky jednoduchou soustavu s jedním nebo dvěma stupni volnosti a jestliže cílem seizmického výpočtu je pouze určení seizmických sil a momentů v kotvení do stavby, nebo určení napjatosti v některém kritickém průřezu, kdy taková jednoduchá náhrada evidentně postačí. Náhradní statické seizmické zatížení, působící ve směru i -tého stupně volnosti, se vypočte ze vzorce:

$$F_i = k \cdot m \cdot a_{i,f}, \quad (3.1.1)$$

- kde F_i ekvivalentní statické zatížení, odpovídající i -té složce seizmického buzení v prostoru,
- m hmota odpovídající i -té složce seizmického buzení a vypočtené či odhadnuté základní frekvenci vlastních kmitů, určené z příslušného seizmického spektra odezvy s rozšířenými špičkami,
- $a_{i,f}$ spektrální zrychlení odpovídající i -té složce seizmického buzení a vypočtené nebo odhadnuté základní frekvenci vlastních kmitů, určené z příslušného seizmického spektra odezvy s rozšířenými špičkami pro daný útlum
- k součinitel, který se uvažuje;
- 1,0 v případech, kdy základní frekvence vlastních kmitů, odpovídající tvaru kmitů s dominantní modální hmotou je určen výpočtem,
- 1,20 ve všech ostatních případech.

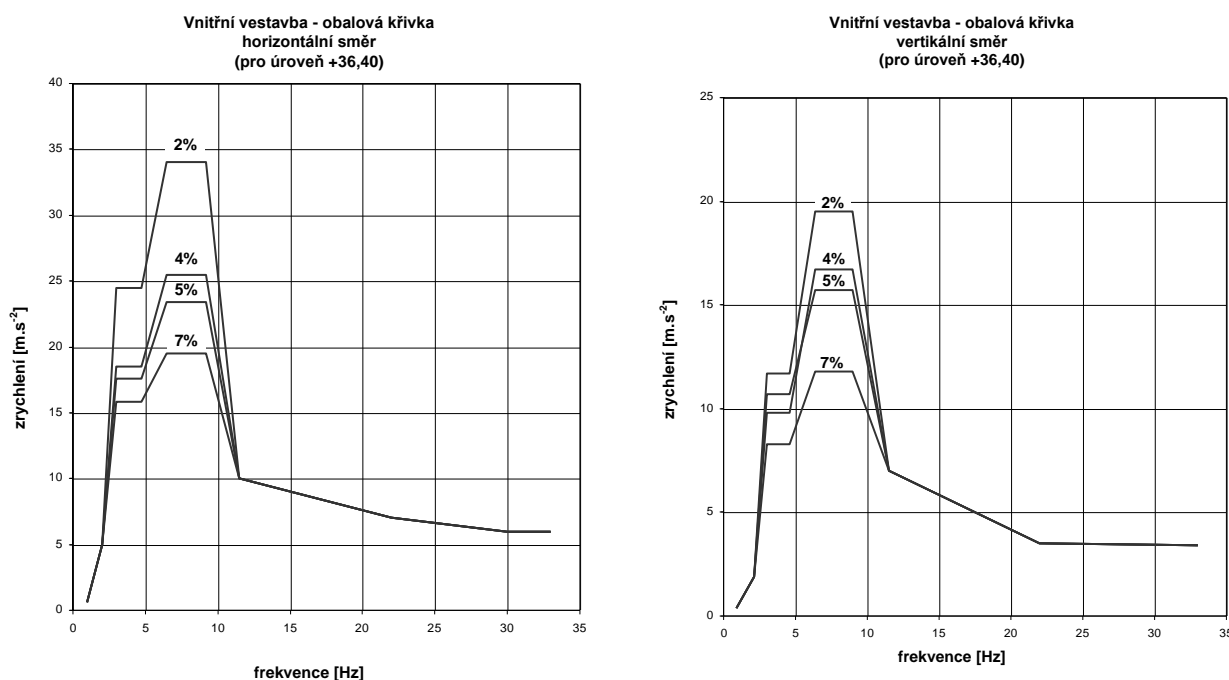
Pro pevnostní a seizmické výpočty technologických zařízení JE existují kromě [4,5] i další normativní předpisy. Nejčastěji se postupuje podle normy „NTD A.S.I. Sekce III“ [8], která vychází z ruských standardů „PNAE“ [9]. Mnohdy je i postupováno podle americké normy „ASME“ [10]. U obou předpisů se odezva od seizmické události kombinuje s odezvou od normálních provozních podmínek a je hodnocena dohromady vůči společným limitám.

Výpočet a jeho hodnocení se zpracovává ve formě tzv. průkazné dokumentace zařízení. Základní požadavky a doporučení na zpracovávání této výpočtové dokumentace jsou uceleně sepsány v dokumentech „Aktualizované požadavky na zpracování výpočtové dokumentace pevnosti a životnosti zařízení jaderných elektráren ČEZ“ [11] a „Metodika na vypracovanie a aktualizáciu preukaznej dokumentácie technologického zariadenia pre MO34“ [12].

Výše uvedené standardy platné pro české a slovenské jaderné elektrárny čerpají zejména ze západních standardů, metodik a návodů viz [13-19].

3.2 SROVNÁNÍ METODY SPEKTER A METODY PŘÍMÉ INTEGRACE

Jednodušším přístupem z hlediska výpočetní náročnosti je řešení spektrální analýzou pomocí rozkladu do vlastních tvarů kmitu. Vstupním zatížením pro tento typ výpočtu jsou metodikou zadaná vyhlazená spektra, která jsou většinou určena pro lokalitu elektrárny a pro výškové podlaží, na kterém se nachází hodnocená technologie. Ukázka vyhlazeného spektra pro lokalitu ETE je na obr. 3.2.1 a pochází z dokumentu „Požadovaná spektra odezvy pro seizmickou kvalifikaci nově dodávaných a inovovaných zařízení JE Temelín“ [20]. Obdobná spektra pro lokality EMO a EDU jsou k dispozici v dokumentech „Seizmické zadání pro nově dodávané a inovované zařízení JE Dukovany“ [21] a „SO 800/1-02 Vyhlazená podlažní spektra odezvy“ [22].

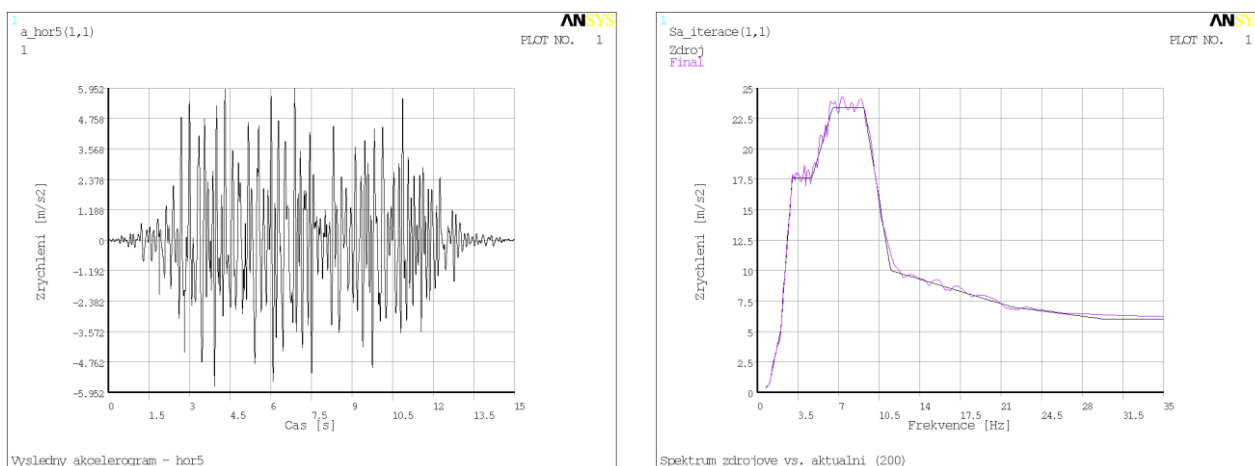


Obr. 3.2.1: Obalová křivka pro vnitřní vestavbu v úrovni 36,40; úroveň zemětřesení MVZ; horizontální a vertikální směr [20]

Přístup zjištění seizmické odezvy pomocí metody spekter je implementován v celé řadě softwarů a vyhodnocení získané odezvy je relativně jednoduché. Spektrální analýza je analýzou lineární a navazuje na předchozí výpočet vlastních čísel. Vzhledem k relativně nízkým výpočtovým nárokům je možné metodou lineárních spekter stanovit seizmickou odezvu i u velice rozsáhlých konstrukcí.

Největší nevýhodou této analýzy je nutnost linearizovat nebo případně zanedbat veškeré nelinearity, které se v hodnoceném systému nachází. Nesprávná linearizace, případně zanedbání některých nelinearit, může vést k chybnému výpočtu odezvy na seizmický děj.

Metoda přímé integrace pohybových rovnic je výrazně časově náročnější a vyžaduje vstupní buzení ve formě závislosti kinematické veličiny na čase (tzv. akcelerogram, velocitogram nebo posuvogram). Nejčastěji se používá průběh zrychlení na čase, tedy akcelerogram. Průběhy zrychlení na čase (obr. 3.2.2 vlevo) se většinou získávají ze zadaného spektra odezvy (obr. 3.2.2 vpravo) specifickým procesem, který je vysvětlen v kapitole 5.



Obr. 3.2.2: Akcelerogram a jeho ověření se zadaným spektrem [24]

Řešení přímé integrace pohybových rovnic je nejčastěji realizováno Newmarkovou metodou a je obvykle časově náročné. Obtížné je i zpracování odezvy ve formě časové závislosti. Na druhou stranu případné nelineární chování lze popsat výrazně přesněji, jsou tedy možné i variantové analýzy s cílem nalézt optimální řešení sledovaných systémů.

Srovnáním metod lineárních spekter odezvy a integrace pohybových rovnic v čase se již zabývalo mnoho autorů. Zajímavá srovnání je možné nalézt např. v „Response of the Residential Building Structure on Load Technical Seismicity due to Mining Activities“ [25] a v „Seismic Design and Response of NPP Piping“ [26]. Z obdobných srovnání vychází metoda lineárních spekter odezvy vůči integraci pohybových rovnic jako konzervativní. Přílišná konzervativnost metody spekter odezvy by mohla být nevýhodou, protože může v některých případech vést ke zbytečnému předimenzování konstrukce.

3.3 ZVYŠOVÁNÍ SEIZMICKÉ ODOLNOSTI POTRUBNÍCH SOUSTAV

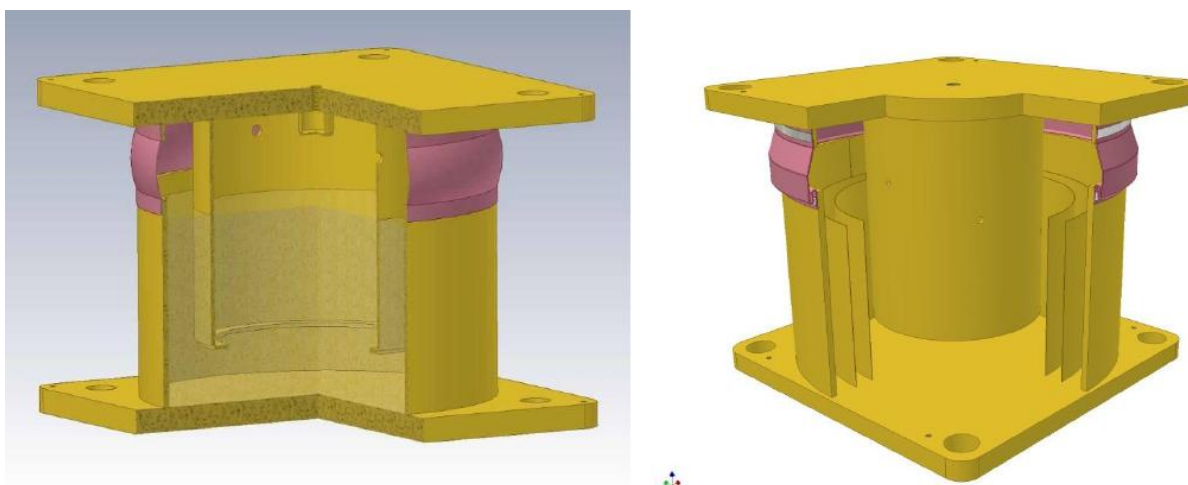
Autoři metodik [4] a [5] prezentují několik postupů, jak zvýšit seizmickou odolnost potrubí a jeho aparátů. Potrubí lze v prostoru překomponovat tak, aby odezva od seizmického děje byla příznivější. Dost často se jednoduše přidávají podpěry, pomocí kterých se potrubí či aparát rozepře do stavby. Jisté komplikace tohoto postupu se vyskytnou v případě horkých potrubí, kdy přídatné podpory nesmí bránit teplotním dilatacím, avšak musí účinně fungovat při rychlých dynamických dějích.

Autoři dále popisují princip funkce dříve hojně používaných hydraulických a mechanických amortizátorů. Věnují se jejich poruchám (úniky oleje, rezivění vnitřních částí) a vyjadřují se k jejich velkým nákladům na údržbu, kontrolu a testování.

Právě z důvodů vysoké pravděpodobnosti poruchy a drahému provozu se doporučují z odolňovat potrubní soustavy a aparáty pomocí jednoduchých viskózních tlumičů, pokud není možné použít tradiční kluzné a pružné podpory, různé dorazy, podpory se stranovým vedením apod. Vzhledem k tomu, že se nelze použítí tlumičů vyhnout, doporučují metodiky [4] a [5] z důvodů sjednocení požadavků na kontrolu a údržbu používat jednotně tlumiče německé firmy GERB, a sice v minimálním potřebném množství.

Potrubní viskózní tlumič je konstrukčně jednoduchý a je vytvořen z vnější nádoby, která je naplněna speciální viskózní kapalinou, v níž je ponořen píst spojený s druhou částí tlumiče. Tlumicí síla je způsobena třením mezi pohybujícím se pístem a viskózní kapalinou a může mít obecně libovolný směr. Samotný pohyb pístu je omezen pouze vnější nádobou. Při běžném provozu tlumiče nebrání pomalému posuvu zařízení způsobeného teplotními dilatacemi, ale při seizmickém ději nedovolí rychlý pohyb a zařízení zatlumí.

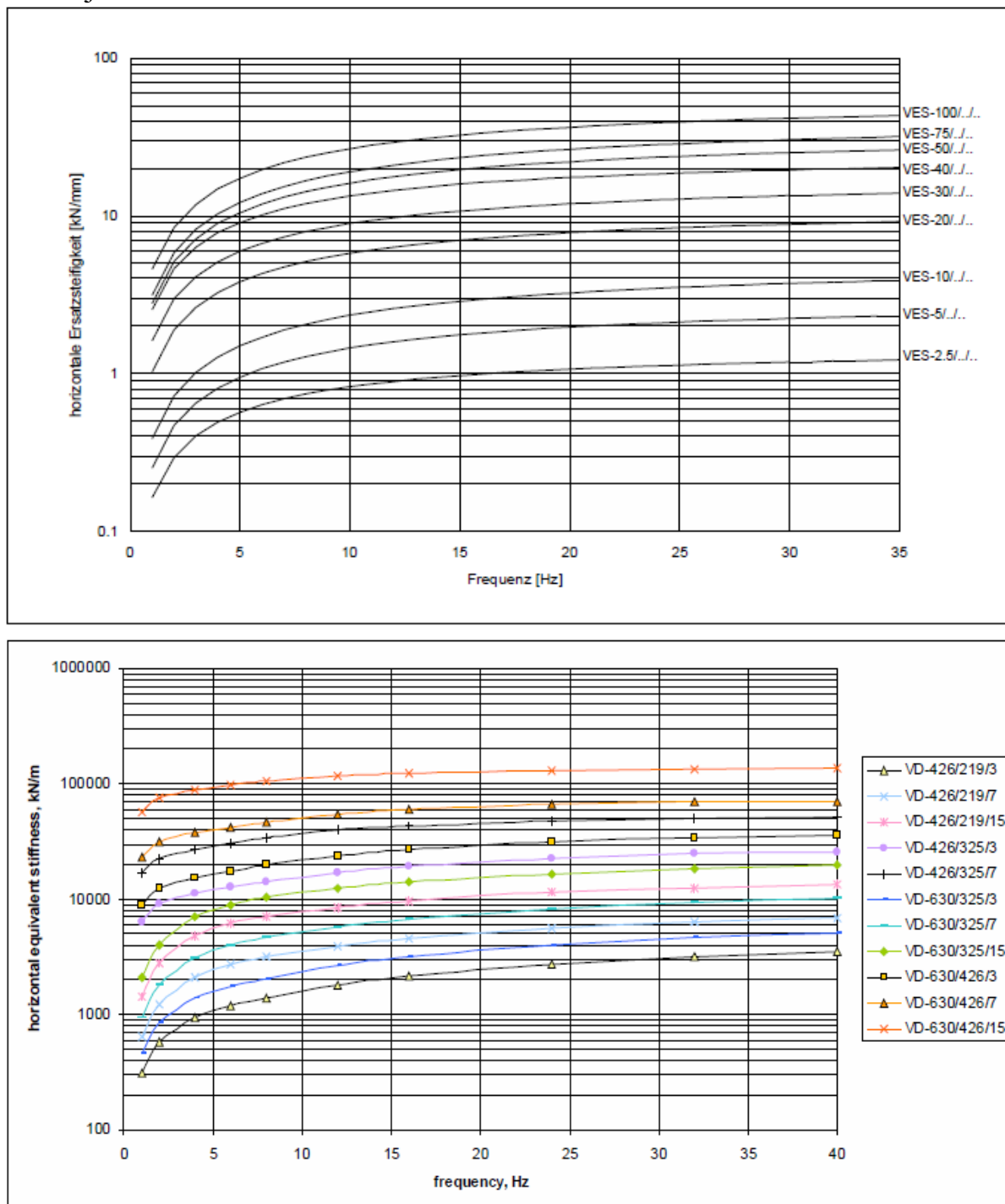
Jednotlivých typů tlumičů je mnoho. Na obr. 3.3.1 jsou znázorněny pravděpodobně dva nejpoužívanější typy.



Obr. 3.3.1: Viskózní tlumič GERB (typ VES vlevo, typ VD vpravo) [32]

V případě tlumiče typu VES je viskózní kapalinou hmota podobná asfaltu. Typ VD je naplněn kapalinou podobnou silikonu, do které je vloženo určité množství válcovitých plechů. Typ VD je novější a konstrukčně z typu VES vychází. Jeho výhodou oproti vývojově staršímu VES je garantovaná provozuschopnost tlumicí kapaliny ve výrazně širším teplotním rozmezí. Specifické vlastnosti jednotlivých typů tlumičů je možno zjistit z dokumentů výrobce [1,2,3].

Frekvenční závislost vodorovné ekvivalentní tuhosti typu VES a typu VD znázorňuje obr. 3.3.2.



Obr. 3.3.2: Frekvenční závislost ekvivalentní tuhosti tlumičů VES (nahore) [1] a tlumičů VD [2] (dole); vodorovný směr

3.4 ANALÝZA KOMPLIKOVANÝCH POTRUBNÍCH SOUSTAV S VISKÓZNÍMI TLUMIČI

Prvotní intenzivní výzkumy v oblasti viskózních tlumičů začaly na počátku 90 let, tj. v době, kdy všechny československé elektrárny procházely procesem seizmického z odolňování. První práce se zejména soustředily k prokázání výhod viskózních tlumičů oproti jiným možnostem seizmického rozepření. Následovalo období hledání vhodného matematického popisu chování tlumiče a metod řešení dynamické odezvy potrubních soustav s tlumiči. Jedná se zejména o práce „GERB Viscous dampers in applications for pipelines and other components in Czechoslovak nuclear power plants“ [26,27], „Advantages of viscodampers for NPPs upgrading“ [28] a „Seismic analysis of safety-related piping systems for VVER type nuclear power plants. Problems and experience.“ [29].

V člancích „Seismic analysis of the safety related piping and PCLS of the WWER-440 NPP“ [30] a „Aseismic Design and Analysis of the Primary Coolant Loop and Safety Related Piping Systems of Russian Design NPP WWER-440“ [31] se jako nejvhodnější ukazuje popsat charakteristiky tlumiče čtyř-parametrovým Maxwellovým modelem a řešit soustavu metodou přímé integrace pohybových rovnic.

V publikacích „Seismic Design and Response of NPP Piping. Seismic Engineering Knowledge Transfer Seminar“ [32] a „Different Approaches for the Modelling of High Viscous Dampers in Piping Dynamic Analysis. Acceptable Limits for Simplifications“ [33], které souhrnně mapují možnosti řešení seizmické odezvy potrubních soustav s tlumiči, je ukázán konzervatismus metody spekter. Také se v publikacích upozorňuje na chyby, které mohou vzniknout při nesprávné aplikaci zjednodušujícího lineárního přístupu. Pro odhad pseudotuhosti soustavy autor sestavil iterační postup, který spočívá v nalezení linearizované tuhosti pomocí série výpočtů vlastních frekvencí při zohlednění očekávaného seizmického buzení.

V publikacích „Seismic Upgrading of WWER 440 and WWER 1000 Primary Coolant Loops by means of Viscous Dampers GERB“ [34] a „Modelování a seizmická analýza rozsáhlých těleso-potrubních systémů s frekvenčně závislými parametry“ [35] je představená zobecněná metoda spekter odezvy, která je také vhodná pro řešení seizmické odezvy potrubních soustav s tlumiči. Zároveň je v práci [34] demonstrována účinnost instalovaných tlumičů pomocí experimentální modální analýzy.

Pracovníci společnosti Siemens prezentují v publikacích „Dealing with raised seismic loads in WWER: Mathematical analysis and optimisation of pointwise damping in substructures and piping systems“ [36] a „Dynamic Analysis and Upgrading of Reactor Cooling Systems of VVER 440/213 (Paks) due to Seismic and Normal Operational Loading“ [37] vyvinutou „modal flow analysis“ metodu. Tato metoda umožňuje vybrat vhodný typ tlumiče a jeho optimální polohu v potrubí na základě série modálních analýz.

Ve výpočtových zprávách „Zpráva o výpočtu DPS 20R a DPS 1.20G - JE Temelín, Trasy: Hlavní cirkulační potrubí, vstřík do KO, přívod chladiwa do KO, parovody uvnitř hermetické zóny, napájení uvnitř HZ, havarijní napájení uvnitř HZ“ [38], „Seismic Analysis of Main Safety - related Class I and II Pipings Located in the Reactor Hall (NPP Temelín)“ [39], Evaluation of Seismic Capacity of the Temelin NPP Primary Coolant Loop System for substitution of VES dampers to VD type“ [40], „Průkazy pevnosti, seismické odolnosti a životnosti, systém JEC, Prováděcí projekt DPS 3.01.07, Dostavba 3 a 4 bloku EMO“ [41] a „Statický, dilatační a seismický výpočet potrubí DPS 1.20R a 1.20G uvnitř hermetické zóny s novým typem tlumičů GERB při teplotě 20°C v ochranné obálce pro HVB1 ETE“ [24] je posuzována statická a seismická odolnost potrubí a komponent I.O., jsou stanoveny účinky do stavby a síly a momenty na navazující komponenty. Výpočty seismické odezvy jsou realizovány buď metodou spekter odezvy s linearizovaným modelem tlumičů, nebo přímou integrací pohybových rovnic s tlumiči popsanými Maxwellovým čtyř-parametrovým modelem.

Potrubní tlumiče nebyly původně vytvořeny pro snížení seismické odezvy potrubí, ale pro utlumení potrubí při provozních vibracích. Tato aplikace tlumičů je předvedena v článcích „Reduction of operational vibration of turbine steam inlet piping at Temelin NPP“ [42], „Optimization of a primary circuit of the nuclear power plant from the vibration point of view“ [43] a „Elimination of Chernobyl NPP Unit 3 Power Output Limitation Associated with High Main Steam Piping Flow Induced Vibrations“ [46].

Dynamické chování potrubních tras s tlumiči při nestacionárním proudění v potrubí KO-OV-HPV-BN bylo řešeno ve výpočtové zprávě „Jaderná elektrárna Mochovce, Dostavba 3. a 4. bloku. Průkazy pevnosti, seismické odolnosti a životnosti spojovacího potrubí KO-HPV-BN“ [44].

Tlumiče byly zahrnuty i při výpočtu hypotetického lomu vysokoenergetického potrubí při návrhu omezovačů švihu „Response of the steam generator VVER 1000 to a steam line break“ [45].

Zajímavá aplikace viskózních tlumičů v oblasti stavby je prezentována ve článcích „A New Method for Essential Reduction of Seismic and External Loads on NPP's Structures, Systems and Components“ [47] a „Adaptation of High Viscous Dampers (HVD) For Essential Decreasing of In-structure Floor Response Spectra“ [48]. Běžně se používají viskózní tlumiče k utlumení strojní technologie nebo potrubí při seismické nebo jiné havarijní dynamické události. Idea článků spočívá v použití tlumičů přímo v oblasti stavební konstrukce, a to ke snížení podlažního spektra odezvy, které slouží jako vstup pro seismické analýzy vnitřní technologie. V konečném důsledku se tak utlumí celé stavební podlaží, na kterém se technologie nachází.

4 ANALÝZA PROBLÉMU A VOLBA METOD ŘEŠENÍ

Z provedené rešeršní studie je zřejmé, že účinnost viskózních tlumičů byla prokázána dostatečně, a to jak výpočtovými [29,30,31,37], tak experimentálními metodami [34,42,46]. Zároveň bylo prezentováno, že tlumiče nejsou vhodné jenom pro utlumení seizmické odezvy, ale jsou vhodné i pro snížení libovolné dynamické odezvy [42,44,45,46].

Viskózní tlumiče jsou pravděpodobně nejvhodnější volbou pro utlumení seizmické odezvy značně dilatujících potrubí a komponent. Oproti jiným řešením seizmického kotvení poskytují tlumiče množství výhod [26,27,28]. Naopak největší nevýhodou viskózních tlumičů je výrazná frekvenční závislost tlumící a tuhostní charakteristiky [1,2,3], která komplikuje výpočtové modelování.

Seizmická odezva potrubí s viskózními tlumiči se nejčastěji řeší metodou lineárních spekter odezvy rozkladem do vlastních tvarů kmitání nebo přímou integrací pohybových rovnic. Kromě metody spekter odezvy a metody přímé integrace lze seizmickou odezvu potrubních soustav řešit i pomocí tzv. modal flow analýzy [36,37] nebo pomocí zobecněné metody spekter [34,35,43]. Modal flow metoda a zobecněná metoda spekter poskytují věrohodné výsledky seizmické odezvy potrubních soustav s viskózními tlumiči. Nicméně tyto metody nejsou součástí komerčních softwarových balíků pro výpočty napjatosti potrubí, a proto se v inženýrské praxi běžně nepoužívají.

V praxi je používána zejména metoda lineárních spekter odezvy, která je implementována v celé řadě softwarových balíků pro pevnostní výpočty potrubí (např. PIPESTRESS, AutoPIPE, CAESAR II, SYSPIPE, CAEPIPE,...). Při použití těchto programů můžeme očekávat velmi rychlou tvorbu výpočtového modelu, rychlý výpočet seizmické odezvy, snadnou kombinaci seizmické a statické odezvy systému, pohodlné vyhodnocení vnitřních sil a momentů v potrubí, účinků do uložení atd. Nelineární frekvenčně závislé tlumící charakteristiky tlumiče se při použití metody lineárních spekter odezvy musí zjednodušeně popsat pomocí lineární pružiny, tzv. pseudotuhosti.

K určení pseudotuhosti se využívá inženýrských odhadů nebo iteračních postupů [33]. Tyto postupy jsou bohužel vhodné pouze pro konstrukce s výrazně dominantními vlastními tvary buzené v úzkém pásmu frekvencí. Při aplikaci iteračního postupu na komplikované soustavy s množstvím podobně významných vlastních tvarů může dojít k nesprávnému odhadu pseudotuhosti a v důsledku i k chybnému výpočtu seizmické odezvy.

Pro řešení seizmické odezvy komplikovaných soustav se širokospektrálním buzením se jako vhodnější ukazuje metoda přímé integrace pohybových rovnic. Pro tento typ výpočtu je nutné zadat vstupní buzení většinou ve formě závislosti zrychlení na čase (akcelerogram) a popsat charakteristiky tlumiče nejčastěji nelineárním čtyř-parametrovým Maxwellovým rheologickým modelem. K řešení lze využít libovolný obecný konečnoprvkový software, např. ANSYS. Tvorba výpočtového modelu v prostředí ANSYS bude časově nepatrně náročnější než v prostředí specializovaných programů. Samotný výpočet přímou integrací

pohybových rovnic bude ve srovnání s metodou spekter odezvy značně náročnější. Lze očekávat i obtížné zpracování odezvy ve formě časové závislosti. Na druhou stranu je chování tlumičů popsáno dostatečně přesně, jsou tedy možné i variantové analýzy s cílem nalézt optimální řešení tlumení sledovaných systémů.

V současné době existují pouze dva specializované softwary pro pevnostní analýzu potrubí, které jsou schopny řešit seizmickou odezvu soustav s viskózními tlumiči metodou přímé integrace pohybových rovnic v čase. Jedná se o ruský program dPIPE a německý software ROHR2. Použitím jednoho z těchto dvou specializovaných programů bychom dokázali lehce splnit hlavní cíle disertační práce. Ani jedním z těchto programů ale nedisponujeme. Pro splnění cílů práce můžeme využít obecný konečnoprvkový systém ANSYS a specializovaný potrubní software AutoPIPE, které máme k dispozici.

Rešeršní studie také potvrdila očekávanou vlastnost metody spekter odezvy, a to její konzervativnost. Např. v [33] bylo na pěti úlohách předvedeno, že posuvy a síly v potrubí vypočtené metodou spekter odezvy jsou vždy větší než posuvy a síly vypočtené přímou integrací. Při výpočtu reakcí v tlumičích se metoda spekter ukázala jako konzervativní ve čtyřech z pěti případů. Samotná konzervativnost metody spekter odezvy by nemusela být výraznou nevýhodou, pokud by nebyla příliš vysoká a nevedla by k zbytečnému předimenzování konstrukce.

Při výpočtech seizmické odezvy komplikovaných potrubních soustav, které jsou složeny z potrubí a těžkých komponent (např. parogenerátoru), se ukazuje, že není problém splnit pevnostní kritéria potrubí, ale je problém s reakcemi ve viskózních tlumičích [33]. Tlumiče jsou většinou umístěny na komponentách a i malé množství tlumičů dokáže snížit seizmické posuvy komponenty a s tím související napětí v potrubí pod dovolené hodnoty. Reakce v tlumičích jsou ale větší, než které dovoluje jejich výrobce. Proto je nutné zvyšovat počet tlumičů s ohledem na jejich únosnost.

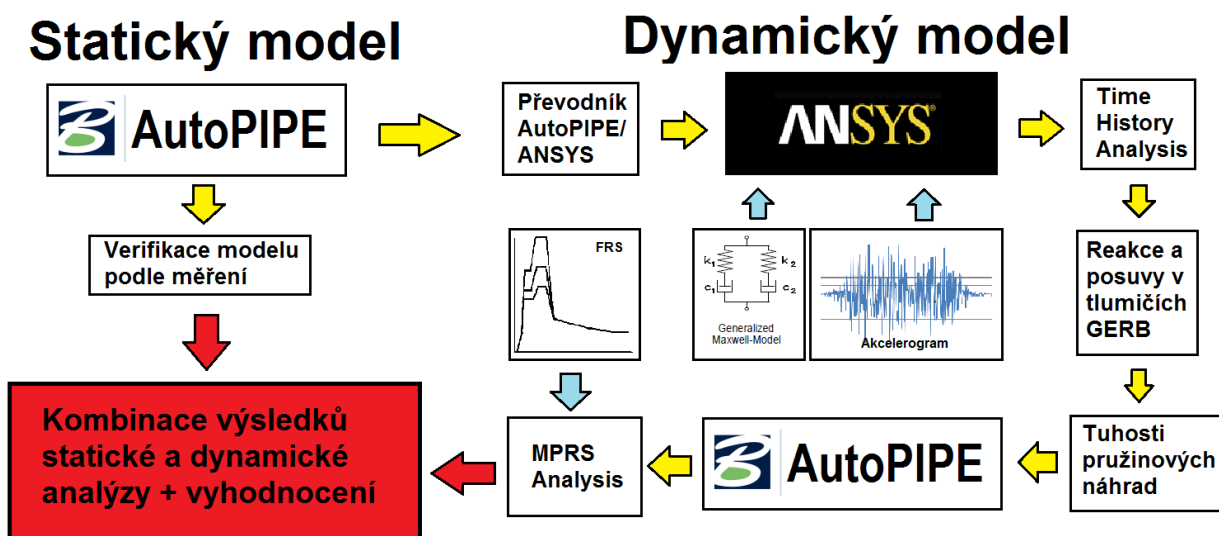
Tento poznatek v kombinaci s konzervativností metody spekter odezvy vede k jednoduché úvaze - čím konzervativněji budou stanoveny reakce v tlumičích, tím více tlumičů bude nutno instalovat. Z důvodu nezanedbatelné ceny viskózních tlumičů by proto bylo vhodné stanovit reakce v tlumiči co možná nejpřesněji. Zvýšená míra konzervatismu při stanovení posuvů potrubí nebo napjatosti v potrubí se nejeví problematicky, protože rozhodujícím prvkem z hlediska návrhu počtu tlumičů bude jejich únosnost.

Při zpracování rešeršní studie bylo nalezeno dostatečné množství podkladů, podle kterých můžeme verifikovat vytvářenou metodiku. Jsou k dispozici experimentálně a výpočtově stanovené vlastní frekvence hlavních cirkulačních potrubí JE typu VVER 1000 MW a VVER 440 MW [26,27,30,31,34,35,41]. V některých případech lze srovnávat napjatost v potrubí, posuvy nebo reakce v uloženích [30,37,40,41]. K dispozici jsou také pseudotuhosti, které byly použity při výpočtu seizmické odezvy metodou spekter odezvy [41,44].

5 PREZENTACE VYTVOŘENÉ METODIKY

Ke splnění cílů práce je nutné vytvořit metodický postup, pomocí kterého budeme schopni rychle a dostatečně přesně stanovit seizmickou odezvu komplikovaných potrubních soustav s viskózními tlumiči.

Základní ideou je využití pozitivních vlastností dvou nejčastěji používaných metod pro stanovení seizmické odezvy potrubních soustav, tedy metody spekter odezvy a metody přímé integrace pohybových rovnic. Kombinace metod bude realizována pomocí vzájemného propojení dvou dostupných výpočtových systémů, a to obecného konečnoprvkového systému ANSYS a specializovaného systému pro výpočet napjatosti potrubí Bentley AutoPIPE. Schéma vytvořeného postupu je znázorněno na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Schéma postupu

Pro vypracování výpočtového modelu potrubní soustavy se použije specializovaný program AutoPIPE a zjistí se statická odezva. Následně se provede verifikace statického modelu s experimentálním měřením, pokud je měření k dispozici. Využije se otevřené struktury obou programů a pomocí vytvořeného převodníku v programovacím jazyku Python se výpočtový model převede do obecného konečnoprvkového systému ANSYS.

Viskózní tlumiče se zde popíší 4-parametrovým Maxwellovým rheologickým modelem a pomocí přímé integrace pohybových rovnic se vyřeší odezva na seizmické buzení zadané syntetickými akcelerogramy. Z vypočtených výsledků reakcí a posuvů se pomocí statistického rozboru určí tuhosti pružinových náhrad tlumičů (tzv. pseudotuhosti). Výpočtový model v prostředí AutoPIPE se doplní o stanovené pseudotuhosti a provede se výpočet seizmické odezvy pomocí metody spekter odezvy.

Následuje kombinace výsledků statické a dynamické analýzy, vyhodnocení a posouzení výsledků podle pevnostních norem pomocí předzpracovaných knihoven a tvorba dokumentace.

Prezentovaný postup se může jevit složitý, nicméně poskytuje celou řadu výhod. Postupem získáme přesnější výsledky oproti běžnému řešení metodou spekter odezvy s inženýrským nebo iteračním odhadem pseudotuhosti. Stanovení pružinových náhrad je totiž realizováno na základě výpočtu, který zohledňuje jak samotné buzení, tak dynamické charakteristiky systému. Potenciální chyby způsobené nesprávným odhadem pseudotuhosti tlumiče jsou tak eliminovány.

Oproti kompletnímu řešení statické a seizmické odezvy v programu ANSYS je navrhovaný postup rychlejší. Pro stanovení pružinových náhrad jsou nezbytné pouze reakce a posuvy v uzlech představující tlumiče. Ostatní běžně potřebné veličiny seizmické odezvy (síly a momenty v potrubí, napjatost a posuvy v potrubí atd.) není nutné znát. Nezanedbatelnou časovou úsporou dosáhneme také ve stádiu posouzení konstrukce vzhledem k pevnostním normám. V programu AutoPIPE je implementováno množství zahraničních pevnostních standardů, a proto je fáze posouzení výsledků výrazně ulehčena.

Neopomenutelnou výhodou je i znalost míry konzervatismu řešení. Na základě reakcí a posuvů v tlumiči můžeme stanovit, jakým způsobem nadhodnocuje metoda spekter odezvy výsledky seizmické analýzy. Výsledky reakcí v tlumičích získané metodou přímé integrace mohou sloužit pro optimální návrh počtu použitých tlumičů. Nedojde tedy ke zbytečnému předdimenzování konstrukce.

Samozřejmostí jsou i jisté nevýhody. Největší nevýhodou navrhované metodiky je nutnost provést v podstatě dvakrát výpočet seizmické odezvy. Nejprve se výpočet realizuje metodou přímé integrace pohybových rovnic k určení tuhosti pružinových náhrad tlumiče a pro kontrolu únosnosti tlumiče. Druhým výpočtem metodou spekter odezvy se stanoví deformace a napjatost v řešeném potrubí pro hodnocení pevnosti podle požadovaných norem.

Z důvodů jisté časové náročnosti není metodika vhodná pro jednoduché potrubní soustavy s tlumiči. Použití metodiky postrádá smysl při řešení potrubních soustav, u kterých lze stanovit tuhost pružinové náhrady tlumiče přesně, a u kterých není překážkou přílišná konzervativnost metody spekter odezvy.

V následujících podkapitolách jsou detailněji popsány jednotlivé dílčí části metodiky. Pozornost je věnována především specifickým oblastem, které nejsou v inženýrské praxi rutinně řešeny. Jedná se o problematiku stanovení parametrů pro rheologický model tlumiče, problematiku generování syntetických akcelerogramů a o popis struktury vzájemného propojení použitých programů.

5.1 SESTAVENÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU PRO STATICOU ÚLOHU V PROGRAMU AUTOPIPE

Program AutoPIPE americké společnosti Bentley je jedním z celosvětově nejrozšířenějších programů pro analýzu potrubních soustav v klasické energetice, plynárenství, těžebním průmyslu a jaderné energetice. Grafické prostředí ve stylu CAD je přehledné a intuitivní.

Modelování je realizováno postupným vkládáním jednotlivých objektů, které představují jednotlivé potrubní prvky (např. rovné potrubní úseky, kolena, t-kusy,

přechody, armatury, hmotné body, uložení, svary atd.). Jednotlivé objekty je možno snadno editovat pomocí vloženého tabulkového rozhraní.

Výpočtový model potrubních soustav se v prostředí AutoPIPE vytváří na základě výkresové dokumentace, nejčastěji axonometrie potrubí. Modelování si lze představit jako postupné přidávání dílčích potrubních úseků a ostatních prvků potrubí. Potrubí jsou v programu definována střednicí, průřezovými charakteristikami a zatížením. Výpočtový model je většinou ohraničen pevným bodem (např. stavební průchodkou nebo hrdlem komponenty).

S výhodou lze využít částečný import střednic a průřezových charakteristik potrubního modelu z Plant Design Management Systému (PDMS), což je multidisciplinární CAD prostředí pro projektanty průmyslových celků. Toto prostředí se již standardně využívá v rámci projektu nových elektráren a obsahuje geometrické informace o strojní technologii, stavbě, elektroinstalaci nebo vzduchotechnice.

Po zatížení statického modelu vnitřním tlakem, teplotními poli a gravitačním zrychlením lze porovnat vypočtená napětí s jejich dovolenými hodnotami, které stanovují normy [8] nebo [9]. Zároveň lze porovnat vypočtené deformace modelu s provozním měřením, pokud je takové měření k dispozici. Nejdůležitější potrubní soustavy v JE, jako jsou hlavní cirkulační potrubí, jsou osazeny snímači posuvů, které zaznamenávají polohu potrubí nebo komponent. Tyto změřené posuvy mohou sloužit k verifikaci výpočtového modelu. Popřípadě je vhodné porovnat dosažené výsledky deformací s výsledky analýz ostatních autorů, jak je ukázáno např. v [24]. Kromě samotných posuvů jsou často vypovídající i reakce vypočtené v potrubních uloženích.

Po verifikaci statického modelu následuje vytvoření modelu pro seizmickou analýzu. Dynamický model se od statického modelu liší především aplikovaným zatížením. Verifikaci dynamického modelu lze provést pomocí srovnání vypočtených a experimentálně stanovených vlastních frekvencí potrubí, pokud je ovšem takové měření k dispozici. Pokud nejsou experimentální data k dispozici, lze výsledky vlastních frekvencí a tvarů porovnávat s výsledky jiných autorů.

5.2 POPIS VZÁJEMNÉHO PROPOJENÍ VÝPOČTOVÝCH SYSTÉMŮ

Cílem tohoto dílčího kroku je přenos výpočtového modelu z prostředí AutoPIPE do prostředí ANSYS. K tomu se využije otevřená struktura obou programů a pomocí vytvořeného převodníku v programovacím jazyku Python se výpočtový model převede.

Veškeré informace o výpočtovém modelu jsou v programu AutoPIPE uloženy ve formě tabulek. Vstupní data jsou tak snadno editovatelná a kopírovatelná mimo prostředí programu. Toho využívá i vytvořený převodník.

V prvním kroku se vykopírují níže uvedené listy tabulek z programu AutoPIPE a uloží se ve formátu „.csv“:

- „Anchor“ – nese informace o tuhostech pevných bodů a hrdel komponent,
- „Bend“ – nese informace o zaoblení kolen,
- „Pipe properties“ – nese informace o průřezových charakteristikách potrubí, včetně informací o materiálu,
- „Point“ – obsahuje polohu jednotlivých uzlů modelu,
- „Pres-temp-pipe-ID“ – obsahuje informace o zatížení tlakem a teplotami,
- „Reducer“ – obsahuje informace o geometrii potrubních redukci,
- „Support“ – nese informace o typech, tuhostech a případně předpětích jednotlivých uložení,
- „Valve“ – obsahuje informace o hmotnostech armatur, včetně hmotností a vyložení pohonů,
- „Weight“ – nese informace o poloze a hmotnosti hmotných bodů.

Informace z tabulek jsou postupně načítány a zpracovávány procedurou vytvořenou v programu Python. Procedura ve výsledku zapisuje geometrická a materiálová data do externího souboru ve formátu jazyka APDL, který využívá program ANSYS.

Po definici použitých konečných prvků (pro rovné úseky je použit prvek „PIPE289“, pro oblouky prvek „ELBOW290“, pro hmotné body prvek „MASS21“, pro uložení prvek „COMBIN14“) je vytvořena databáze materiálových charakteristik. Pro všechny materiály je uvažován lineární izotropní model materiálu. Následuje vytvoření „Keypointů“, které představují základní geometrii a definování průřezových charakteristik potrubí příkazem „SECTION“. Vytvořené „Keypointy“ jsou pospojovány rovnými úsečkami. Případné oblouky a kolena jsou v následujícím kroku zaoblena příkazem „FILLET“. Tímto krokem je dokončena konstrukce střednice potrubního úseku. Dále jsou vytvořeny armatury a přechodové úseky potrubí. Zbývá vytvořit model potrubního uložení pomocí pružinových elementů „COMBIN“ a zanést do modelu hmotné body prvkem „MASS“. Vytvoření výpočtového modelu v programu ANSYS se poté realizuje pouhým importem předpřipraveného externího souboru.

Obdobný postup by bylo možné použít i u jiných specializovaných potrubních softwarů než je AutoPIPE. Většina programů pro výpočty potrubí pracuje s daty v tabulkovém nebo jiném textovém formátu. Případná adaptace převodníku na jiné softwarové balíky je pouze otázkou programovací zručnosti.

5.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ PRO MAXWELLŮV RHEOLOGICKÝ MODEL TLLUMIČE

Mnohé odborné publikace ukázaly, že nelineární frekvenčně závislé charakteristiky viskózních tlumičů lze pro praktické aplikace vhodně popsat 4-parametrovým Maxwellovým rheologickým modelem (někdy také označován jako zdvojený Maxwellův model).

Tento model si lze představit jako dva paralelně spojené řetězce, kde každý řetězec představuje sériově spojenou pružinu s ideálním viskózním tlumičem.

V prostředí programu ANSYS lze velice jednoduše takový model sestavit pomocí konečných prvků „COMBIN14“. Tlumič je v prostoru modelován celkem dvanácti prvky, kdy pro každý ortogonální směr jsou použity dvě pružiny a dva ideální tlumiče. Základní úlohou je stanovení číselné hodnoty tuhosti pružin a koeficientu viskózního tlumení. Tyto parametry je možné získat více způsoby.

Některé materiály výrobce tlumičů potřebnou čtveřici parametrů pro Maxwellův model obsahují [2,3]. Tyto parametry jsou uváděny v různých formátech, takže před aplikací v programu ANSYS je nutné provést jejich úpravu nebo přepočítání. Používané označení parametrů výrobcem je však značně matoucí. Např. výrobce označuje tuhosti pružiny písmenem c a koeficient tlumení písmenem k .

Výrobce stanovuje parametry Maxwellova modelu podle postupu, který je detailně vysvětlen v článku [33]. Vychází se z experimentálně stanovených křivek představujících elastickou a viskózní část chování tlumiče v závislosti na frekvenci. Součet těchto křivek pod odmocninou představuje frekvenčně závislou křivku ekvivalentní tuhosti tlumiče.

Elastickou část jsme schopni popsat rovnicí:

$$C_e = C_1(\omega/\omega_1)^2/(1 + (\omega/\omega_1)^2) + C_2(\omega/\omega_2)^2/(1 + (\omega/\omega_2)^2)$$

A viskózní část rovnicí:

$$C_v = C_1(\omega/\omega_1)/(1 + (\omega/\omega_1)^2) + C_2(\omega/\omega_2)/(1 + (\omega/\omega_2)^2)$$

kde: $\omega_1 = C_1/K_1$ a $\omega_2 = C_2/K_2$

C představuje tuhost pružiny a K koeficient tlumení

Při znalosti experimentálních dat ve formátu $\{\omega^i, C_e^i, C_v^i, i = 1, 2, \dots, N\}$ můžeme sestavit cílovou funkci $S = \sum((C_e^i - C_e(\omega)^i)^2 + (C_v^i - C_v(\omega)^i)^2)$, kterou následně minimalizujeme. Tímto způsobem jsme schopni získat čtveřici hledaných parametrů. K řešení lze využít např. proceduru „řešitel“ v programu Microsoft Office Excel.

V některých případech nejsou k dispozici data popisující elastické a viskózní charakteristiky tlumiče, ale pouze souhrnná křivka popisující celkovou ekvivalentní tuhost (např. obr. 3.3.2). V takovém případě je nutné Maxwellovy parametry tlumiče nalézt výpočtově v prostředí ANSYS pomocí optimalizace výsledků harmonické analýzy v předem určených budících frekvencích.

5.4 GENEROVÁNÍ SYNTETICKÝCH AKCELEROGRAMŮ

Pro výpočet seizmické odezvy metodou přímé integrace pohybových rovnic je nutné výpočtový model zatížit průběhem kinematické veličiny v čase. Nejčastěji se využívá zatížení časově proměnným průběhem zrychlení, tzv. akceleroqramem. Akceleroqram se generuje uměle (synteticky) ze zadaného seizmického spektra zrychlení. Buzení ve formě akceleroqramu se častěji než při výpočtech, využívá při seizmické kvalifikační zkoušce, kde slouží jako zadání pro testovací vibrační stolicí.

Problematika generování syntetických akcelerogramů je komplexní a u nás se jí autoři příliš nevěnují. Výjimkou je dizertační práce Ing. Čady s názvem „Vliv technické a přírodní seizmicity na stavební konstrukce se zaměřením na konstrukce ze zdících materiálů“ [49]. Autor se problematice generování akcelerogramů věnuje podrobně a navrhuje některá vylepšení v současnosti používaných algoritmech.

Většina používaných algoritmů pro syntetizaci akcelerogramů vychází z práce Gaspariniho a Vanmarcka „Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra“ [50]. Na základě této práce vznikl i komerční program SIMQKE [51], který je stále využíván. Někteří autoři si původní algoritmy Gaspariniho a Vanmarcka upravili, dodali některá vylepšení a dále publikovali. Za pozornost stojí práce Dr. Lestuzzi z EPFL v Lausanne, který vytvořil a k volnému užití poskytl program ke generování syntetických akcelerogramů pojmenovaný SimSeisme [52]. Program SimSeisme vychází ze známého SIMQKE a je možné jej spustit v rozhraní programu Matlab nebo Octave.

Generováním syntetických akcelerogramů se zabývá i celá řada zahraničních metodik a předpisů (např. [14] až [19]). Tyto metodiky kladou na postup stanovení syntetických akcelerogramů určité požadavky.

Základním požadavkem je, aby spektrum odezvy sestrojené z vygenerovaných akcelerogramů shora obalovalo cílové spektrum odezvy [18,19]. Není dovoleno, aby pod cílové spektrum padlo více než 10 % bodů ze spektra spočteného ze syntetických akcelerogramů (viz obr. 3.2.2).

Dalším požadavkem je, aby frekvenční intervaly, ve kterých jsou vypočteny spektrální hodnoty, byly dostatečně podrobné [18].

Aby bylo možné považovat seizmické buzení za statisticky nezávislé, absolutní hodnoty směrových korelačních koeficientů jednotlivých syntetických akcelerogramů by měly být nižší než 0,3 [15].

Dále se požaduje, aby časový průběh budících akcelerogramů byl dostatečně dlouhý. Zejména aby část, kde se vyskytují nejsilnější pohyby, nebyla kratší než 10 s [18]. Syntetické akcelerogramy mají také být vystředěné [19] a jejich časový průběh má být vygenerován s dostatečně malým časovým krokem [15].

5.5 VÝPOČET SEIZMICKÉ ODEZVY METODOU PŘÍMÉ INTEGRACE V PROGRAMU ANSYS

Přímou integraci pohybových rovnic pro stanovení seizmické odezvy je nutné použít v těch případech, kdy není možné využít přibližné metody spekter odezvy z důvodu nelinearity soustavy nebo neproporcionálního útlumu, nebo je-li záměrem odhalit rezervy v dynamické odezvě řešené soustavy.

Seizmická odezva je řešena Newmarkovou integrační metodou s konstantním časovým krokem o velikosti přibližně 0,001 s. Ukládány jsou pouze výsledky posuvů a reakcí v uzlech představující tlumiče.

5.6 URČENÍ TUHOSTI PRUŽINOVÝCH NÁHRAD

Z vypočtených reakcí a posuvů se stanoví řada pseudotuhostí jednotlivých tlumičů, a to jako podíl reakce k posuvu ve všech časových krocích výpočtu. Vypočtené pseudotuhosti se zaokrouhlí na celé stovky, případně tisícovky a následně zpracují statisticky.

Jako vhodným statistickým parametrem při určení náhradní lineární tuhosti tlumičů se jeví medián, který představuje hodnotu, která dělí řadu seřazených výsledků na dvě stejně početné poloviny. Zjevnou výhodou je fakt, že medián není zatížen extrémními hodnotami.

Hodnoty pseudotuhosti, které budou sloužit pro následný výpočet pomocí spekter odezvy, je možno určit i na základě rozložení četnosti pseudotuhostí ve zkoumaném vzorku. Očekává se, že nejčetnější hodnoty se budou blížit hodnotám mediánovým.

5.7 VÝPOČET SEIZMICKÉ ODEZVY METODOU SPEKTER V PROGRAMU AUTOPIPE

V programu AutoPIPE se popíše vlastnosti tlumiče pomocí pružinového prvku s pseudotuhostí určenou v předchozím kroku. Následuje výpočet vlastních frekvencí a tvarů do frekvence minimálně 35 Hz, na který naváže výpočet seizmické odezvy metodou spekter odezvy.

Kombinování modálních odezev se provede metodou CQC. Kombinování jednotlivých prostorových odezev bude realizováno podle pravidla SRSS. V uvedených analýzách se nejčastěji uvažuje kritické tlumení o hodnotě 4-5 %. Případný vliv nedostatečně vykmitané hmoty nad úrovní 35 Hz se zohlední pomocí „missing mass“ korekce.

5.8 KOMBINACE STATICKÉ A DYNAMICKÉ ODEZVY A VYHODNOCENÍ

Princip hodnocení seizmické odolnosti podle normativních předpisů [4,5] předpokládá kombinaci účinků statické a dynamické odezvy a jejich společné hodnocení vůči předepsaným limitám. Tento přístup má historický základ a dovoluje tak konstrukcím, které mají významnější rezervy vůči statickému zatížení přenést zvýšené dynamické zatížení.

Stanovená odezva na seizmický děj úrovně MVZ se následně kombinuje s odezvou statického modelu při NPP, a to ve dvou krocích. Protože výsledky seizmické odezvy jsou z principu použité metody spekter vždy kladné, seizmická odezva se na statickou odezvu superponuje. V prvním kroku se odezvy sčítají, ve druhém kroku se seizmická odezva odečte od statické odezvy. Z těchto dvou kombinací se pro hodnocení vybere takový stav, kdy vypočtená veličina (napětí, deformace, reakce,...) dosahuje extrému.

6 APLIKACE VYTVOŘENÉ METODIKY NA ÚLOHÁCH PRAXE

Vytvořená metodika je ověřena na úlohách stanovení seizmické odezvy hlavních cirkulačních potrubí (HCP) a potrubí kompenzace objemu JE typu VVER 1000 MW a VVER 440 MW.

Z důvodu omezeného rozsahu těchto tezí je dále prezentován pouze výpočet seizmické odezvy smyček HCP typu VVER 440 MW.

6.1 STRUČNÝ POPIS ŘEŠENÉ SOUSTAVY

System chlazení reaktoru typu VVER 440 MW tvoří šest smyček hlavního cirkulačního potrubí propojující reaktor s parogenerátory (PG), šest hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ), potrubí propojující HCP se systémem kompenzace objemu a potrubí páry.

Teplo vytvořené v reaktoru se přenáší chladičem primárního okruhu (I.O.) přes hlavní uzavírací armaturu (HUA) do PG. PG jsou zařazeny do šesti smyček I.O. jako výměníky, které slouží k přenosu tepelné energie do II.O. V parogenerátoru se generuje sytá pára, která se odvádí potrubím k turbínám. Chladícím médiem a zároveň moderátorem je chemicky čištěná voda s koncentrací kyseliny borité.

Při průchodu trubkovým svazkem PG předá chladič teplo napájecí vodě II.O. a po ochlazení vstupuje do studeného kolektoru a dále do studené větve smyčky a přes HCČ a HUA zpět do reaktoru.

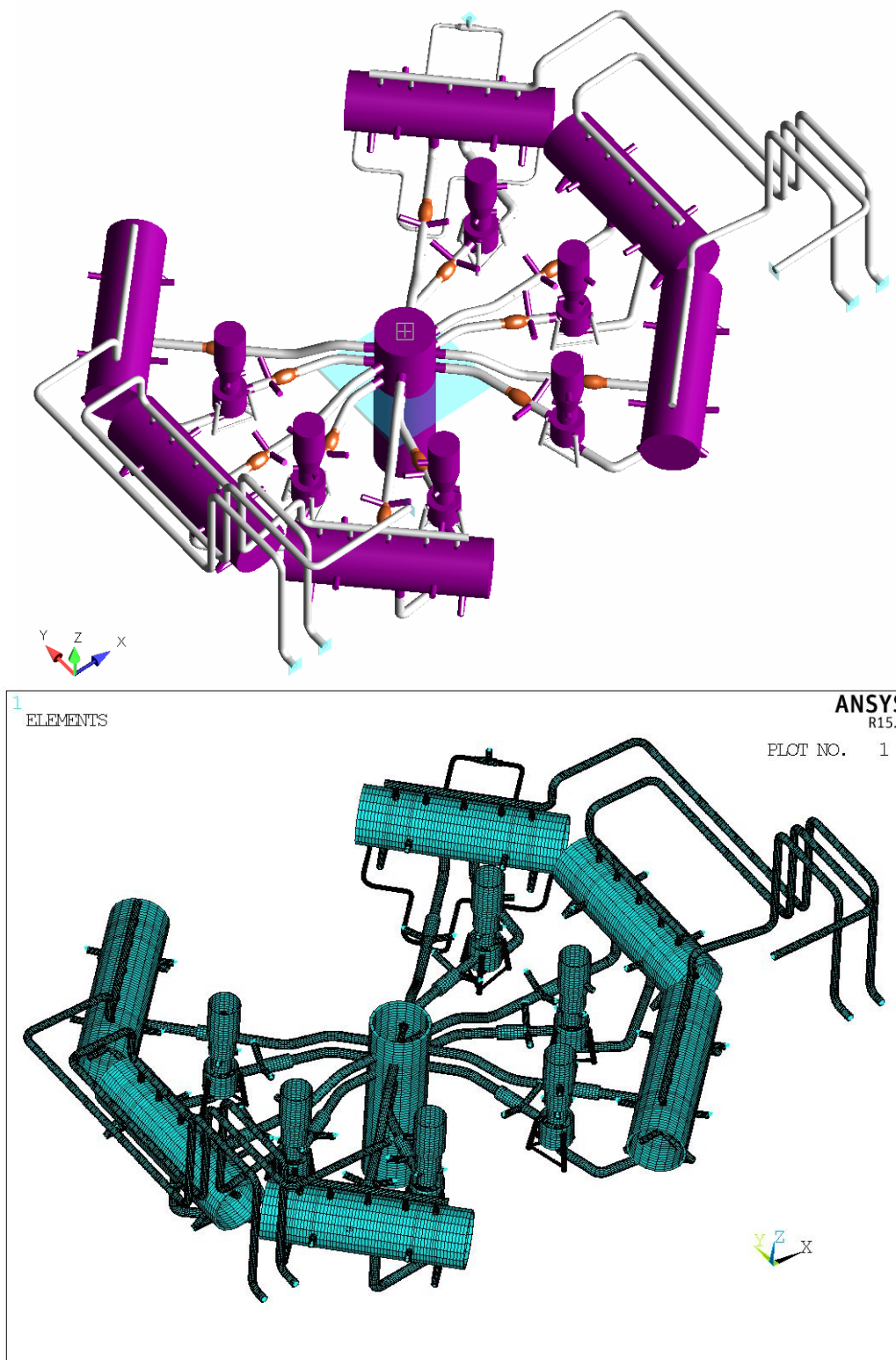
HCP a komponenty I.O. jsou nezbytnou součástí JE a je nutné zajistit jejich funkčnost i během seizmické události. K tomu účelu jsou použity viskózní tlumiče typu VD společnosti GERB. Na každém PG je umístěno 6 tlumičů VD-630/426-15, 4 na plášti a 2 na podpěrách. Tři tlumiče VD-426/219-15 jsou umístěny na každém HCČ. Ke každé HUA jsou připojeny dva tlumiče VD-325/159-15.

6.2 VÝPOČTOVÝ MODEL A JEHO ZATÍŽENÍ

Výpočtový konečnoprvkový model smyček VVER 440 MW byl vytvořen v programovém systému AutoPIPE. Všechna potrubí jsou modelována pomocí potrubních a ohybových prvků. Geometrický tvar potrubních tras byl vytvořen podle dostupné výkresové dokumentace. Materiálem hlavních cirkulačních potrubí je austenit, parovody a parogenerátory jsou vyrobeny z uhlíkové oceli.

Ve výpočtovém modelu je PG s vahou 224 t modelován dvoumotově. HCČ je modelováno pomocí trojice hmot, s celkovou vahou cca 51 t. HUA váží celkově 6,12 t. Do uvedených hmotností jsou již zahrnuty hmotnosti izolací a provozních tekutin daných komponent. PG je zavěšen na čtyřech kloubových závěsech o délce 7,4 m s podélnou tuhostí 280 kN/m. Tlaková nádoba reaktoru (TNR) je modelována pomocí prutových prvků a je uvažována její teplotní roztažnost v osovém i radiálním směru.

Prostorové uspořádání hlavního cirkulačního potrubí (HCP), komponent primárního okruhu a potrubí sekundárního okruhu je patrné z obr. 6.2.1.



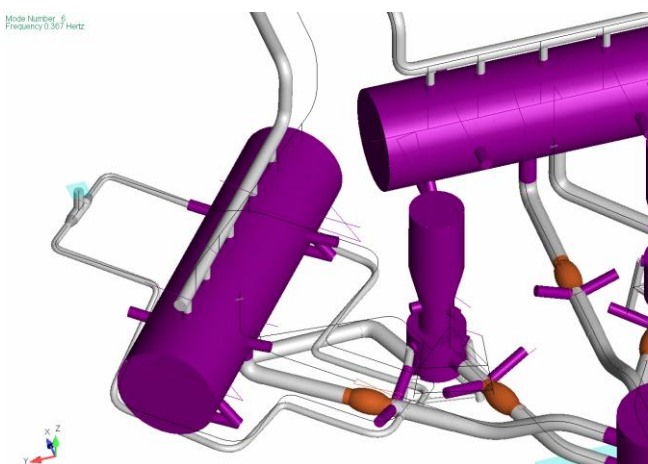
Obr. 6.2.1: Prostorové uspořádání výpočtového modelu v programu AutoPIPE (nahore) a jemu odpovídající převedený model v programu ANSYS (dole)

Pro statický výpočet posuzovaných potrubních tras bylo zvoleno zatížení v souladu s průkaznou dokumentací [41]. HCP a navazující potrubní trasy jsou v dynamické analýze v programu AutoPIPE zatíženy maximálním výpočtovým zemětřesením (MVZ) v souladu s požadavky metodiky [5]. Zatěžující parametry

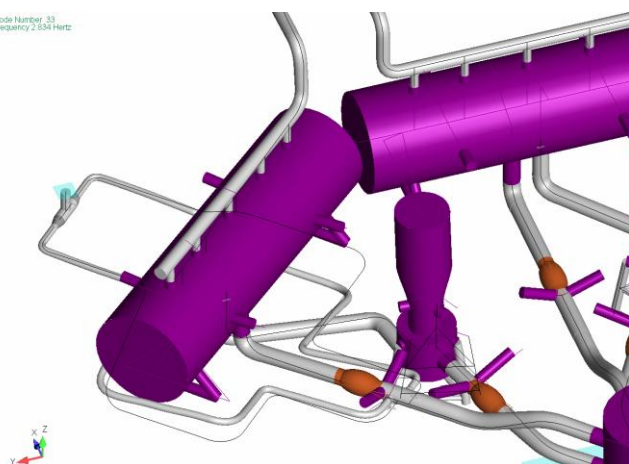
popisují vyhlazená spektra, která jsou převzata ze seizmického zadání [22]. V analýze je uvažován kritický útlum o hodnotě 4 %. Uvedeným spektrům odezvy odpovídají vygenerované syntetické akcelerogramy o délce 16,384 s.

6.3 VLASTNÍ FREKVENCE A VLASTNÍ TVARY SMYČKY BEZ TLUMIČŮ

Protože se jednotlivé smyčky HCP chovají z hlediska vlastních tvarů velice podobně, bude postačovat prezentovat vlastní tvary pouze jedné smyčky. Vybrané vlastní tvary netlumené 1. smyčky jsou znázorněny na obr. 6.3.1 a 6.3.2.



Obr. 6.3.1: Vlastní tvar – 0,37 Hz



Obr. 6.3.2: Vlastní tvar – 2,83 Hz

Při stanovení prvního významného netlumeného tvaru kmitu smyčky, která představuje kyvadlový pohyb PG na frekvenci 0,37 Hz, bylo dosaženo shody s modálními výpočty ostatních autorů [26,27,30,31].

6.4 VÝPOČET SEIZMICKÉ ODEZVY A STANOVENÍ TUHOSTI PRUŽINOVÝCH NÁHRAD

Po vytvoření statického modelu v systému AutoPIPE, následovalo přenesení výpočtového modelu do systému ANSYS. Výpočtový model byl doplněn o Maxwellovy modely tlumičů a zatížen trojicí navzájem kolmých akcelerogramů. Tyto akcelerogramy dlouhé 16,384 s byly vygenerovány tak, aby jejich odezvovalá spektra aproximovala zadaná spektra z metodiky [22]. Přímá integrace pohybových rovnic byla provedena s časovým krokem $\Delta t=0,001s$. Z výsledků přímé integrace pohybových rovnic byly zjištěny reakce v tlumičích a také jejich posuvy během seizmické události.

Z vypočtených reakcí a posuvů se stanoví soubor pseudotuhostí jednotlivých tlumičů, a to jako podíl reakce a posuvu ve všech časových krocích výpočtu. Vypočtené pseudotuhosti se zaokrouhlí na celé stovky, případně tisícovky a následně zpracují statisticky. Výstupem budou mediánové hodnoty pseudotuhostí ve vybraných tlumičích (viz tab. 6.4.1).

Tab. 6.4.1: Stanovené mediánové hodnoty pseudotuhostí

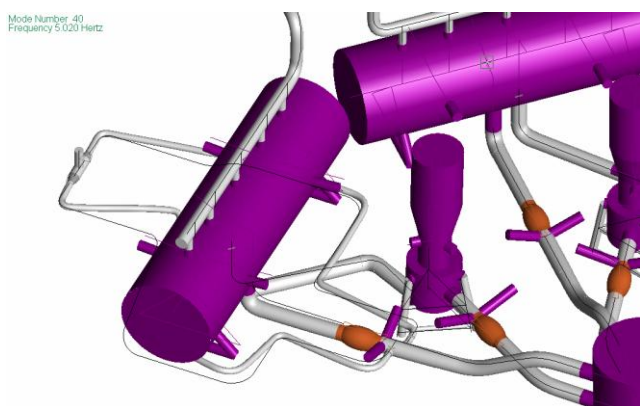
Místo tlumiče	Mediánové hodnoty pseudotuhostí [kN/mm]		
	Směr X	Směr Y	Směr Z
Tlumiče na PG	38,3 – 40,6	36,6 – 38,6	13,4 – 15,9
Tlumiče na HCČ	2,23 – 2,45	1,87 – 1,89	0 *)
Tlumiče na HUA	1,52 – 2,41	1,53 – 1,76	0,57 – 1,04

*) Svislé tuhosti tlumičů se z důvodu speciálního uložení HCČ uvažují nulové.

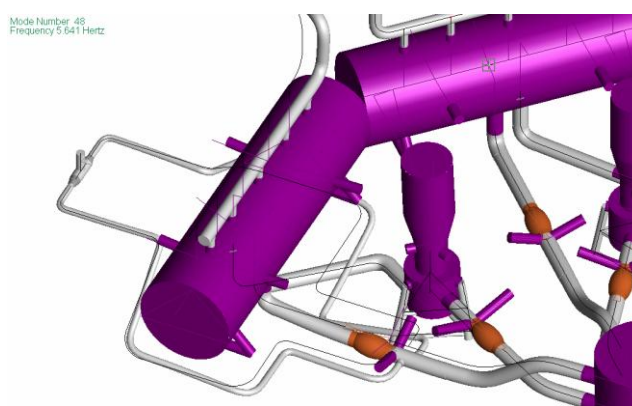
Získané hodnoty pseudotuhostí lze porovnat s výsledky výpočtové zprávy [41], kde byly pseudotuhosti stanoveny inženýrským odhadem. Ze srovnání je patrné, že tuhosti ve výpočtové zprávě se liší přibližně o 20 % v případě tlumičů na PG a až o 40 % v případě HCČ a HUA.

6.5 VLASTNÍ FREKVENCE A VLASTNÍ TVARY SMYČKY S TLUMIČI

Vybrané vlastní tvary tlumených smyček a jím odpovídající frekvence jsou zobrazeny na obr. 6.5.1 a 6.5.2.



Obr. 6.5.1: Vlastní tvar – 5,02 Hz



Obr. 6.5.2: Vlastní tvar – 5,64 Hz

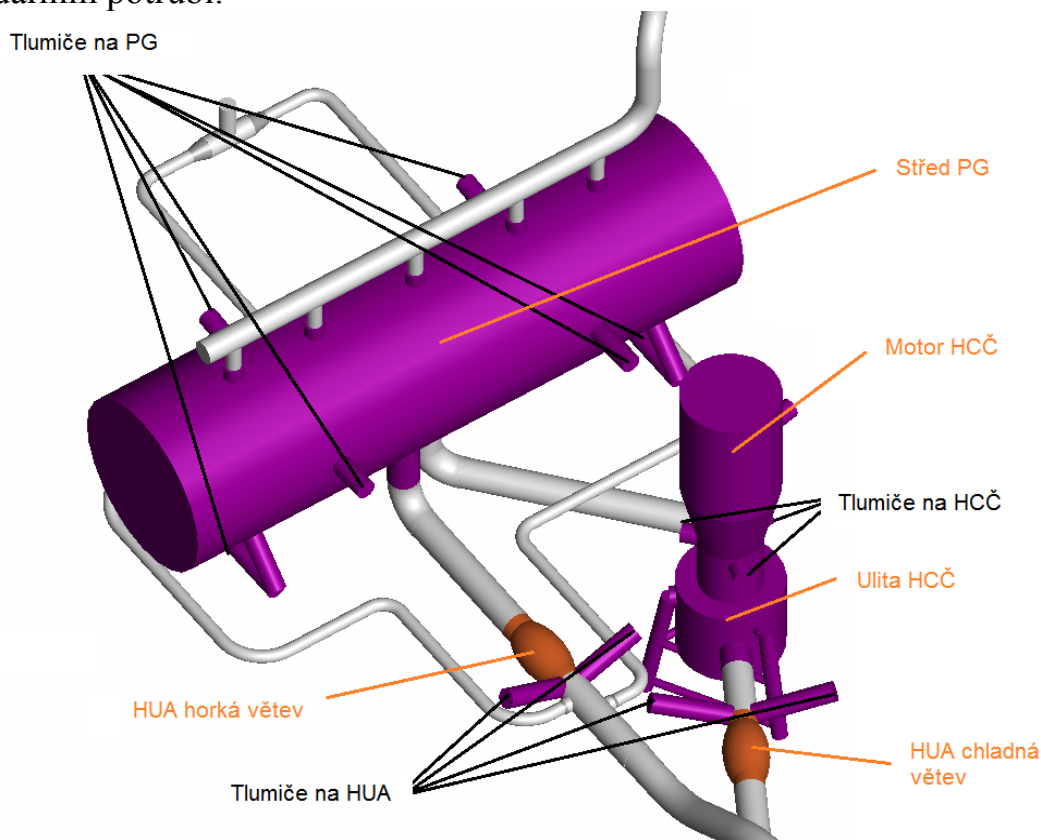
Aplikací tlumičů se vlastní frekvence zvyšují a soustava se vyztužuje. Kyvadlový tvar kmitu PG na frekvenci 5,02 Hz přestává být dominantním. Určujícím tvarem se stává tvar na frekvenci 5,64 Hz.

6.6 POSUVY SMYČKY PŘI SEIZMICKÉM DĚJI A REAKCE V TLUMIČÍCH

Po předcházející modální analýze následuje výpočet seizmické odezvy s použitím obalových spekter odezvy. V zájmových bodech smyčky HCP, které jsou vyznačeny na obr. 6.6.1, byly zjištěny extrémní hodnoty posuvů potrubí s a bez tlumičů, a to při použití různých metod pro stanovení seizmické odezvy soustavy (viz tab. 6.6.1).

Jak je zřejmé z tabulky, posuvy v bodech zájmu netlumené smyčky jsou výrazně vyšší, než posuvy určené výpočtem pro smyčku osazenou viskózními tlumiči. Střed netlumeného parogenerátoru se při seizmické události pohybuje téměř o 400 mm.

Je nutné poznamenat, že i ostatní autoři dospěli při uvažování netlumených smyček k obdobným výsledkům. Např. Halbritter [37] určil posuv parogenerátoru bez tlumičů přes 250 mm, Berkovski a Kostarev [30,31] dokonce přes 500 mm. Takový posuv je opravdu extrémní a způsobuje nepřijatelná napětí v primárním i sekundárním potrubí.



Obr. 6.6.1: Znárodnění vyhodnocovaných míst

Tab. 6.6.1: Extrémní hodnoty posuvů v bodech zájmu

Uzel	Smyčka bez tlumičů (metoda spekter odezvy)			Smyčka s tlumiči (metoda spekter odezvy)			Smyčka s tlumiči (přímá integrace)		
	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]
Střed PG	265,8	299,0	1,0	11,4	11,3	1,3	-5,4 5,4	-5,8 6,6	-1,2 1,2
Ulita HCČ	63,3	196,1	0,2	6,4	16,3	0,2	-4,3 4,9	-10,7 9,1	-0,2 0,2
Motor HCČ	64,2	195,3	0,2	10,6	22,1	0,2	-9,3 9,8	-13,2 10,6	-0,2 0,2
HUA horká větev	154,6	153,4	10,2	7,9	7,6	11,0	-3,6 4,2	-5,1 4,6	-4,3 6,6
HUA chladná větev	35,3	91,9	1,2	4,8	10,4	1,8	-3,5 3,8	-8,3 7,1	-1,5 1,5

Ze srovnání je dále patrné, že posuvy vypočtené pomocí přímé integrace pohybových rovnic jsou, s výjimkou svislého směru, až 2x menší, než hodnoty posuvů vypočtené metodou spekter odezvy. Dominantně se seizmická odezva smyčky HCP projevuje ve vodorovných směrech X a Y. V těchto směrech se potvrzuje předpoklad konzervativnosti metody spekter. Vyšší výsledky seizmické odezvy ve svislé ose získané přímou integrací jsou způsobeny nedostatečně přesným generováním syntetického akcelerogramu v oblasti vyšších frekvencí.

Obdobně jako v případě posuvů komponent se výsledky vypočtených reakcí ve vybraných tlumičích liší v závislosti na použité metodě (viz tab. 6.6.2).

Tab. 6.6.2: Reakce ve vybraných viskózních tlumičích 1. smyčky

Tlumič	Metoda spekter odezvy			Metoda přímé integrace		
	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]
PG	441,7	416,2	18,5	-208,8 260,4	-279,0 244,4	-25,6 26,3
HCC	18,0	34,6	-	-17,3 15,5	-25,0 22,1	- -
HUA	4,5	22,9	1,9	-5,5 5,0	-10,8 14,2	-2,1 1,9

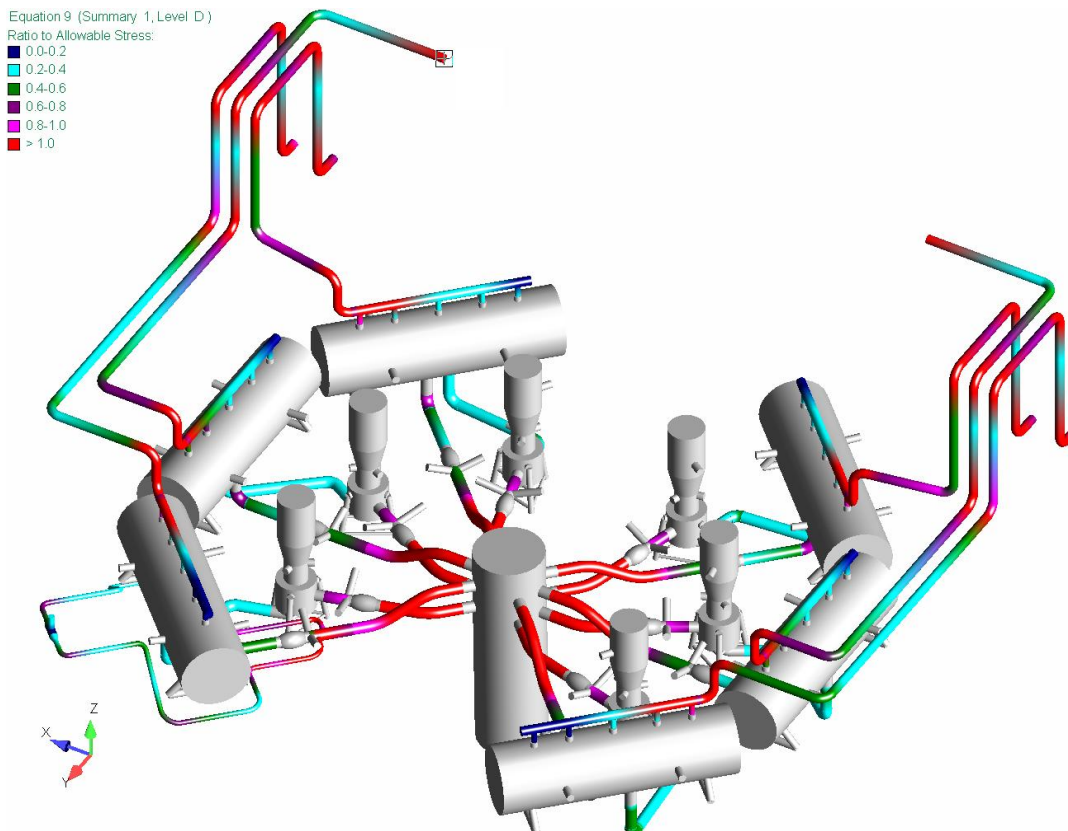
Zejména z výsledků reakcí v tlumičích na parogenerátoru je zřejmá konzervativnost metody spekter. Reakce v tlumičích na PG výrazně převyšují dovolené zatížení tlumičů 350 kN. Bez znalosti výsledků reakcí vypočtených pomocí metody přímé integrace by konzervativnost metody spekter nutně vedla k navýšení počtu tlumičů na PG a v důsledku tak ke zbytečnému předimenzování konstrukce.

6.7 VÝPOČET REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ SMYČKY

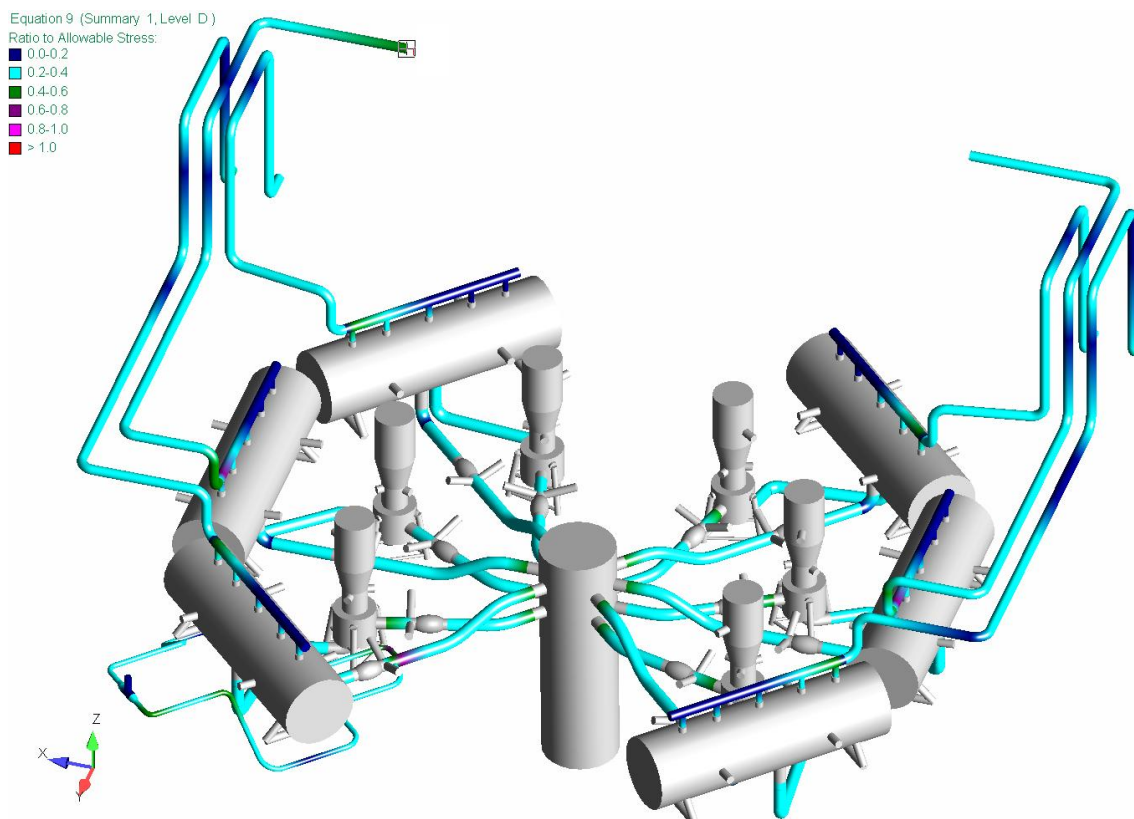
Stanovená odezva na seizmický děj (MVZ) se pro normativní vyhodnocení napjatosti v potrubí kombinuje s odezvou statického modelu při normálních provozních podmínkách (NPP).

Výsledky kombinované odezvy (označováno jako kombinace NPP a MVZ) pro netlumené a tlumené smyčky ukazují následující obrázky. Z obr. 6.7.2 jsou patrná nevyhovující napětí netlumené smyčky v oblastech nátrubků TNR, kolen pod PG a potrubí páry. Vypočtená redukovaná napětí na potrubí netlumené smyčky jsou mnohem větší, než napětí, která dovolují normy. Zvýšená napjatost je způsobena zejména extrémními výchylkami netlumeného PG.

V případě tlumené smyčky (obr. 6.7.3) jsou napětí v potrubí vyhovující. Instalace viskózních tlumičů na hlavním cirkulačním potrubí JE typu VVER 440 MW je tedy nezbytná.



Obr. 6.7.2: Redukované napětí při kombinaci NPP a MVZ – výpočet bez tlumičů



Obr. 6.7.3: Redukované napětí při kombinaci NPP a MVZ – výpočet s tlumiči

7 ZÁVĚR

V této práci byl vytvořen postup pro stanovení seizmické odezvy komplikovaných potrubních soustav s frekvenčně nelineárně závislými viskózními tlumiči. Vytvořený postup poskytuje dostatečně přesné řešení seizmické odezvy komplikovaných potrubních soustav v efektivním časovém rámci, a to při zohlednění soudobých požadavků praxe na pevnostní výpočty v prostředí jaderné energetiky.

Základní ideou metodiky je zkombinování dvou nejčastěji používaných metod pro stanovení seizmické odezvy potrubních soustav, tedy metody spekter odezvy a metody přímé integrace pohybových rovnic. Propojení metod je realizováno pomocí vzájemného provázání dvou výpočtových systémů, a to obecného konečnoprvkového systému ANSYS a specializovaného systému pro výpočet napjatosti potrubí Bentley AutoPIPE. Konkrétní postup je následující:

Nejprve se vytvoří matematický model potrubní soustavy ve specializovaném programu pro výpočet potrubí (AutoPIPE), který se pomocí připraveného rozhraní převede do obecného konečnoprvkového programu (ANSYS). Viskózní tlumiče se zde popíší rheologickým modelem a pomocí přímé integrace pohybových rovnic se vyřeší odezva na seizmické buzení zadané akcelerogramy. Z vypočtených výsledků reakcí a posuvů se pomocí statistického rozboru určí tuhosti pružinových náhrad tlumičů a tím se úloha linearizuje. Následuje řešení metodou spekter odezvy ve specializovaném programu pro výpočty potrubí (AutoPIPE), ve kterém se provede i kombinace výsledků statické a dynamické odezvy. K vyhodnocení výsledků a posouzení podle pevnostních norem se využije předzpracovaných knihoven, které jsou obsaženy ve specializovaném potrubním softwaru.

Pomocí vytvořené metodiky byla určena seizmická odezva bezpečnostně významných potrubních soustav s viskózními tlumiči. Konkrétně byla metodika aplikována při výpočtu seizmické odezvy hlavních cirkulačních potrubí a potrubí páry JE typu VVER 440 MW.

Aby mohl být metodický postup přijat a využíván inženýrskou praxí, byly osvětleny postupy vedoucí ke stanovení podstatných vstupních dat, které metodika využívá. Jedná se zejména o problematiku generování syntetických akcelerogramů, které slouží jako vstupní zatížení pro nelineární dynamickou analýzu a dále o postup určení parametrů Maxwelllova rheologického modelu, který se využívá k popisu frekvenčně závislých tlumících charakteristik tlumiče.

Pro praktické využití metodického postupu bylo dále nezbytné nastínit strukturu vzájemného propojení využívaných programových systémů (ANSYS a AutoPIPE). Kombinace uvedených komerčních softwarů se u společností, které se zabývají výpočty v jaderné energetice, vyskytuje docela často. Nicméně popis struktury vzájemného propojení může být inspirativní i pro uživatele jiných softwarových balíků.

Veškeré stanovené cíle práce tak byly splněny v plném rozsahu. Prezentovaná metodika je navíc unikátní. Dostupné informace nenaznačují, že by byl uvedený nebo obdobný postup v praxi použit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Pipework Dampers. Technical Report. GERB Schwingungsisolierungen, Berlin 1997
- [2] TU 4192-001-20503039-01 Viscoelastic Dampers VD Series Specifications, NPP Edition, 2009, CKTI-VIBROSEISM Co. Ltd.
- [3] Test Certificate – Performance Test of Viscodampers Manufactured by GERB, Berlin. Prüfbescheid Nr. T08-84-01, TÜV Hannover Sachsen-Anhalt
- [4] Tengler M.: Požadavky na seizmické výpočty a hodnocení seizmické odolnosti stavebních konstrukcí a technologického zařízení JE Temelín, JE Dukovany a zásady jejich provedení, Stevenson & Associates, zpráva č.: rep088-04.ete, květen 2005
- [5] Pusztai, M., Tengler, M.: Požiadavky na hodnotenie seizmickej odolnosti konštrukcií, systémov a komponentov JE Mochovce 3. A 4. Blok, Slovenské elektrárny, PNM34080183, 2009
- [6] Datta, T., K.: Seismic Analysis of Structures, John Wiley & Sons, 978-0-470-82461-0, 464 pp, 2011
- [7] Gupta, A., K.: Response Spectrum Method In Seismic Analysis and Design of Structures, Blackwell Scientific Publications, ISBN 0-86542-115-3, 1990
- [8] NTD A.S.I. Sekce III. Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER. Asociace strojních inženýrů, Praha, Brno 2013.
- [9] ASME Code, Section III, Division I – NB, Edition 2007
- [10] Normy rasčota na pročnosť oborudovanija i truboprovodov atomnyh energetičeskich ustanovok, PNAE G-7-002-86, vydané v r. 1989
- [11] Junek L.: Aktualizované požadavky na zpracování výpočtové dokumentace pevnosti a životnosti zařízení jaderných elektráren ČEZ, ÚAM Brno, arch. č.: 3672/04, revize 2, červenec 2005
- [12] Pusztai, M., Svoboda, J., Junek, L.: Metodika na vypracovanie a aktualizáciu preukaznej dokumentácie technologického zariadenia pre MO34. Číslo dokumentu PNM34080180. Enel, Slovenské elektrárne.
- [13] Developement of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants, Newmark, Hall, Urbana, USA, 1978
- [14] IEEE Recommended Practise for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Power Engineering Society, New York, USA, 2005
- [15] ASCE/SEI 43-05 Seismic Design Criteria for Structures, Systems and Components in Nuclear Facilities, American Society of Civil Engineers, USA, 2005
- [16] ASCE 4-98 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, American Society of Civil Engineers, Virginia, USA, 2000
- [17] NUREG-08000, 3.7.2. Seismic System Analysis, U.S. Nuclear Regulatory Commission, USA, 2013
- [18] ASME BPVC, Appendix N, Dynamic Analysis Methods, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2000
- [19] European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, Volume 2, Generic Nuclear Island Requirements, Chapter 4, Design Basis, Appendix A, Method of Seismic Analysis, Revision D, October 2012
- [20] Tengler M., Remišovský M.: Požadovaná spektra odezvy pro seizmickou kvalifikaci nově dodávaných a inovovaných zařízení JE Temelín. Stevenson & Associates, arch. Č.: rep078-04.ete, říjen 2004, revize 1
- [21] Žákovec, P.: Seizmické zadání pro nově dodávané a inovované zařízení JE Dukovany. SEDYC s.r.o., R080-2005-12.edu, prosinec 2005
- [22] Tengler, M.: SO 800/1-02 Vyhlazená podlažní spektra odezvy, technická zpráva ev.č. DMO/072/0322/T/F0/S, VÚJE 14.12.2007

- [23] Hradil, P., Kala, J., Kanický, V., Nevařil, A., Salajka, V., Vlk, Z.: Seizmická odezva rozsáhlých stavebních objektů. 12. ANSYS Users' Meeting, Hrubá Skála, říjen 2004
- [24] Chlud, M.: Statický, dilatační a seizmický výpočet potrubí DPS 1.20R a 1.20G uvnitř hermetické zóny s novým typem tlumičů GERB při teplotě 20°C v ochranné obálce pro HVBI ETE, ÚAM Brno, arch. Číslo: 5031/12, červenec 2012
- [25] Salajka, V., Kaláb, Z., Kala, J., Hradil, P.: Response of the Residential Building Structure on Load Technical Seismicity due to Mining Activities, International Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2009
- [26] Masopust, R., Hueffmann, G., Podrouzek, J.: GERB Viscous dampers in applications for pipelines and other components in Czechoslovak nuclear power plants. ASME PVP-Vol.237-2, Seismic Engineering, p.p.17-22.
- [27] Masopust, R., Podrouzek, J., Zach, J.: Gerb Viscous Dampers in Application for Pipelines and other Components in Nuclear Power Plants, International Atomic Energy Agency, p. 373-388; SMIRT-12 Vienna (Austria); 1993
- [28] Reinsch, K.H., Schwahn, K.J. , Podrouzek, J.: Advantages of viscodampers for NPPs upgrading, Upgrading of existing NPPs with 440 and 1000 MW WWER type pressurized water reactors for severe external loading conditions, SMIRT-12 conference, Vienna (Austria); 1993
- [29] Berkovski, A., Shukin, A.: Seismic analysis of safety-related piping systems for VVER type nuclear power plants. Problems and experience. Příloha E zprávy rep05-95.edu.rev5. Strany E8-E11
- [30] Berkovski, A. M., Kostarev, V. V., Schukin, A. J., Boiadjev, Z., Kostov, M. Seismic analysis of the safety related piping and PCLS of the WWER-440 NPP, 2001
- [31] Kostarev, V., Berkovski, A., Shukin, A.: Aseismic Design and Analysis of the Primary Coolant Loop and Safety Related Piping Systems of Russian Design NPP WWER-440, Transactions of PVP ASME Conference, Boston, 1999
- [32] Berkovsky, A.: Seismic Design and Response of NPP Piping., Seismic Engineering Knowledge Transfer Seminar, Nuclear Research Institute Rez, November 2011
- [33] Berkovsky, A., Vasilyev, P., Kireev, O.: Different Approaches for the Modelling of High Viscous Dampers in Piping Dynamic Analysis. Acceptable Limits for Simplifications
- [34] Pecínka, L., Macák, P., Tanzer, M., Zeman, Vl.: Seismic Upgrading of WWER 440 and WWER 1000 Primary Coolant Loops by means of Viscuous Dampers GERB. OECD-NEA workshop on the seismic re-evaluation of all nuclear facilities, ÚJV Řež a.s., 2001
- [35] Jedlička, Z.: Modelování a seizmická analýza rozsáhlých těleso-potrubních systémů s frekvenčně závislými parametry. Dizertační práce. Školitel: prof. Ing. Vladimír Zeman, DrSc. ZČU Plzeň, 2003
- [36] Danisch, R.; Delinic, K.; Krutzik, N.; Zeitner, W.: Dealing with raised seismic loads in WWER: Mathematical analysis and optimisation of pointwise damping in substructures and piping systems, Upgrading of existing NPPs with 440 and 1000 MW WWER type pressurized water reactors for severe external loading conditions, p 598-611
- [37] Halbritter, A., Krutzik, N., J., Shütz, W., Katona, T., Ratkai, S.: Dynamic Analysis and Upgrading of Reactor Cooling Systems of VVER 440/213 (Paks) due to Seismic and Normal Operational Loading, p 405-411
- [38] Partyk, K.: Zpráva o výpočtu DPS 20R a DPS 1.20G - JE Temelín, Trasy: Hlavní cirkulační potrubí, vstřik do KO, přívod chladiwa do KO, parovody uvnitř hermetické zóny, napájení uvnitř HZ, havarijní napájení uvnitř HZ, zakázka 88.0003, evid. č. 11 057/TP, Modřanská potrubní a.s, ev. Číslo 11 057/TP, únor 1997
- [39] Berkovski A. a kol.: Seismic Analysis of Main Safety - related Class I and II Pipings Located in the Reactor Hall (NPP Temelín), Stevenson & Associates, Report No. Rep 21-94.ete, 1995

- [40] Berkovski A. a kol.: Evaluation of Seismic Capacity of the Temelin NPP Primary Coolant Loop System for substitution of VES dampers to VD type. Stevenson & Associates, Report No Rep01.001-10.sru, únor 2010
- [41] Hudeček, K.: Průkazy pevnosti, seismické odolnosti a životnosti, systém JEC, Prováděcí projekt DPS 3.01.07, Dostavba 3 a4 bloku EMO , PNM3420965303, 2011
- [42] Zeman, P.: Reduction of operational vibration of turbine steam inlet piping at Temelin NPP. Proceedings of the 17th international conference on structural mechanics in reactor technology. Praha 2003, Paper #J05-3
- [43] Dupal, J.; Zeman, V.: Optimization of a primary circuit of the nuclear power plant from the vibration point of view, Proceedings of the 17th international conference on structural mechanics in reactor technology, Praha 2003, Paper # B03-2
- [44] Růžek, L., Jurášek, L.: Průkazy pevnosti, seismické odolnosti a životnosti spojovacího potrubí KO-HPV-BN, DPS 3.01.05, ZP4614, ÚAM Brno, 2011
- [45] Novotny, J., Novotny J., jr.: Response of the steam generator VVER 1000 to a steam line break. Proceedings of the 17th international conference on structural mechanics in reactor technology, Praha 2003, Paper # J06-2
- [46] Fomin, V., Kostarev, V., Reinsch, K-H: Elimination of Chernobyl NPP Unit 3 Power Output Limitation Associated with High Main Steam Piping Flow Induced Vibrations
- [47] Kostarev, V., Petrenko A., Vasilyev P.: A New Method for Essential Reduction of Seismic and External Loads on NPP's Structures, Systems and Components, SMIRT 17, Praha, 2003, Paper #K13-1
- [48] Kostarev, V., Petrenko, A., Vasilyev, P., Reinsch, K-H.: Adaptation of High Viscous Dampers (HVD) For Essential Decreasing of In-structure Floor Response Spectra, SMIRT 18, Beijing, China
- [49] Čada, Z.: Vliv technické a přírodní seizmicity na stavební konstrukce se zaměřením na konstrukce ze zdících materiálů, Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Brno, 2013
- [50] Gasparini D. A., Vanmarcke E. H.: Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra. MIT Civil Engineering. Research Report R76-4. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1976
- [51] SIMQKE, A Program for Artificial Motion Generation, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, November 1976
- [52] Lestuzzi, P.: SimSeisme – Free software for earthquake engineering and structural dynamic, dostupné elektronicky na: <http://imac.epfl.ch/page-55836-en.html> (9.6.2015)

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ABS	Součet absolutních hodnot
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Americká společnost strojních inženýrů)
BN	Barbotážní nádoba
CQC	Complete Quadratic Combination (úplná kvadratická kombinace)
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
EMO	Jaderná elektrárna Mochovce
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
HCC	Hlavní cirkulační čerpadlo
HCP	Hlavní cirkulační potrubí
HPV	Hlavní pojistný ventil
HUA	Hlavní uzavírací armatura

HVB	Hlavní výrobní blok
HVD	High Viscous Damper (vysoko viskózní tlumič)
HZ	Hermetická zóna
I.O.	Primární okruh
II.O.	Sekundární okruh
JE	Jaderná elektrárna
KO	Kompenzátor objemu
MKP	Metoda konečných prvků
MVZ	Maximální výpočtové zemětřesení
NPP	Normální provozní podmínky
NTD A.S.I.	Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů
OV	Odlehčovací ventil
PDMS	Plant Design Management Systém
PG	Parogenerátor
PV	Pojistný ventil
RSMAM	Metoda spekter odezvy
SRSS	Square Root of the Sum of the Squares (součet čtverců pod odmocninou)
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
ÚAM	Ústav aplikované mechaniky Brno
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu Řež
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor (také WWER)
ZPA	Zero Period of Acceleration (zrychlení při nulové periodě)

AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Michal Chlud

Narozen: 1. 12. 1985 ve Zlíně

Národnost: česká

Vzdělání:

2010 - dosud: doktorské studium; obor Inženýrská mechanika

2008 – 2010: navazující magisterské studium; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství; obor Inženýrská mechanika a biomechanika; diplomová práce: Dynamické vlastnosti rotoru kmitajícího v tekutině

2005 – 2008: bakalářské studium; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor Strojní inženýrství; bakalářská práce: Hybridní robotické platformy a jejich použití v areálu FSI VUT

Pracovní zkušenosti:

2010 – dosud: Výzkumný pracovník; Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., Resslova 972/3, Veveří, 602 00 Brno

Odborné zaměření:

Dynamika konstrukcí
Interakční problémy těleso-tekutina

ABSTRACT

Viscous dampers are widely used to ensure seismic resistance of pipelines and equipment in nuclear power plants. Damping characteristics of these dampers are nonlinearly frequency dependent and thus causing complications in computational modelling of seismic response. Engineers commonly use two ways to deal with this nonlinearity:

The first option is to consider damper by means of “snubber”. This is essentially linear spring element that is active for dynamic load and does not resist static loads. Snubber behaviour during seismic event is described by a equivalent stiffness (sometimes called pseudostiffness). The equivalent stiffness could be defined by the iterative calculations of piping natural frequencies and mode shapes taking into account seismic excitation. However, in complicated structures such as the main circulation loop of nuclear power plant the iterative calculation is difficult and could bring significant inaccuracies. On the other hand, the benefit of such modelling is a possibility to apply the commonly used linear response spectrum method for a solution.

The second option is to describe damping characteristics using suitable rheological model. The seismic response is then determined by direct integration of the equations of motion. The behaviour of dampers is described exactly enough but the calculation and post-processing, especially nodal stresses time-histories, are time consuming.

The goal of this work was to find a methodology for determining the seismic response of complex pipe systems with viscous dampers. Methodology allows a sufficiently accurate determination of the seismic response of piping systems and also allows obtaining of the results in effective time.

The procedure is as follows. Firstly, specialized piping program (AutoPIPE) is used for the development of computational model. Next step is to determine a static response of structure and its verification with experimental measurements, if possible. Using script in Python language a computational model is converted from AutoPIPE into general finite element model in ANSYS system. Four-parameter Maxwell rheological model is used to describe behaviour of viscous dampers. Seismic load is represented by synthetic accelerograms. Newmark algorithm of direct integration of the equation of motion is used to obtain seismic response (only reactions and displacements in nodes of interest are necessary). Then the equivalent stiffness is then gained from displacements and reactions as median value of their ratios. Received stiffness are subsequently transferred to AutoPIPE program where the seismic solution is performed using response spectra method. Finally, the dynamic response is combined with the static response and stress assessment according standards is done.

The created methodology was applied in the seismic resistance calculation of the main circulation piping and piping of pressurizer in nuclear power plants type VVER 440 MW and type VVER 1000 MW.