

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

DYNAMICKÁ ANALÝZA OCELOVÝCH NÁDRŽÍ S KAPALINOU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

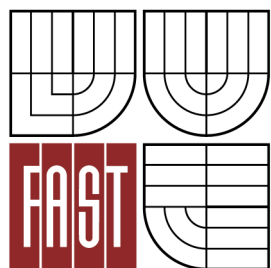
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ZUZANA FARKASOVÁ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

DYNAMICKÁ ANALÝZA OCELOVÝCH NÁDRŽÍ S KAPALINOU

DYNAMIC ANALYSIS OF STEEL TANK WITH LIQUID

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ZUZANA FARKASOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR HRADIL, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. ZUZANA FARKASOVÁ
Název	Dynamická analýza ocelových nádrží s kapalinou
Vedoucí diplomové práce	Ing. Petr Hradil, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, Release 14.5, 2012
- [2] ČSN EN 1998-1 Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby
- [3] ČSN EN 1998-4 Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 4: Zásobníky, nádrže a potrubí
- [4] ČSN EN 1993-1 Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

Zásady pro vypracování

Zpracujte strukturální analýzu nádrže v interakci s kapalinou. Na základě výkresové dokumentace sestavte výpočtový model. Proved'te statickou analýzu, modální analýzu konstrukce bez kapaliny, tak i s kapalinou. Výsledky modální analýzy porovnejte formou studie. Následně proved'te dynamickou analýzu odezvy konstrukce seizmické buzení. Proved'te posouzení vybraných konstrukčních prvků.

Předepsané přílohy

.....

Ing. Petr Hradil, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce řeší dynamickou analýzu ocelových nádrží s kapalinou. V práci jsou uvedeny parametry konstrukce a způsob jejich zpracování v programovém systému ANSYS. Pro srovnání jsou vytvořeny tři výpočtové modely, pro které je vypočtena statická a modální analýza. Spektrální analýza je provedena pouze pro výpočtové modely s kapalinovým prostředím. Páce uvádí také posudky skořepinových prvků dle Eurokódu 3.

Klíčová slova

Statická analýza, modální analýza, spektrální analýza, spektrum odezvy, výpočtový model, ANSYS,

Abstract

Master's thesis deals with dynamic analysis of steel tank with liquid. There are given parameters of structure and their introduction to ANSYS system. There are created three numerical models for comparison, which are static and modal analysis calculated for. Spectrum analysis is calculated only for numerical models with fluid elements. Shell elements are evaluated according to EC 3.

Keywords

Static analysis, modal analysis, spektrum analysis, response spektrum, numerical model, ANSYS

Bibliografická citace VŠKP

FARKASOVÁ, Zuzana. *Dynamická analýza ocelových nádrží s kapalinou*. Brno, 2013. 73 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Hradil, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12.1.2014

.....
podpis autora
Zuzana Farkasová

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Hradilovi, Ph.D. za odbornou pomoc a podporu, kterou mi věnoval v průběhu vypracování, a také jeho kolegům z ústavu stavební mechaniky, díky kterým jsme se seznámila se základy práce v systému ANSYS a od nichž jsem získala teoretické znalosti tolik důležité pro vypracování diplomové práce.

Obsah:

Úvod	11
1 Popis konstrukce	12
2 Výpočtový model	14
2.1 Systém ANSYS	14
2.2 Popis výpočtových modelů.....	14
2.3 Okrajové podmínky	16
2.4 Materiálové charakteristiky	16
2.5 Použité konečné prvky.....	16
2.5.1 BEAM188	16
2.5.2 LINK180	17
2.5.3 SHELL181	18
2.5.4 SHELL281	18
2.5.5 FLUID30.....	19
2.5.6 FLUID220.....	20
3 Teoretický úvod k výpočtům	22
3.1 Řešení úlohy využitím koncepce přídavné hmotnosti.....	22
3.2 Moderní koncepce řešení.....	23
3.2.1 MKP	23
3.2.2 Lagrangeovský a Eulerovský přístup.....	23
3.3 Diskretizace kapalinové oblasti konečnými prvky	24
3.4 Vazba mezi prvky konstrukce a kapaliny.....	25
3.5 Diskretizovaná podoba úplné pohybové rovnice pro popis interakce konstrukce s kapalinou.....	26

4 Statická analýza	27
4.1 ZS1: Vlastní tíha konstrukce	27
4.2 ZS2: Užité zatížení	29
4.3 Kombinace ZS	31
5 Modální analýza	37
5.1 Výsledky modální analýzy	38
6 Spektrální analýza	48
6.1 Výsledky spektrální analýzy.....	49
7 Posouzení dle Eurokódu 3	59
7.1 Mezní stav plasticity LS1	59
7.2 Mezní stav cyklické plastifikace LS2	60
7.3 Mezní stav boulení LS3.....	61
Závěr	69
Seznam obrázků	70
Seznam tabulek a grafů	72
Použité zdroje	73

Úvod

Diplomová práce řeší dynamickou analýzu ocelových nádrží s kapalinou. Dynamické účinky jsou do výpočtu zavedeny pomocí spekter odezvy. Celkově jsou uvažovány tři výpočtové modely dle kapalinového prostředí.

V první řadě je popsána geometrie reálné konstrukce jako taková. Jsou uvedeny rozměry jejich jednotlivých částí, materiálové charakteristiky a také okrajové podmínky uvažované na reálné konstrukci.

Na základě popisu konstrukce jsou vytvořeny výpočtové modely. Použité typy konečných prvků jsou vybrány dle vlastností jednotlivých částí konstrukce tak, aby jejich chování při výpočtu odpovídalo způsobu chování na skutečné konstrukci. Pro porovnání jsou vytvořeny tři výpočtové modely. První model je uvažován bez kapalinového prostředí, simuluje tedy případ prázdné nádrže. Ostatní případy oba uvažují kapalinové prostředí, avšak to je popsáno různými typy konečných prvků. Pro správný výpočet je nutné uvažovat jisté teoretické předpoklady a podmínky, které jsou v této práci také popsány.

V rámci statické analýzy jsou definovány dva zatěžovací stavy, pro které je dle normy provedena také kombinace. Výsledky zatěžovacích stavů vlastní tíhy a užitého zatížení, které není blíže specifikováno, a také výsledky kombinace jsou pro srovnání v této práci uvedeny pro jednotlivé výpočtové modely.

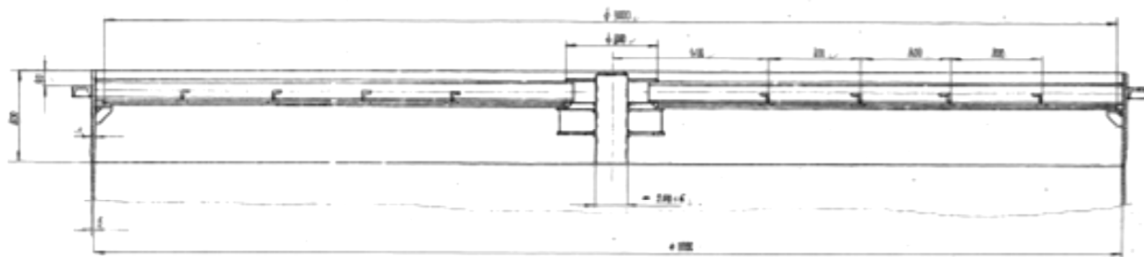
Modální analýza byla provedena pro všechny tři výpočtové modely. Jejím výsledkem jsou vlastní tvary kmitu konstrukce a jim příslušné vlastní frekvence. Nejzajímavější je však porovnání frekvencí jednotlivých výpočtových modelů pro příslušný vlastní tvar kmitu. Z tohoto srovnání je patrný výrazný rozdíl mezi konstrukcí s kapalinovým prostředím a bez něj. Modální analýza je zároveň výchozí analýzou pro spektrální analýzu.

Spektrální analýza je formou dynamické analýzy. Jedná se však o samostatnou analýzu, při které jsou pomocí spektra odezvy definovány budící účinky působící na konstrukci. Tyto účinky mohou při nevhodné kombinaci s některým vlastním tvarem kmitu vyvolat nežádoucí účinky. Spektrální analýza byla provedena pouze pro výpočtové modely s kapalinovými prvky.

S ohledem na chování skořepinových prvků, jsou provedeny jejich posudky dle Eurokódu 3. V závěru je provedeno celkové srovnání výsledků a způsobu řešení pro jednotlivé výpočtové modely.

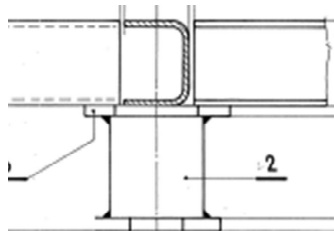
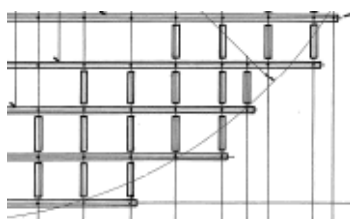
1 Popis konstrukce

Posuzovanou konstrukcí je stojatá válcová nádrž vytvořená spojením plášťů několika rotačních válců. Vnitřní průměr konstrukce je 9,2 m. Výška nádrže je 7,595 m. Do výšky 1,25 m ode dna je plášť tvořen plechem o tloušťce 12 mm, ve výšce 1,25 m až 6,55 m ode dna je tvořen plechem tloušťky 5 mm a ve výšce 6,55 m až 7,595 m ode dna opět plechem o tloušťce 12 mm.



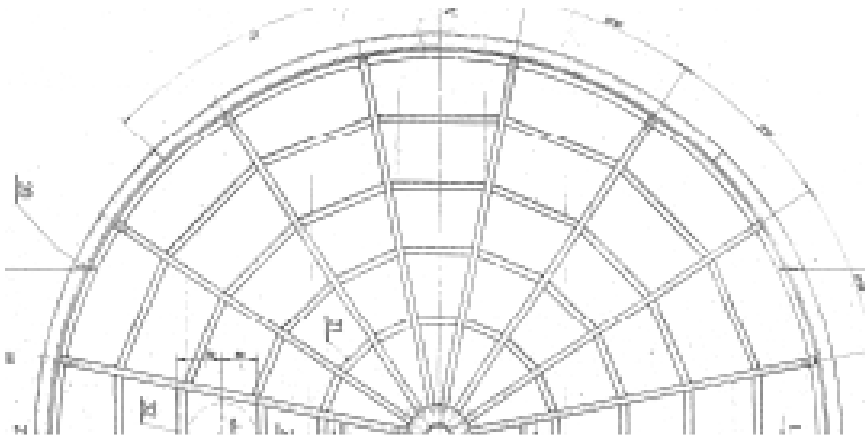
Obr. 1.1 Schéma posuzované konstrukce

Dno nádrže je tvořeno svařenými plechy o tloušťce 7 mm a je usazeno na prostorovém roštu tvořeném nosníky profilu C.



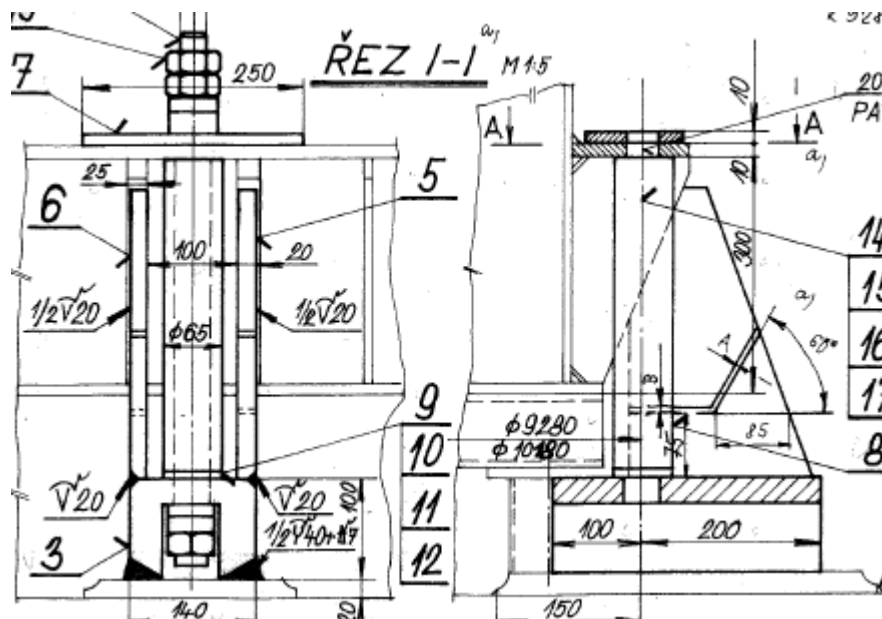
Obr. 1.2 Schéma roštu a řez s uložením

Konstrukce střechy je tvořena profily I180 uspořádanými paprskovitě a profily L90 uspořádanými v soustředných kruzích. Střešní plášť je svařen z plechů tloušťky 7mm. Střešní plášť je uvnitř nádrže podepřen středovým sloupem čtvercového průřezu s délkou strany 200 mm a tloušťkou stěny 6 mm.



Obr. 1.3 Střešní konstrukce v půdoryse

Po obvodě je nádrž kotvena pomocí patek. Patky jsou tvořeny předpjatými šrouby a plechy tloušťky 20 mm. Po obvodu jsou patky rozestavěny pravidelně po 18°. Celkem 20 patek je v horní části vzájemně propojeno a kolem pláště tedy vytvářejí ztužující prstenec o tloušťce plechu 20 mm.



Obr. 1.4 Kotevní patky

2 Výpočtový model

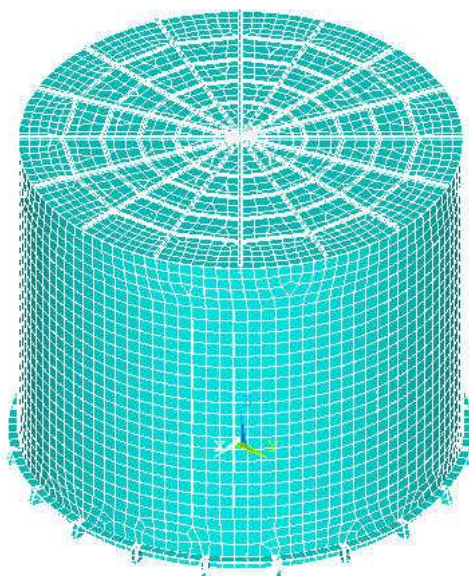
2.1 Systém ANSYS

Programový systém ANSYS je založen na řešení numerického modelu pomocí metody konečných prvků. V tomto systému je výsledným výstupem řešení úlohy průběh napětí, z něhož jsou následně dopočítány vnitřní síly. Princip práce v systému ANSYS je následující. V první řadě je vytvořen geometrický model, který je následně pokryt sítí konečných prvků. Typů sítí a jejich prvků je celá řada. Správná volba sítě konečných prvků závisí na požadovaném tvaru sítě či také na způsobu zatížení modelu konstrukce. Následuje samotný výpočet a jeho řešení. Program ANSYS umožňuje vygenerování výsledků v grafickém i textovém formátu s podrobným popisem postupu.

2.2 Popis výpočtových modelů

Při statickém a dynamickém sledování konstrukcí uplatňujeme typicky tři kroky (návrh, analýza a testování), přičemž nejčastěji se využívá krok analýzy, při kterém se vytváří matematický popis konstrukce a zatížení. Při nahrazení skutečné konstrukce výpočtovým modelem dbáme na to, aby model co nejvěrněji vystihoval nosný systém a mechanické vlastnosti konstrukce.

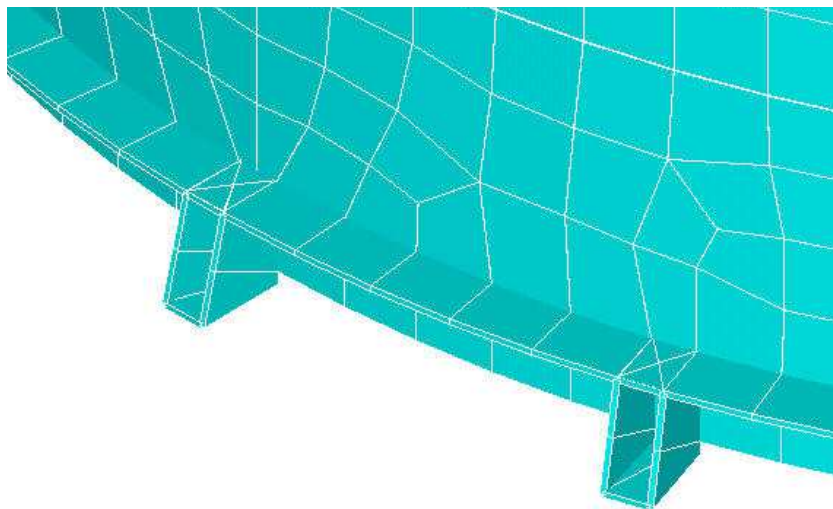
Výpočtové modely konstrukce jsou sestaveny užitím konečných prvků z programu ANSYS 14.5 na základě výkresové dokumentace. Modely jsou koncipovány jako prostorové. Celkem jsou sestaveny tři modely konstrukce. Základem je model uvažující vyprázdněnou nádrž a dále jsou dva modely uvažující prostředí s kapalinou. Pro modely uvažující prostředí s kapalinou jsou využity kapalinové prvky FLUID30 a FLUID220. Tyto typy kapalinových prvků se liší počtem uzlů.



Obr. 2.2.1 Výpočtový model

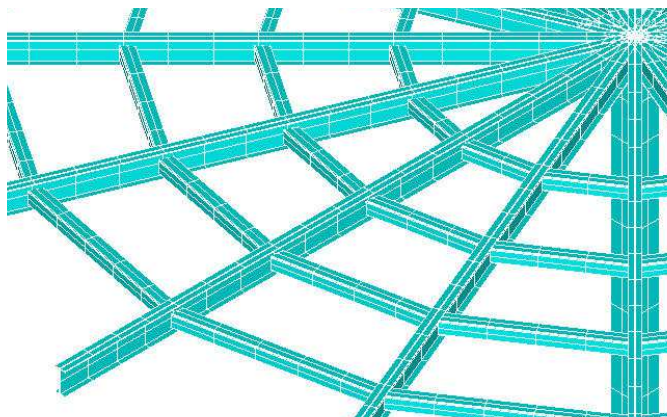
Tenkostěnné části konstrukce tvořené svařovanými plechy jsou modelovány pomocí skořepinových prvků. Pro model konstrukce bez kapaliny a model s kapalinovým prvkem FLUID30 je použit prvek SHELL181. V případě konstrukce s kapalinovým prvkem FLUID220 je pro plášť nádrže, střešní plášť a dno nádrže použit víceuzlový skořepinový prvek SHELL281. Zpevňující prstenec a patky jsou ve všech případech modelované pomocí skořepinových prvků SHELL181.

Celý model je pokryt volnou sítí konečných prvků.

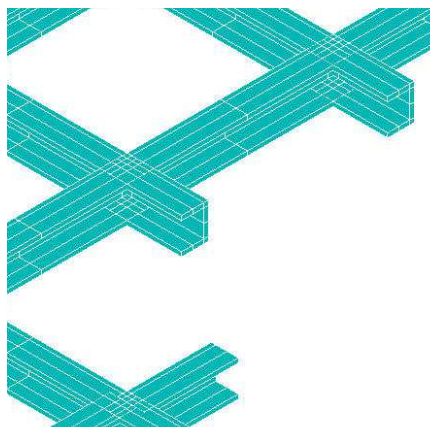


Obr.2.2.2 Skořepinové prvky

Prutové prvky konstrukce jsou modelovány pomocí prvků BEAM188. Jednotlivé prvky se liší svými průřezy. Podpěrný rošt je tvořen prvky průřezu C, vyztužení střešního pláště tvoří profily L a I. Předpínací šrouby v patkách jsou modelovány jako tyče kruhového průřezu. Pro zajištění správné funkčnosti výpočtu konstrukce nádrže jsou prutové prvky roštu propojeny se dnem nádrže pomocí prvků LINK180.



Obr. 2.2.3 Vyztužení střešního pláště



Obr. 2.2.4 Podpěrný rošt

2.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou předepsány posuny $u_x=u_y=u_z=0$ v dolní rovině kotevních patek. Na okraji roštu jsou definovány posuny $u_x=u_y=0$ a v místech křížení profilů roštu, kde je reálná konstrukce podepřena betonovými bloky, posuny $u_z=0$.

2.4 Materiálové charakteristiky

Definovány jsou dva materiálové modely.

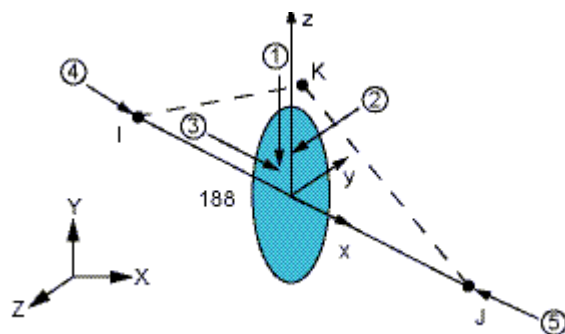
První materiálový model je určen pro konstrukci ocelové nádrže. V tomto modelu jsou zadány hodnoty Youngova modulu pružnosti $E=210$ GPa, poissonova součinitele $\nu=0,3$ a hustoty materiálu $\rho=7850$ kgm⁻³.

Druhý materiálový model je určen pro kapalinové prvky. V tomto modelu jsou zadány hodnoty hustoty materiálu $\rho=1000$ kgm⁻³ a rychlostí šíření zvuku v materiálu $v=1435$ ms⁻¹.

2.5 Použité konečné prvky

2.5.1 BEAM188

Jedná se o dvouuzlový prutový prvek užívaný v případě prostorových modelů konstrukce. Tento jednoosý prvek je vhodný pro analýzu štíhlých a mírně tlustých prutových konstrukcí. Prvek je založen na Timoshenkově teorii nosníku, která zahrnuje smykové deformační účinky. Umožňuje řešit lineární, velké rotace nebo také velké nelineární deformace. Prvek tvoří dva uzly s šesti stupni volnosti v každém uzlu (posun ve směru os x , y , z a pootočení kolem osy x , y , z). Je možné zadat pro každý z koncových uzlů různé průřezové charakteristiky a také je možné těžištní osu zvolit mimo osu prvku. Průřezové charakteristiky lze prvku přiřadit také pomocí předdefinovaných či uživatelsky definovaných průřezů. Osu z lokálního souřadnicového systému lze definovat uzlem K nebo úhlem θ .



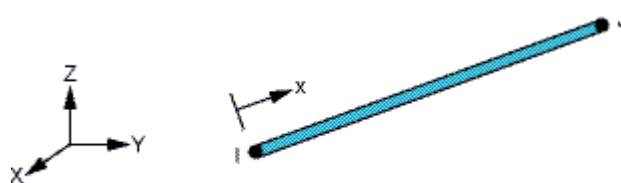
Obr. 2.5.1.1 Konečný prvek BEAM188

Vstupní údaje:

- Uzly: I, J
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
- Konstanty: TXZ, TXY, ADDMAS
- Materiálové vlastnosti: EX, ALPX, DENS, GXY, GXZ, DAMP
- Povrchové zatížení: Příčné a podélné spojité zatížení.
- Objemové zatížení: Teploty T(I) a T(J)

2.5.2 LINK180

LINK180 je dvouuzlový prvek užíváný pro úlohy s prostorovým modelem. Prvek se používá pro prvky namáhané v jednoosém tahu nebo tlaku. V každém uzlu jsou definovány tři stupně volnosti (posuny ve směru lokálních souřadnicových os x , y , z). Uvažuje se možnost zplastizování, dotvarování, rotace i velkých deformací.



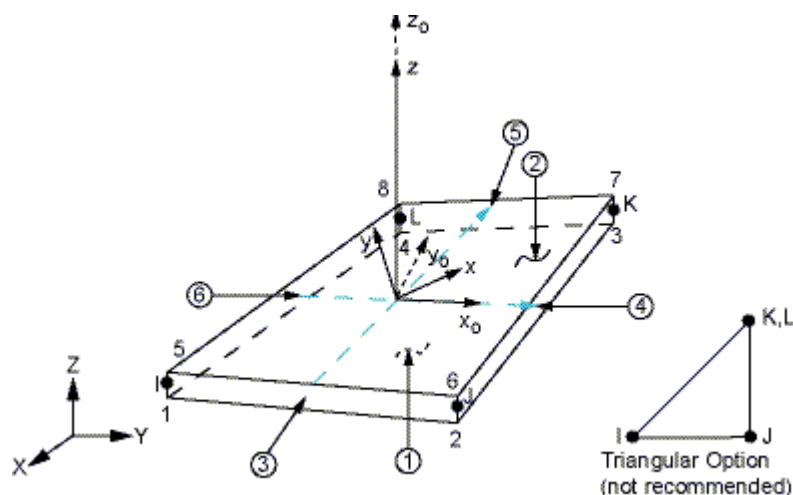
Obr. 2.5.2.1 Konečný prvek LINK180

Vstupní údaje:

- Uzly: I, J
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ
- Materiálové vlastnosti: EX, ALPX, DENS, GXY, ALPD, BETD
- Objemové zatížení: Teploty T(I) a T(J)

2.5.3 SHELL181

Prvek je vhodný pro modelování tenkých až mírně tlustých skořepinových prvků. Prvek tvoří čtyři stupně volnosti v každém uzlu (posun ve směru os x , y , z a pootočení kolem os x , y , z). Je možné použít také trojúhelníkovou variantu. Prvek se používá pro popis ohybového i membránového chování skořepin. Prvek je vhodný pro řešení úloh lineárních, velkých rotací a velkých nelineárních přetvoření.



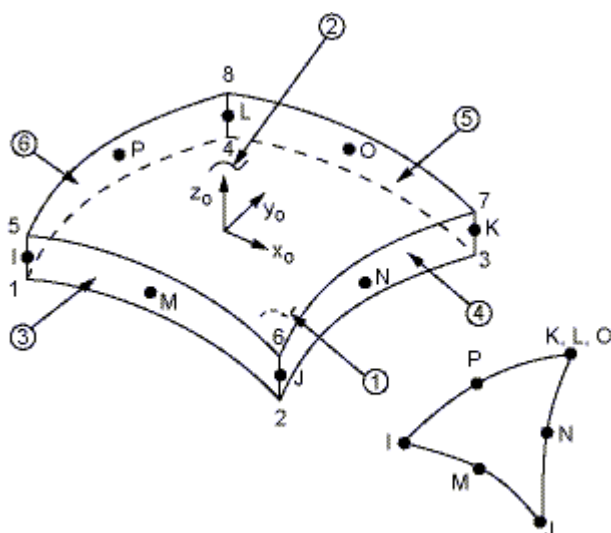
Obr. 2.5.3.1 Konečný prvek SHELL181

Vstupní údaje:

- Uzly: I, J, K, L
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
- Materiálové vlastnosti: EX, EY, EZ, ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GXZ, GYZ, ALPD
- Povrchové zatížení: Spojité zatížení na plochy.
- Objemové zatížení: Teploty T(1), T(2), ..., T(8)

2.5.4 SHELL281

Prvek je vhodný pro modelování tenkých až mírně tlustých skořepinových prvků. Prvek je tvořen osmi uzly se šesti stupni volnosti v každém z nich (posuny ve směru os x , y , z a pootočení kolem os x , y , z). Prvek se používá pro popis ohybového i membránového chování skořepin. Prvek je vhodný pro řešení lineárních úloh, velkých rotací a velkých nelineárních přetvoření.



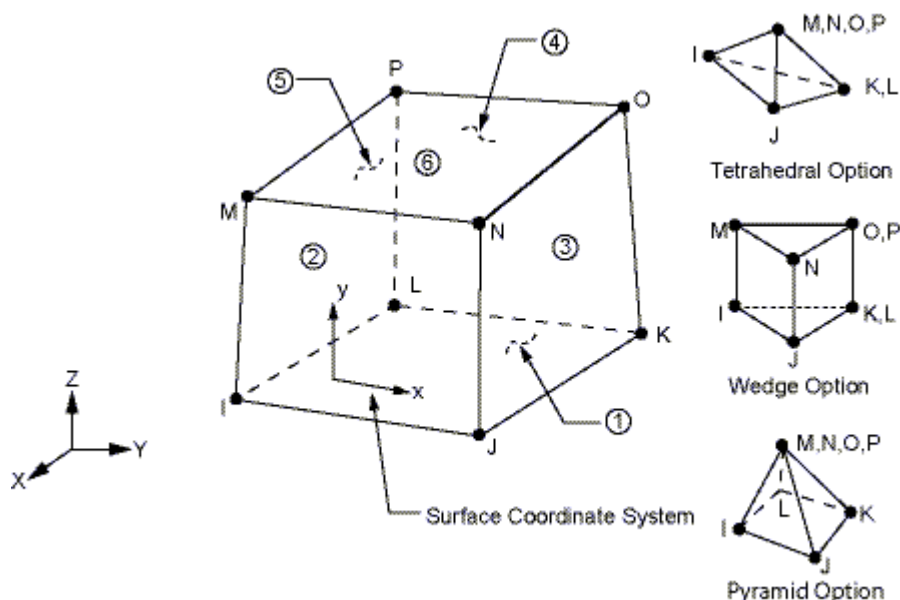
Obr. 2.5.4.1 Konečný prvek SHELL281

Vstupní údaje:

- Uzly: I, J, K, L, M, N, O, P
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
- Materiálové vlastnosti: EX, EY, EZ, ALPX, ALPY, ALPZ, DENS, GXY, GXZ, GYZ, ALPD
- Povrchové zatížení: Spojité zatížení na plochy.
- Objemové zatížení: Teploty T(1), T(2), ..., T(8)

2.5.5 FLUID30

Prvek je používán pro modelování problému interakce kapaliny s konstrukcí na jejich rozhraní. Obvykle se vyšetřuje šíření zvukové vlny nebo dynamika ponořené konstrukce. Prvek má osm uzlů se čtyřmi stupni volnosti v každém uzlu (posuny ve směru os x , y , z a tlak). Posuny jsou však umožněny pouze v uzlech na rozhraní kapaliny a konstrukce. Prvku je možné také přiřadit parametry tlumení či absorbování zvuku na rozhraní kapaliny a konstrukce jakož i tlumení ve vnitřních uzlech kapaliny. Nedochází-li k posunu konstrukce, je prvek vhodně použitelný pro modální analýzu.



Obr. 2.5.5.1 Konečný prvek FLUID30

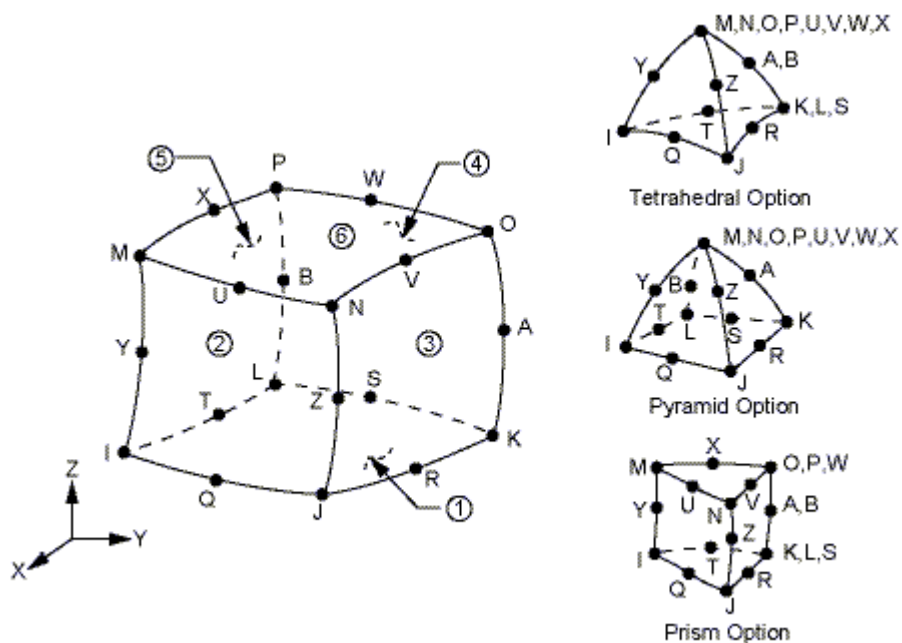
Vstupní údaje:

- Uzly: I, J, K, L, M, N, O, P
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, PRES
- Konstanty: PREF,
- Materiálové vlastnosti: DNES, SONC,
- Povrchové zatížení: Spojité zatížení na plochy

Ve výpočtovém modelu vytvořeném pro modální analýzu je uzlům představujícím hladinu kapaliny přiřazen stupeň volnosti $pres=0$.

2.5.6 FLUID220

Jedná se o dvacetiuzlový prostorový prvek, který je používán pro modelování problému interakce kapaliny s konstrukcí na jejich rozhraní. Obvykle se vyšetřuje šíření zvukové vlny nebo dynamika ponořené konstrukce. Prvek má osm uzlů se čtyřmi stupni volnosti v každém uzlu (posuny ve směru os x, y, z a tlak). Posuny jsou však umožněny pouze v uzlech na rozhraní kapaliny a konstrukce. Prvku je možné také přiřadit parametry tlumení či absorbování zvuku na rozhraní kapaliny a konstrukce jakož i tlumení ve vnitřních uzlech kapaliny. Nedochází-li k posunu konstrukce, je prvek vhodně použitelný pro modální analýzu.



Obr. 2.5.6.1 Konečný prvek FLUID220

Vstupní údaje:

- Uzly: I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, A, B
- Stupně volnosti: UX, UY, UZ, PRES
- Konstanty: PREF,
- Materiálové vlastnosti: DNES, SONC,
- Povrchové zatížení: Spojité zatížení na plochy

Ve výpočtovém modelu vytvořeném pro modální analýzu je uzlům představujícím hladinu kapaliny přiřazen stupeň volnosti $pres=0$.

3 Teoretický úvod k výpočtům

V rámci teoretického úvodu jsou popsány použité principy a předpoklady řešení úlohy interakce konstrukce s kapalinou. Nejdříve jsou stručně vysvětleny zásady řešení postupem s využitím tzv. přídavné hmotnosti kapaliny, následně jsou popsány moderní postupy řešení. Jsou zmíněny principy používané při řešení úloh interakce konstrukce s kapalinou.

3.1 Řešení úlohy využitím koncepce přídavné hmotnosti

Řešení úlohy využitím koncepce přídavné hmotnosti je standardním postupem při řešení úlohy interakce konstrukce s kapalinou. V případě řešení úlohy působí na rozhraní prvků konstrukce a kapaliny tlak, který ovlivňuje konstrukci. Tímto tlakem je vyjádřen v kapalině efekt tzv. přídavné hmotnosti. Matice přídavné hmotnosti kapaliny vyjadřuje výhradně inerciální účinky urychlovaných částic kapaliny na kmitající konstrukci. Jinými slovy působí neproudící kapalina na kmitající konstrukci formou tlaku.

Základní rovnicí pro obvyklý způsob výpočtu dynamické odezvy je pohybová rovnice, jejíž tvar je v případě úlohy interakce konstrukce s kapalinou rozšířen o přídavnou hmotnost kapaliny (matici přídavné hmotnosti kapaliny M_w). Dynamická odezva konstrukce se nadále řeší standardním způsobem, např. modální analýzou, za použití výpočtového modelu konstrukce, kde je výpočtová matice hmotnosti součtem matic hmotnosti konstrukce a přídavné hmotnosti kapaliny. Vyšetřovaný dynamický proces lze popsat lineární maticovou pohybovou rovnicí.

$$(M + M_w)\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t)$$

- M** - matice součinitelů hmotnosti diskretizované konstrukce
- M_w** - matice součinitelů hmotnosti diskretizované kapaliny
- C** - matice součinitelů tlumení (disipace energie) diskretizované konstrukce
- K** - matice součinitelů tuhosti diskretizované konstrukce
- u** - vektor zobecněných přemístění
- f(t)** - vektor zobecněných sil působících na konstrukci

Přídavnou hmotnost kapaliny je možno stanovit různými způsoby, které však předpokládají výrazné tvarové zjednodušení modelu. Programové systémy na bázi MKP umožňují výpočet matice přídavné hmotnosti kapaliny bez nutnosti výrazného zjednodušování skutečného tvaru modelu.

3.2 Moderní koncepce řešení

Pokročilé programové systémy na bázi MKP obecně zásadně změnily způsob řešení dynamické odezvy konstrukce v interakci s kapalinou. Jsou možné dva přístupy řešení. Dle Lagrange a dle Eulera.

3.2.1 MKP

Metoda konečných prvků (MKP) je nejuniverzálnější metodou pro mnoho typů problémů. Převádí řešení diferenciálních rovnic na řešení systému algebraických rovnic. MKP je zobecněním Ritzovy metody. V Ritzově metodě jsou používány báze funkce pro aproximaci polí hledaných veličin spojitě po celé konstrukci a hledány jsou pouze koeficienty těchto funkcí. Funkce musejí splňovat okrajové podmínky a jsou obecně nenulové v řešené oblasti.

3.2.2 Lagrangeovský a Eulerovský přístup

V případě Lagrangeova přístupu řešení úlohy interakce konstrukce s kapalinou, se kapalina uvažuje jako těleso se zanedbatelným modulem pružnosti ve smyku a pohyb částic kapaliny se popisuje pohybovými rovnicemi v Lagrangeově tvaru. Je nutné vhodné dělení na konečné prvky. Proměnnými jsou uzlová přemístění. Nevýhodou tohoto přístupu je, že v pásmu několika významných nižších vlastních frekvencí konstrukce se nachází velmi vysoký počet frekvencí příslušných nevýznamnému kmitání převážně kapalinové oblasti. V tomto případě nemají konstrukce a kapalina společnou hranici, ale jsou provázány pomocí kontaktních prvků, které zajišťují interakci konstrukce a kapaliny. Tento přístup není v této práci aplikován.

V případě druhého přístupu nejsou proměnnými uzlová přemístění. V přístupu dle Eulera se sledují tlaková pole (rozložení tlaku) nebo rychlostní pole (rozložení rychlostí) v kapalinové oblasti. To znamená, že v kapalinové oblasti rozdělené na konečné prvky, jsou proměnnými tlaky nebo rychlosti v uzlových bodech. V tomto případě je interakce kapaliny a konstrukce charakterizována na jejich společné hranici tlakem nebo normálovou složkou rychlosti. Programový systém ANSYS umožňuje vyšetřovat vlastní kmity konstrukce v interakci s kapalinou na základě přístupu dle Eulera, aniž by bylo nutné počítat zvlášť matici přídavných hmotností kapaliny. V této práci je aplikován pouze přístup dle Eulera.

3.3 Diskretizace kapalinové oblasti konečnými prvky

Odvození diferenciální akustické vlnové rovnice vychází ze zákona zachování hybnosti a z rovnice kontinuity. V těchto rovnicích jsou popsána pole rozložení hustoty, tlaku a rychlosti.

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p + \rho v \nabla v = 0$$
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0$$

p . . . tlaková složka kapaliny

v . . . rychlostní složka kapaliny

ρ . . . hustota kapaliny

Spojením obou rovnic je možné eliminovat pole rychlosti a za současného předpokladu malých odchylek platí

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \nabla^2 \rho' = 0$$

Tuto rovnici je možné vhodně vyjádřit pomocí tlakového pole za předpokladu, že kapalina je stlačitelná (změna hustoty závisí na změně tlaku). Tedy platí -li

$$\rho'(t) = \frac{1}{c^2} p,$$

je možné zapsat rovnici

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p$$

c . . . rychlost šíření zvuku v kapalině

Tato rovnice popisuje rozdělení tlaku v kapalině za zjednodušujících předpokladů.

- Kapalina je stlačitelná (hustota se mění v závislosti na změně tlaku)
- Kapalina je izotropní a homogenní
- Průměrná hustota a tlak jsou stále v celé kapalinové oblasti
- Kapalina je lineárně a dokonale pružná
- Nedochozí k proudění
- Kapalina je trvale v kontaktu s konstrukcí

Konečný prvek kapalinové oblasti je popsán vektorem tlaků v uzlech p a vektory složek uzlových posunutí u , v , w . Po aplikaci určitých matematických předpokladů je možné zapsat vlnovou rovnici v diskretizovaném tvaru pro její využití v MKP.

$$M\ddot{p} + Kp + \rho_0 R^T \ddot{u} = 0$$

M . . . matice hmotnosti prvku kapaliny

K . . . matice tuhosti prvku kapaliny

$\rho_0 R$. . . matice spřažení kapaliny s konstrukcí

3.4 Vazba mezi prvky konstrukce a kapaliny

Pro konečný prvek konstrukce, který je ve styku s kapalinou platí pohybová rovnice

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f_c + f_{pe}$$

f_{pe} . . . zatěžovací vektor odpovídající působení tlaku na konstrukci

Po aplikaci určitých matematických úprav a při zohlednění pohybové rovnice pro kapalinovou oblast můžeme zapsat pohybovou rovnici

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku - Rp = f_c$$

Tato rovnice je vyjádřením diskretizované pohybové rovnice prvku konstrukce na styku s kapalinou.

3.5 Diskretizovaná podoba úplné pohybové rovnice pro popis interakce konstrukce s kapalinou

V případě diskretizované konstrukce a diskretizované kapalinové oblasti, lze z jednotlivých matic prvků sestavit standardními postupy pohybové rovnice pro celou modelovanou konstrukci a modelovanou kapalinovou oblast.

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ M_c & M_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & K_c \\ 0 & K_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(t) \\ w(t) \end{Bmatrix}$$

M . . . matice součinitelů hmotnosti diskretizované konstrukce

K . . . matice součinitelů tuhosti diskretizované konstrukce

C . . . matice součinitelů tlumení (disipace energie) diskretizované konstrukce

M_p . . . matice součinitelů hmotnosti diskretizované konstrukce

K_p . . . matice součinitelů tuhosti diskretizované konstrukce

C_p . . . matice součinitelů tlumení (disipace energie) diskretizované konstrukce

M_c . . . matice součinitelů hmotnostních (inerciálních) interakcí – přídatná hmotnost kapaliny

K_c . . . matice součinitelů tuhostních interakcí

$f(t)$. . . vektor zobecněných sil působících na konstrukci

$w(t)$. . . vektor zobecněných zatížení v bodech kapalinové oblasti

Kinematické okrajové podmínky kapalinové oblasti zahrnují známé hodnoty uzlových posunutí. Přirozené okrajové podmínky kapalinové oblasti zahrnují definované hodnoty prostorových derivací posunutí a jsou ekvivalentní působícímu zatížení. V případě, že na hranici nepůsobí zatížení ani nejsou definována posunutí, lze říci, že tento stav odpovídá přirozeným okrajovým podmínkám. Deformace materiálu jsou ve směru normály k hranici nulové. Na hranici modelu je možné ponechat zatížení ve směru normály k hranici i posunutí na hranici jako neznámé, nikdy však zároveň.

V kapalinové oblasti představují stupně volnosti tlak. Prostorové derivace tlaku vztažené k částici kapaliny jsou přímo vázány na zrychlení této částice. Na hranici kapaliny mohou být zadány kinematické i okrajové podmínky, jejich současné zavedení se však vylučuje. Zavedení známých hodnot tlaků na hranici kapaliny (kinematické podmínky) ovlivňuje neznámé hodnoty zrychlení částic kapaliny. Příklad kdy na hranici kapaliny nejsou aplikovány tlaky ani síly v kapalině odpovídá přirozeným okrajovým podmínkám, při nichž jsou derivace tlaku v kapalině ve směru normály rovny nule. Kapalina je tedy ohraničena nepohyblivou absolutně tuhou stěnou.

Při výpočtu však vzniká problém vyjádření zobecněného zatížení v uzlech modelu kapalinové oblasti. Problematické je také korektní vyjádření disipace energie. V tomto případě je nutné použití vhodné aproximace.

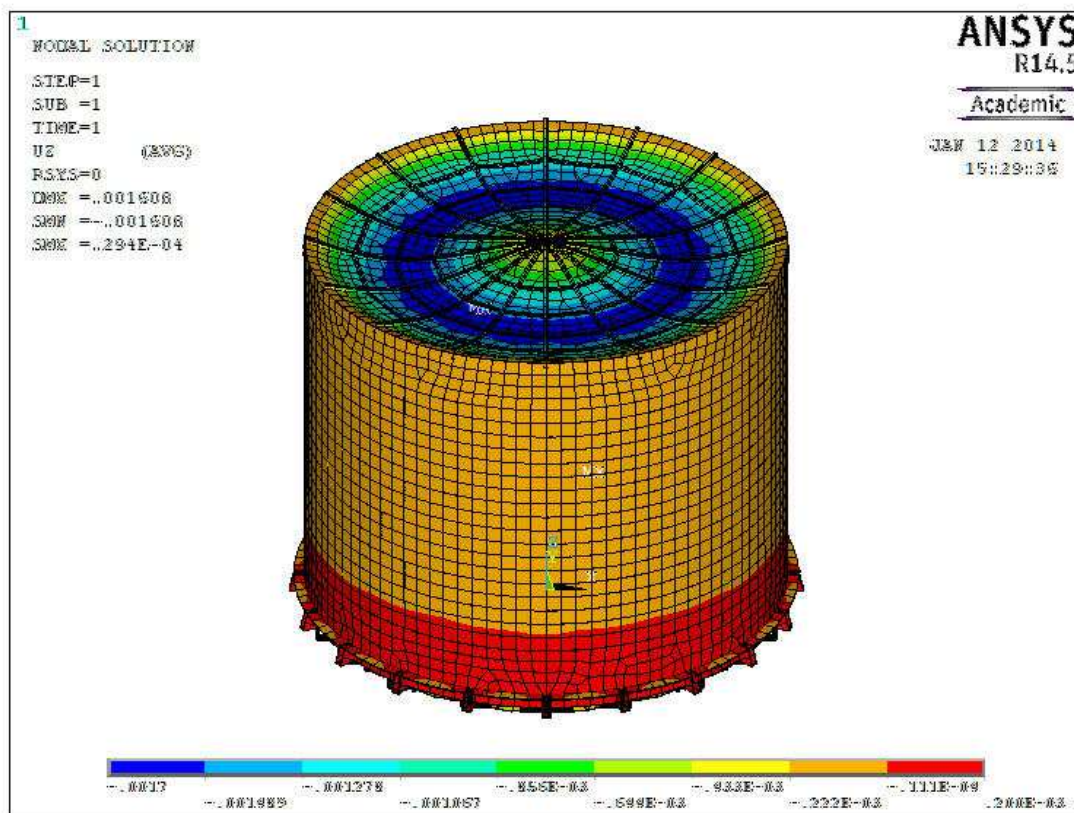
4 Statická analýza

Statická analýza určuje posuny, napětí a síly v konstrukci nebo v jejích částech, způsobené zatížením. Zatížení jsou definována pomocí zatěžovacích stavů. V rámci statické analýzy jsou vyšetřovány jednotlivé zatěžovací stavy a také jejich kombinace. Cílem statické analýzy je provedení zevrubného posouzení nádrže na statické účinky zatížení, ale také úvodní prověření korektního zadání konstrukce a kapalinové oblasti.

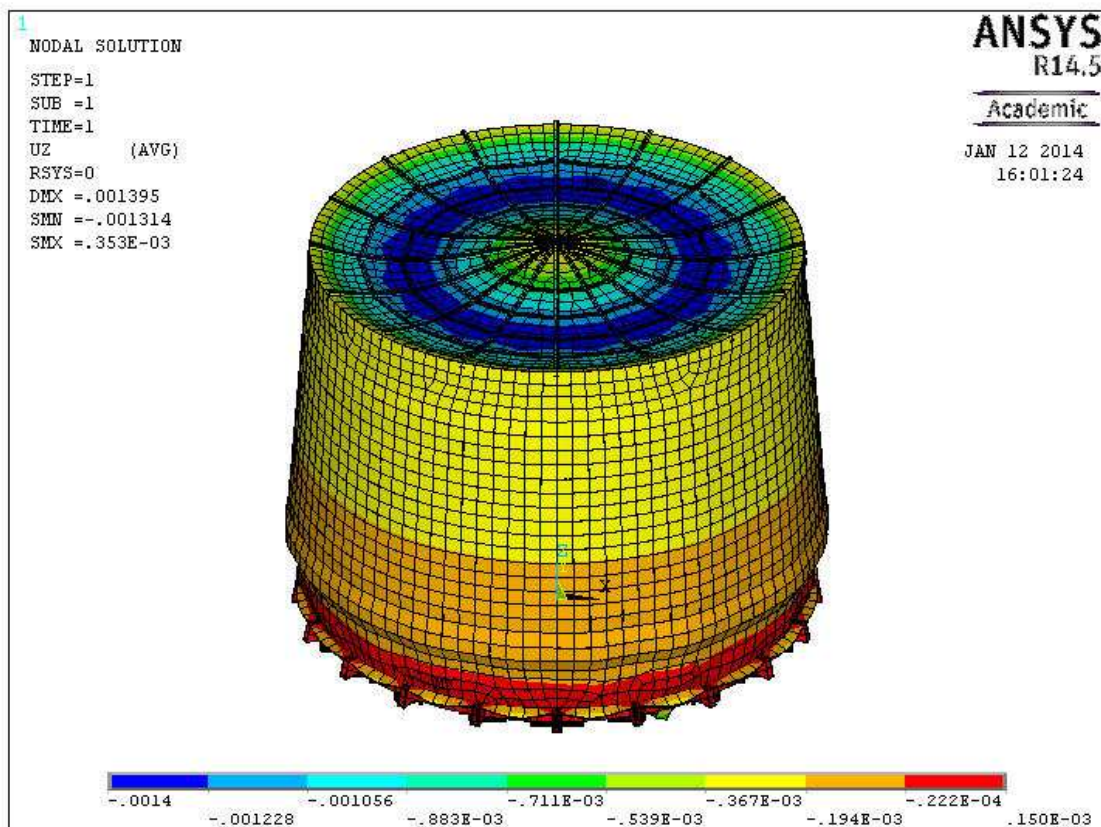
Pro posouzení konstrukce jsou uvažována některá zatížení působící na konstrukci. Tato zatížení jsou definována pomocí zatěžovacích stavů, aby bylo možné jednoduché provedení jejich kombinace. Statická analýza je provedena pro jednotlivé výpočtové modely zvlášť, aby bylo možné jejich porovnání.

4.1 ZS1: Vlastní tíha konstrukce

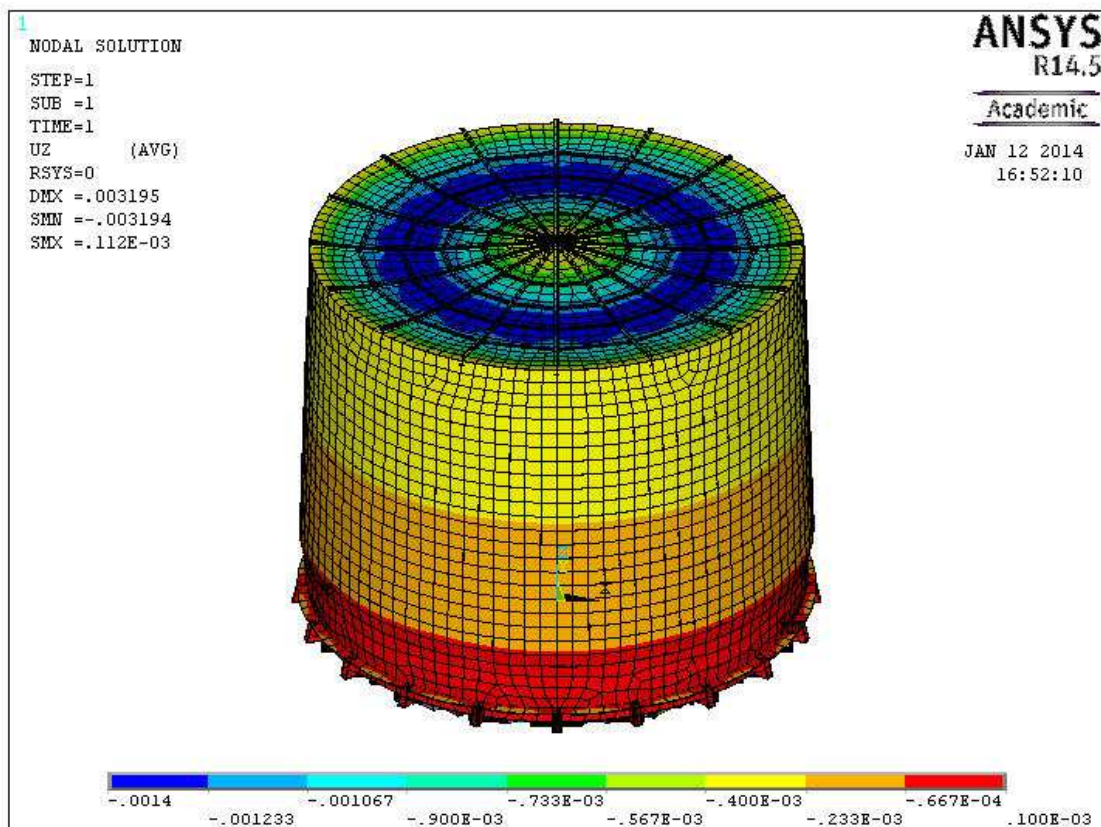
Jako první zatěžovací stav je definována vlastní tíha konstrukce, popř. vlastní tíha konstrukce s kapalinou. Parametry vlastní tíhy jsou dány materiálovými modely, tedy hustotami materiálů jednotlivých prvků, rozměry prvků a tíhovým zrychlením definovaným ve směru osy z hodnotou $9,81 \text{ ms}^{-2}$.



Obr. 4.1.1 vlastní tíha konstrukce bez kapaliny – pole posunutí ve směru z

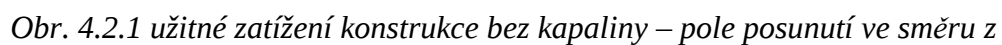


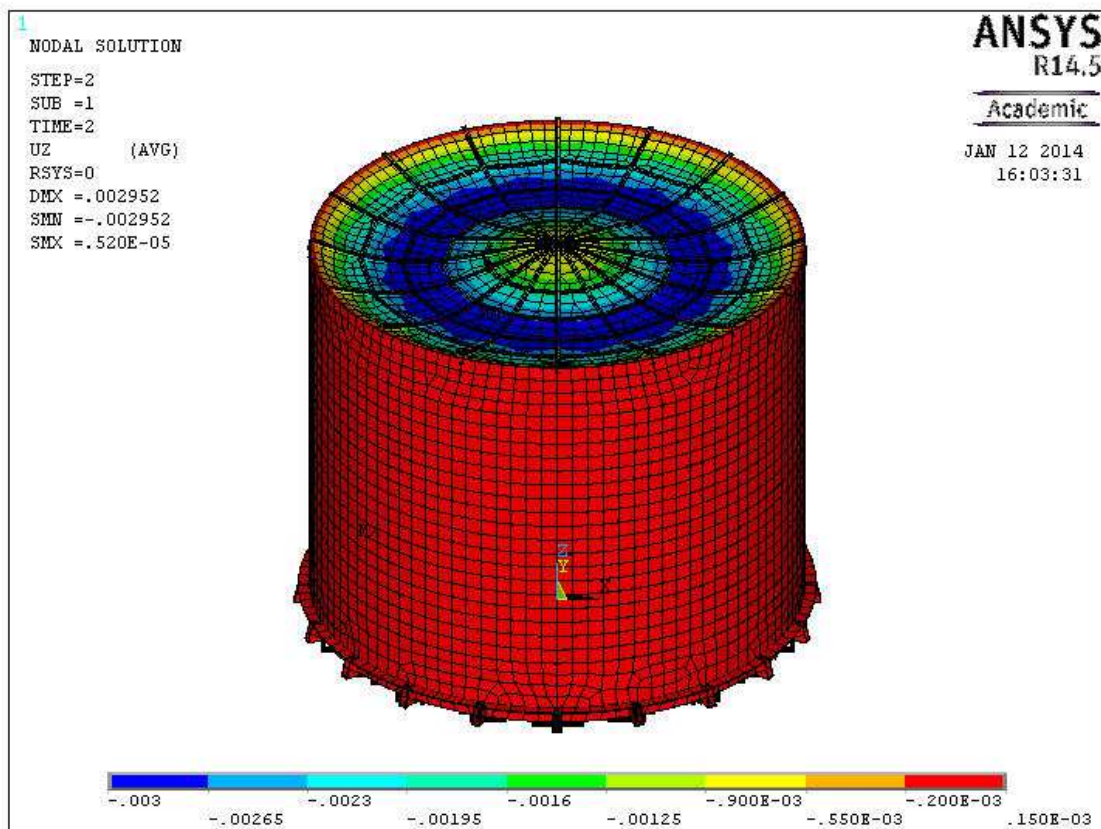
Obr. 4.1.2 vlastní tíha konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru z



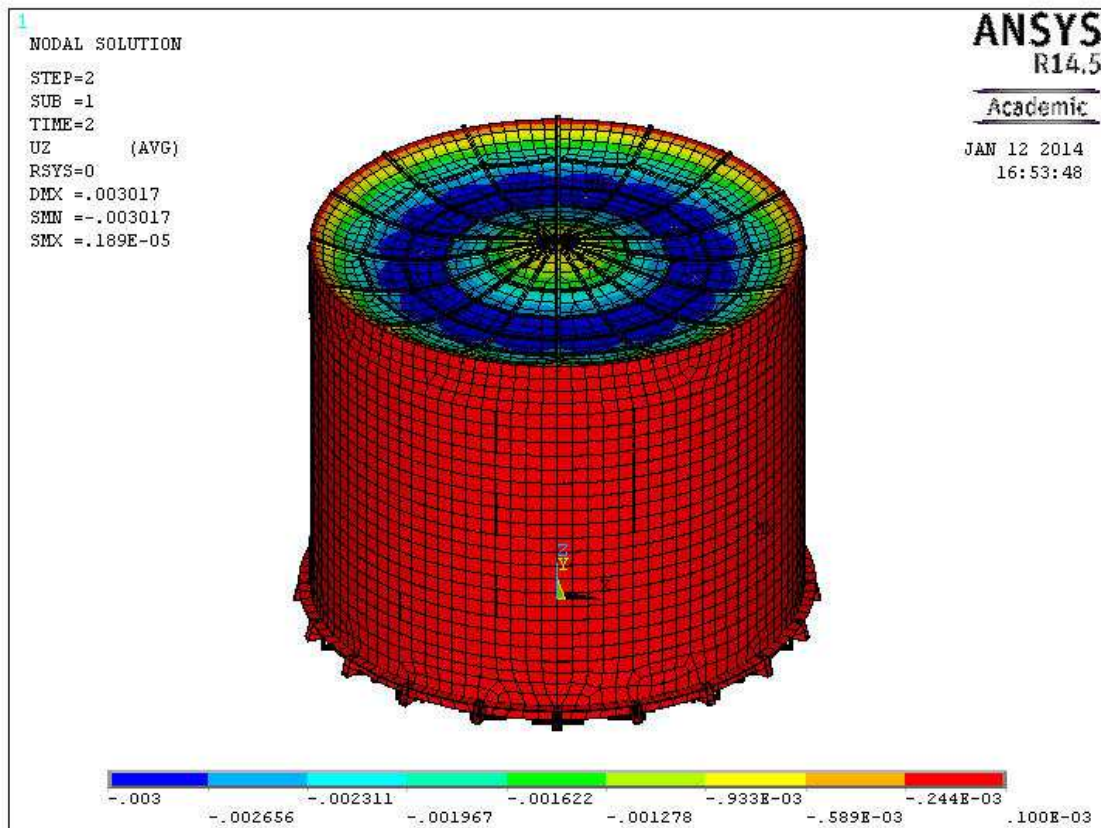
Obr. 4.1.3 vlastní tíha konstrukce s FLUID220 –pole posunutí ve směru z

Uvažuje se, že užité zatížení působí na konstrukci střešního pláště. Není blíže specifikováno, o jaké zatížení se jedná, ale působí formou tlaku na plech střešního pláště konstrukce hodnotou 2000 Nm^{-2} .



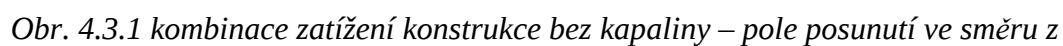


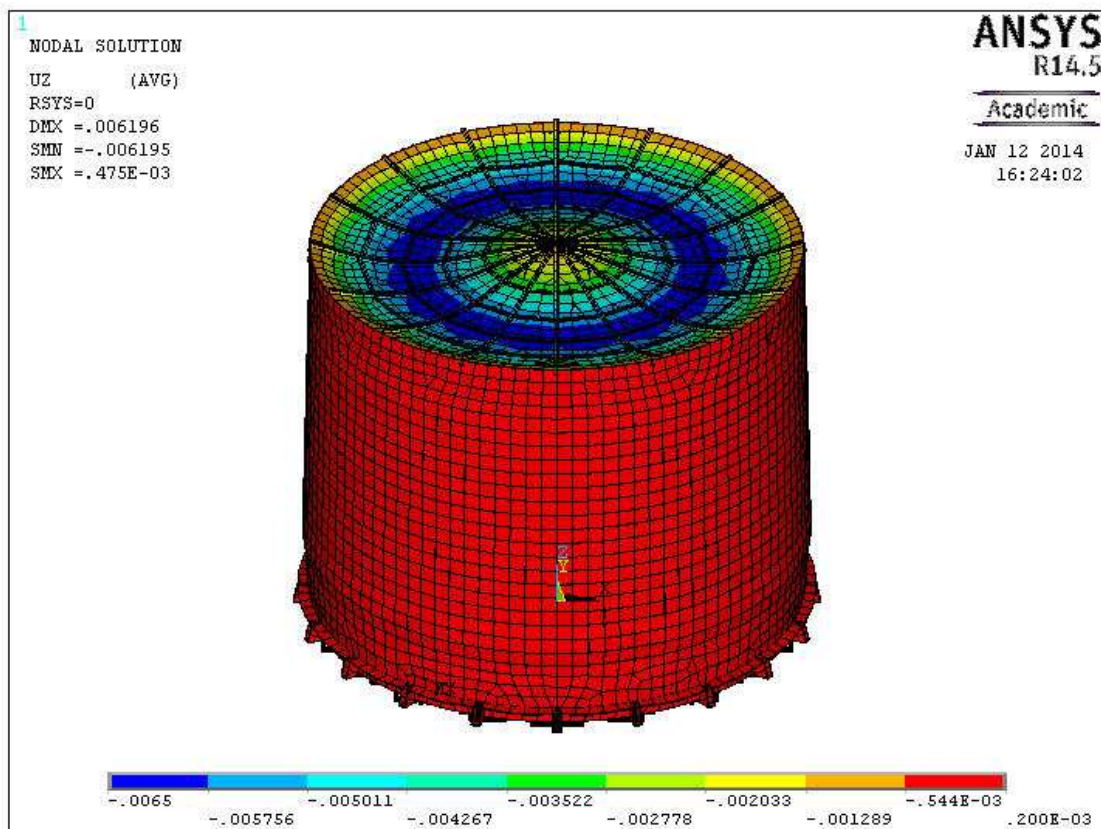
Obr. 4.2.2 užité zatížení konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru z



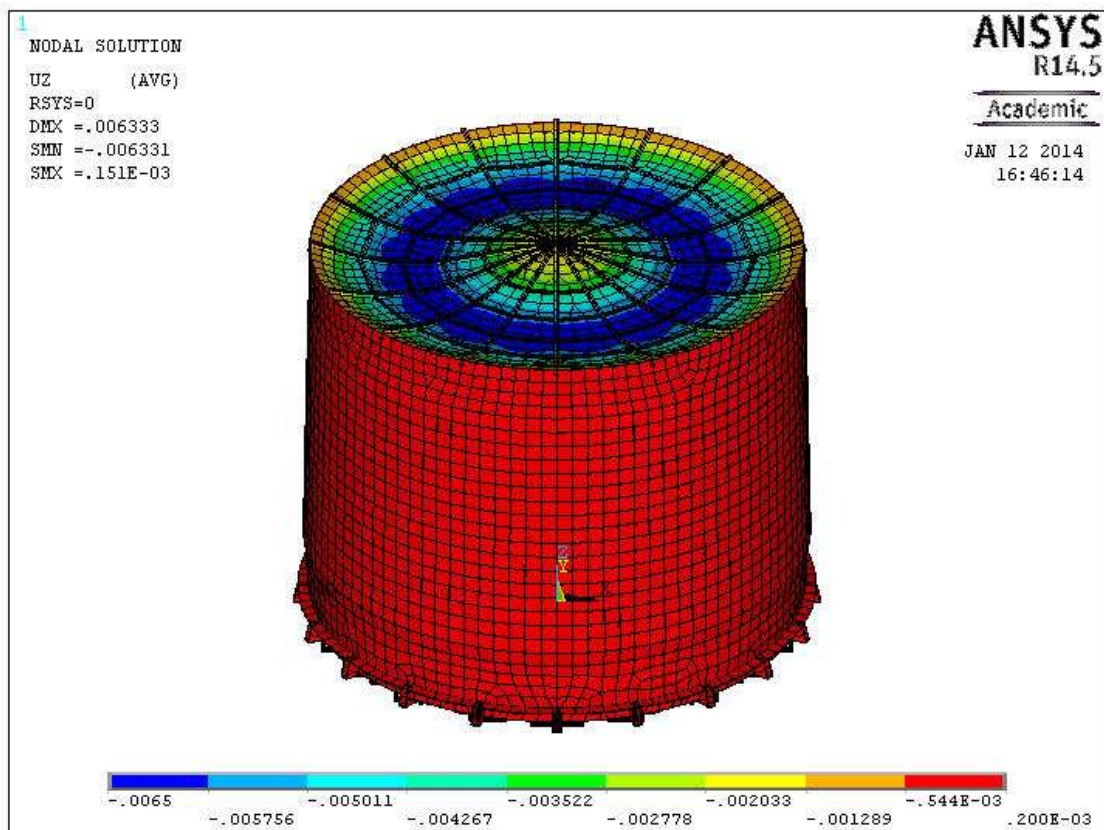
Obr. 4.2.3 užité zatížení konstrukce s FLUID220 – pole posunutí ve směru z

Je provedena kombinace těchto zatěžovacích stavů. Kombinace zatěžovacích stavů je řešena dle Eurokódu³, tedy dílčí součinitel vlastní tíhy je roven hodnotě 1,35 a dílčí součinitel užitého zatížení hodnotě 1,5. Dílčími součiniteli přenásobené hodnoty vlastní tíhy a užitého zatížení jsou vzájemně sečteny.

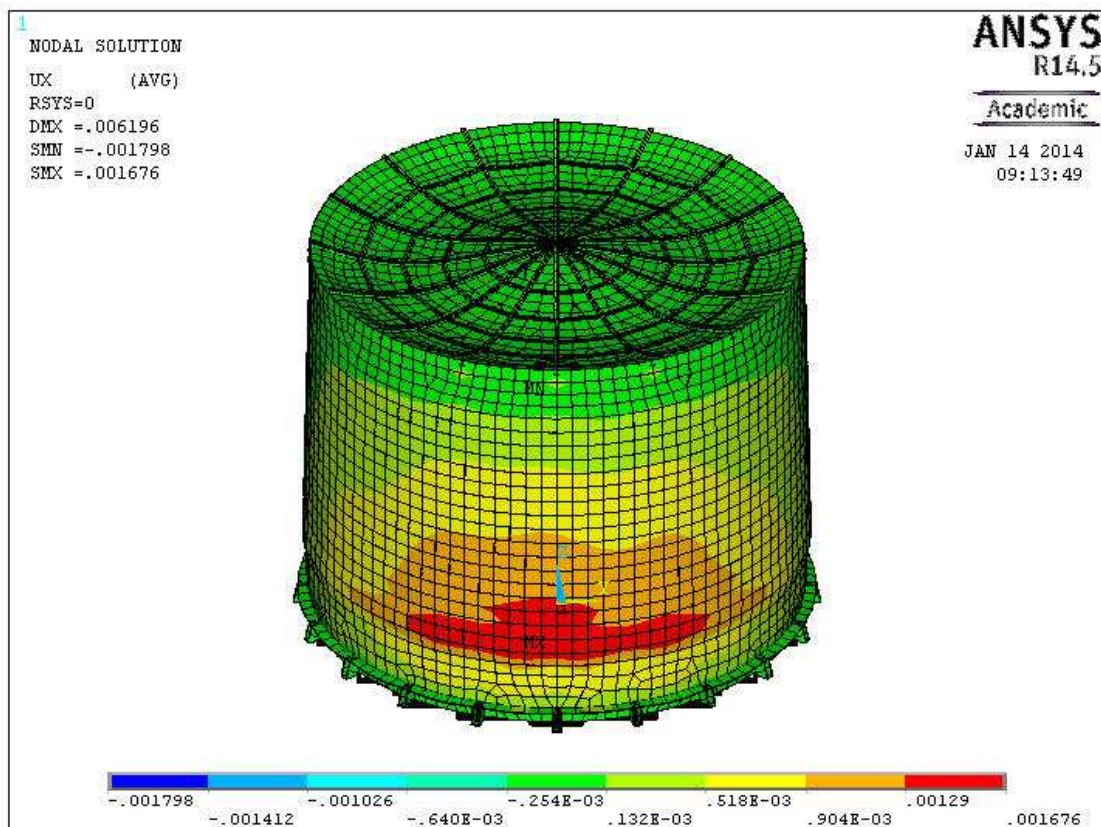




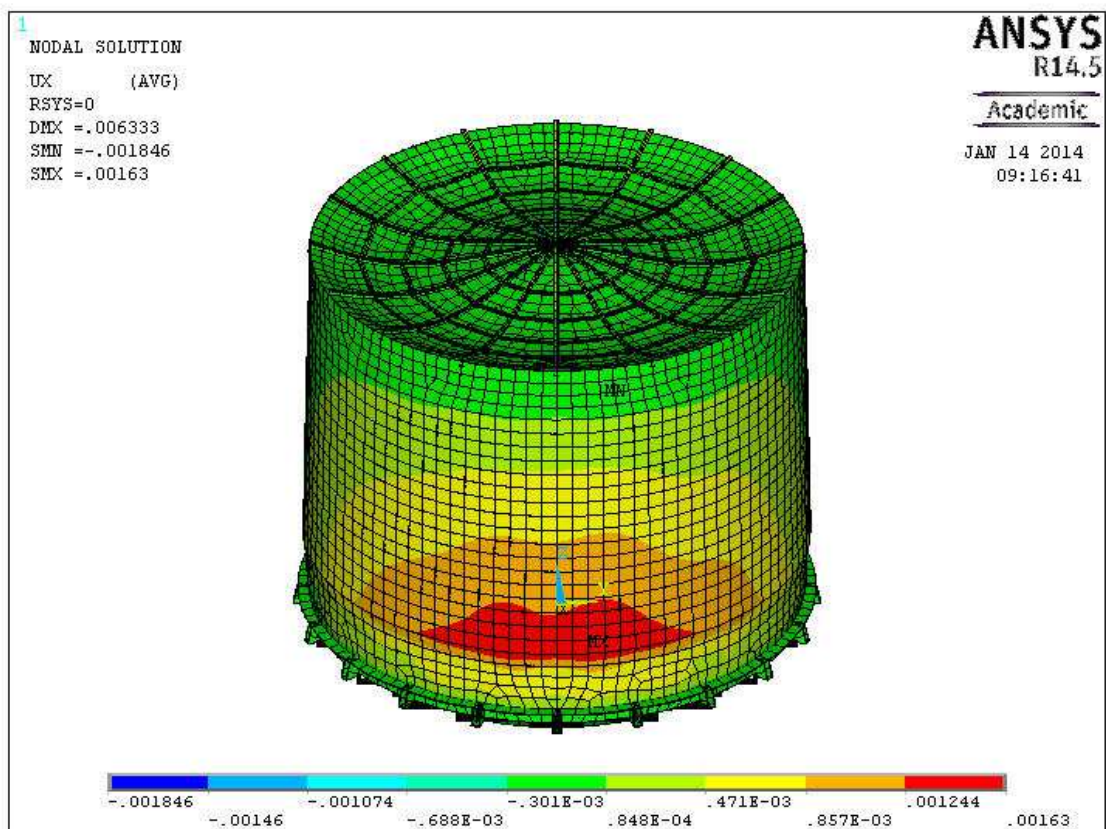
Obr. 4.3.2 kombinace zatížení konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru z



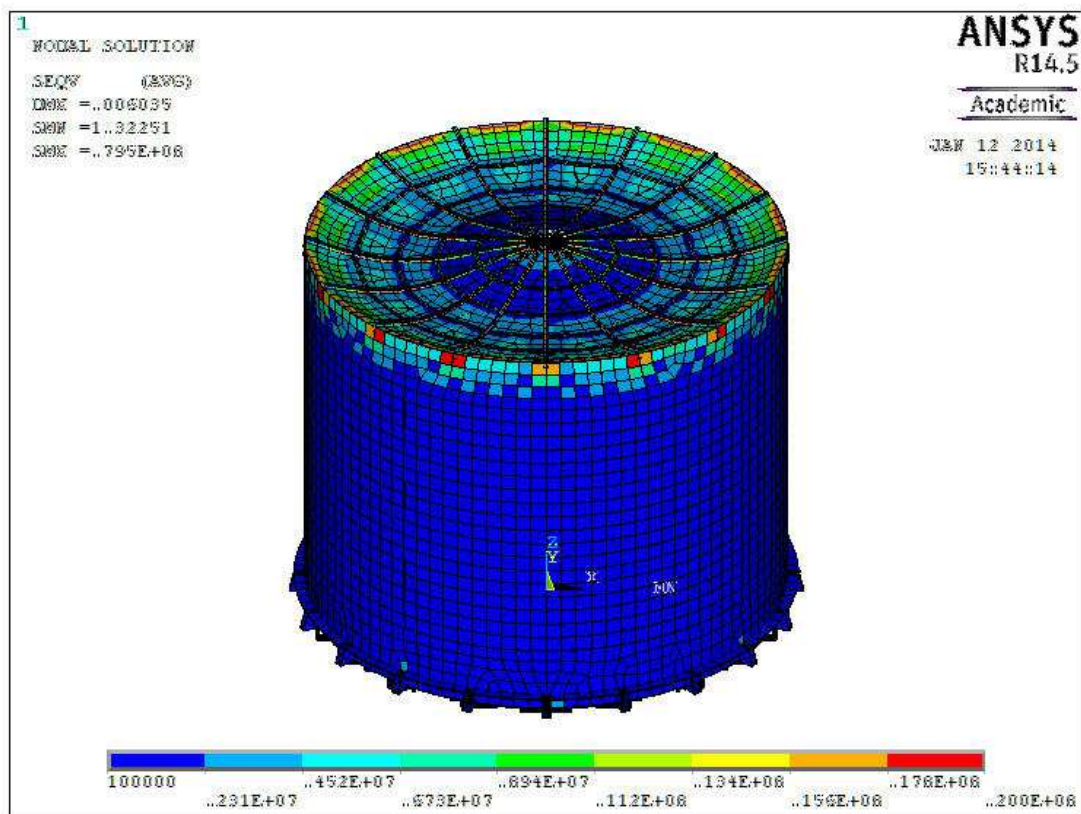
Obr. 4.3.3 kombinace zatížení konstrukce s FLUID220 – pole posunutí ve směru z



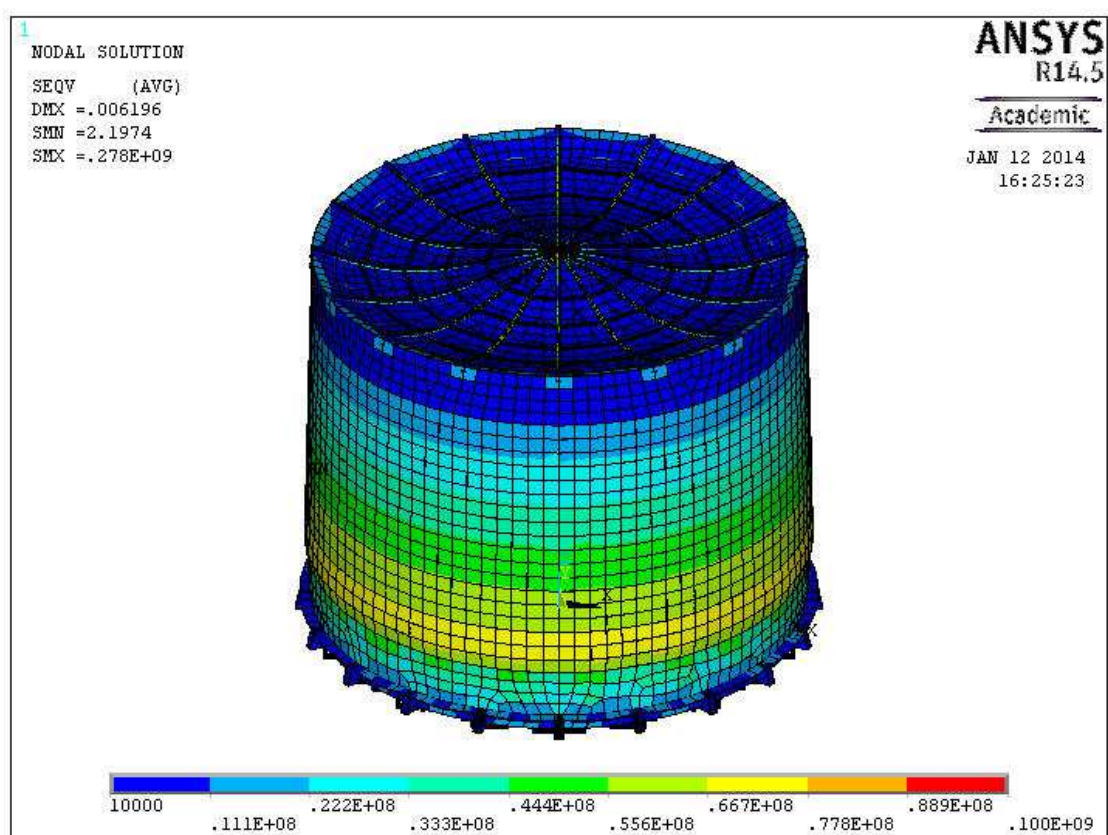
Obr. 4.3.4 kombinace zatížení konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru x



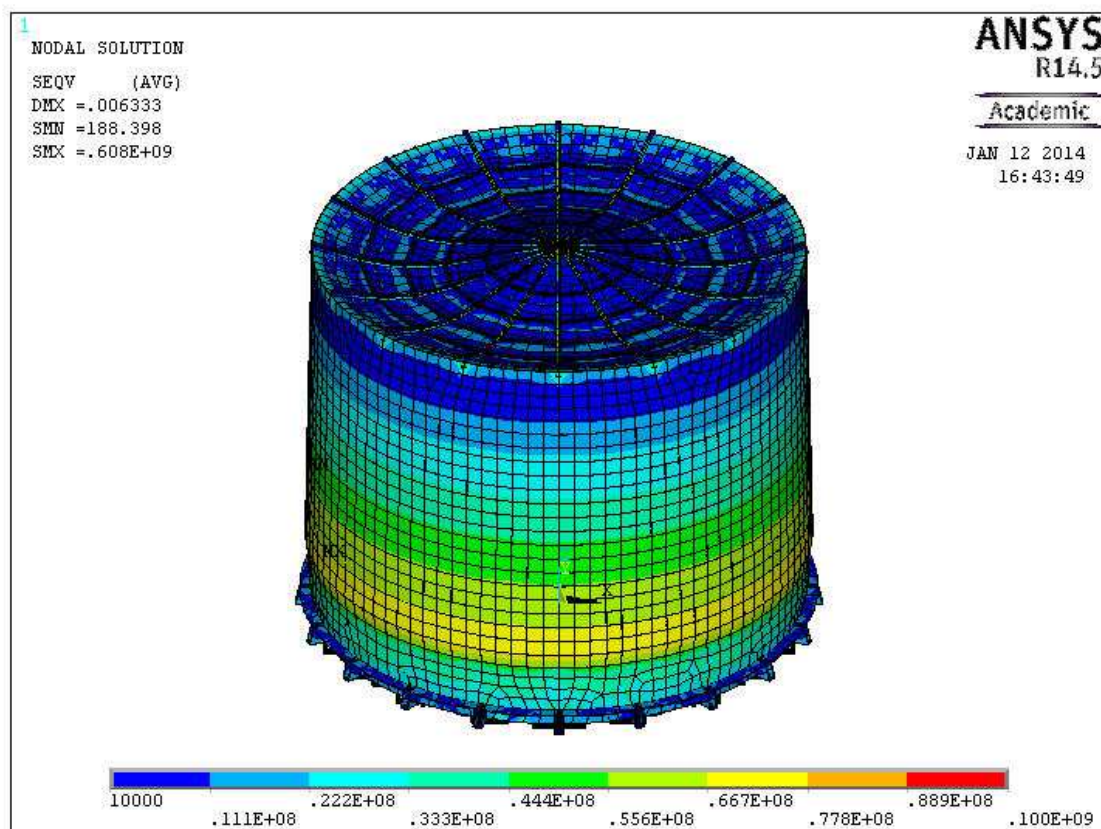
Obr. 4.3.5 kombinace zatížení konstrukce s FLUID220 – pole posunutí ve směru x



Obr. 4.3.6 kombinace zatížení konstrukce bez kapaliny – tlakové pole



Obr. 4.3.7 kombinace zatížení konstrukce s FLUID30 – tlakové pole



Obr. 4.3.8 kombinace zatížení konstrukce s FLUID220 – tlakové pole

Z obrázků je patrné, že pole posunutí ve směru osy z příliš nezávisí na tom, zda je uvažována konstrukce s kapalinovým prostředím nebo bez něj. Hodnoty průhybů v jednotlivých místech konstrukce a v jednotlivých zatěžovacích stavech, tak i v jejich kombinaci, jsou velmi podobné. Tuto skutečnost zajišťuje velmi dobré podepření konstrukce. Konstrukce je kotvena pomocí pravidelně rozmístěných patek a je podepřena v každém bodě křížení podkladního roštu.

FZ	Vlastní tíha	Užitné zatížení	kombinace
Bez kapaliny	199,32 kN	132,88 kN	572,32 kN
FLUID30	5180,7 kN	132,88 kN	7193,2 kN
FLUID220	5180,7 kN	132,88 kN	7193,2 kN

Tabulka 4.3.1 Celková reakce F_z

Tabulka popisuje celkovou reakci ve směru osy z pro jednotlivé výpočtové modely a jejich jednotlivé zatěžovací stavy. V případě užitného zatížení je patrné, že toto zatížení nezávisí na tom, zda se jedná o konstrukci s kapalinovým prostředím nebo bez něj. Naproti tomu při řešení vlastní tíhy síla významně vzrostla, dokonce o celý řád. V případě výpočtových modelů s různě definovaným kapalinovým prostředím se však tato hodnota nemění. Tentýž vývoj je možné sledovat také v případě kombinace zatěžovacích stavů. Při řešení vlastní tíhy síla významně vzrostla. V případě výpočtových modelů s různě definovaným kapalinovým prostředím se však tato hodnota nemění.

Pole posunutí ve směru osy x není v případě kombinace zatěžovacích stavů konstrukce bez kapaliny příliš zajímavé. Jeho hodnoty se po výšce pláště nemění. V případě kombinace zatěžovacích stavů výpočtových modelů konstrukce s kapalinovým prostředím jsou výsledky shodné a zajímavější než v případě výpočtového modelu bez kapalinového prostředí. V případě obou modelů s kapalinovým prostředím jsou patrné posuny ve směru osy x odpovídající vývoji tlaku od kapaliny po výšce pláště. Jelikož je ale plášť ve spodní části konstrukce ztužen ztužujícím prstencem a také zesílenou tloušťkou pláště, je oblast maximálního posunu ve směru osy x lokalizována na přechodu tloušťky pláště.

Tlaková pole v případě kombinace zatěžovacích stavů jsou na horní části konstrukce ve všech třech případech velmi podobná. V případě výpočtového modelu bez kapalinového prostředí jsou tlaky po výšce pláště konstrukce prakticky neměnné, zatímco v případech s kapalinovým prostředím se hodnoty po výšce pláště opět mění. Na vývoji těchto hodnot je možné sledovat působení hydrostatického tlaku, který se vlivem vlastní tíhy kapaliny směrem dolů zvětšuje. Jelikož je ale plášť ve spodní části konstrukce ztužen ztužujícím prstencem a také zesílenou tloušťkou pláště, je oblast maximálního napětí lokalizována na přechodu tloušťky pláště.

5 Modální analýza

Modální analýza určuje charakteristiky konstrukce vzniklé vlivem vibrací, jako jsou vlastní frekvence konstrukce a jim příslušné tvary kmitu. Modální analýza se často využívá jako prvotní výpočet pro další typy analýzy. Modální analýza je tedy obecně úlohou výpočtu vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu.

Spojité soustavy může mít v obecných úlohách nekonečně mnoho vlastních dvojic (vlastních tvarů kmitu a frekvencí). Každé jedné frekvenci odpovídá jeden vlastní tvar kmitu. Z praktického hlediska je vhodné vzestupné uspořádání frekvencí. Jsou-li hodnoty frekvencí od sebe významně vzdáleny, mluvíme o tzv. řídkém spektru. Naopak hustým pak nazýváme spektrum v případě, že se následující hodnoty frekvencí liší o méně než deset procent. Některé frekvence mohou mít stejnou nebo blízkou hodnotu. Skupiny takovýchto blízkých frekvencí nazýváme shluky frekvencí (clustery). Obecně jsou pro výpočet zajímavé tvary kmitu odpovídající frekvencím do 500 Hz. V případě této úlohy jsou uvažovány vlastní tvary kmitu odpovídající frekvencím přibližně do 30 Hz.

Obecně je možné vlastní tvary kmitu a frekvence soustavy s mnoha stupni volnosti dvěma základními metodami a to Householderovou metodou bisekce, která využívá principu inverzní iterace nebo Lanczosovou metodou.

Householderovou metodou bisekce je možné získat všechny vlastní hodnoty soustavy (vlastní tvary kmitu a frekvence). Tato metoda je účinná v případě, že hledáme všechny vlastní tvary kmitu a frekvence a matice jsou zároveň plné nebo mají velkou šířku pásů (do 5000 rovnic).

Naproti tomu Lanczosova metoda se zaměřuje na výpočet vlastních tvarů kmitu a frekvencí pouze v levé části spektra. Řešení se provádí řešení po blocích a využívá podobnostní transformaci s Rayleighovou-Ritzovou metodou. V současné době je to nejefektivnější metoda nahazující iteraci podprostoru. Tato metoda dovoluje určovat vlastní frekvence a odpovídající tvary kmitu v zadaných frekvenčních mezích (řádově do milionu a více rovnic). Obě uvedené metody jsou iterační.

V případě řešení úlohy programovým systémem ANSYS je před samotným výpočtem modální analýzy nutné provést nastavení výpočtu. Řešení úlohy je závislé na vhodně zvolené metodě výpočtu.

Metody Block Lanczos a PCG Lanczos obě využívají Lanczosovy iterační metody pro zjištění požadovaných vlastních tvarů kmitů a frekvencí. Metoda Block Lanczos využívá při řešení úlohy řídké přímé řešiče, zatímco metoda PCG Lanczos využívá PCG iterativní řešiče, které řeší systém rovnic na každé Lanczosově iteraci. V této úloze je výpočet vlastních tvarů kmitů a frekvencí řešen pomocí metody Block Lanczos. Použití metody Block Lanczos je vhodné v případě velkých modelů. Tato metoda je poměrně rychlá a robustní a je také nejčastěji využívaná. Použití Block Lanczosovy metoda je však možné pouze v případě symetrických úloh.

Metoda Unsymmetric je vhodná pro řešení všech úloh, jejichž matice systému rovnic je nesymetrická. Tuto skutečnost je možné popsat rovnicí.

$$[K]\{\Phi_j\} = \lambda_j[M]\{\Phi_j\}$$

K . . . matice tuhosti

M . . . matice hmotnosti

Φ_j . . . vlastní vektor

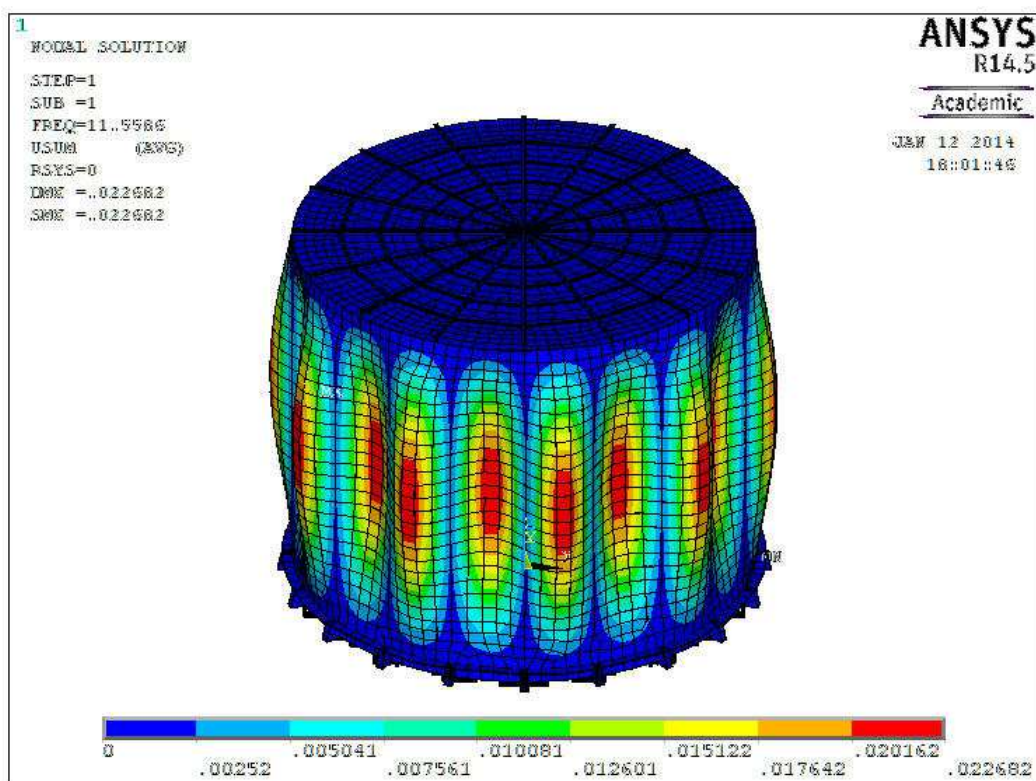
V tomto případě jsou nesymetrické obě matice, matice tuhosti i matice hmotnosti. Typickým příkladem úlohy s nesymetrickou maticí je například řešení rotor, ale také úlohy řešení interakce konstrukce s kapalinou. Pro kapalinové prvky obecně je defaultně nastavena nesymetrická matice. Pak ale nastává problém s následným výpočtem, například spektrální analýzou. Spektrální analýzu totiž není možné počítat s nesymetrickou maticí prvku. Je tedy nutné změnit defaultní nastavení nesymetrické matice prvku na symetrickou a modální analýzu spočítat znovu některou z metod výpočtu pro metrické matice prvku. V této úloze byla modální analýza vypočítána nejprve pomocí metody Unsymmetric a následně, aby byl umožněn výpočet spektrální analýzy, také pomocí metody Block Lanczos.

5.1 Výsledky modální analýzy

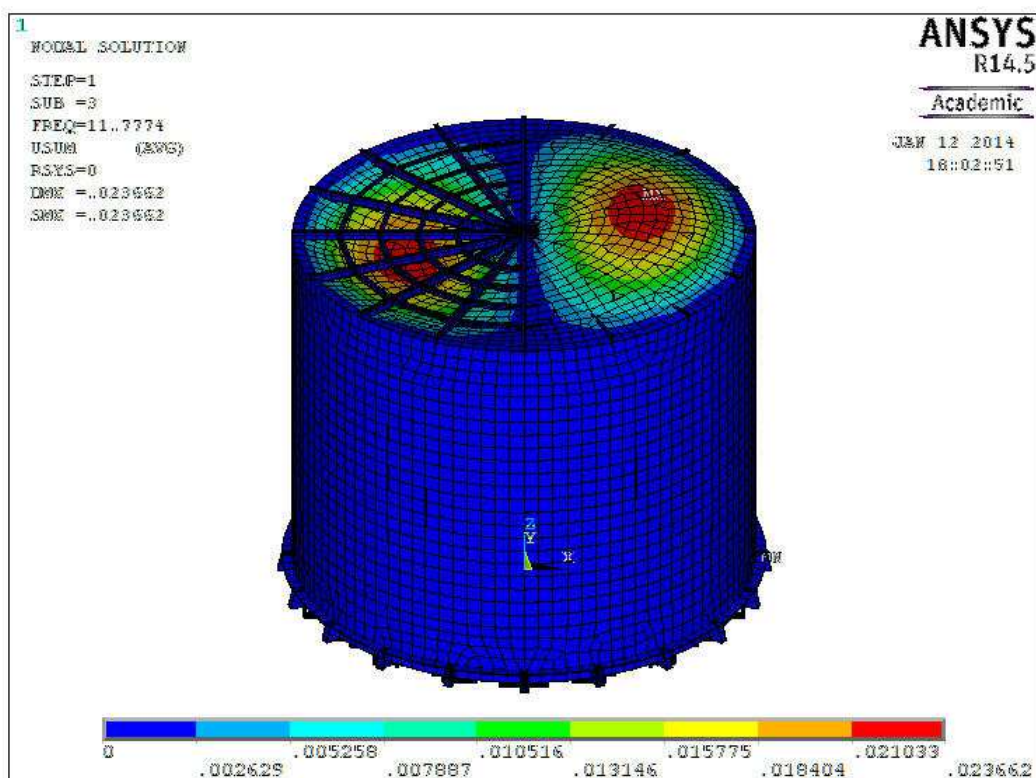
Je nutné správné nastavení výpočtu. Ve všech třech případech modelu bylo nutné nastavit výpočet modální analýzy tak, aby matice prvku byla symetrická. Modální analýza byla ve všech třech případech výpočtových modelů počítána metodou Block Lanczos. V případě konstrukce bez kapaliny byl zvolen počet sta módů. V ostatních dvou případech byl zvolen počet vyšší, protože vlastní frekvence odpovídající vlastním tvarům kmitu jsou pro stejné tvary kmitu v modelech bez kapalinového prostředí obecně vyšší než v modelech s kapalinou.

SOLUTION OPTIONS

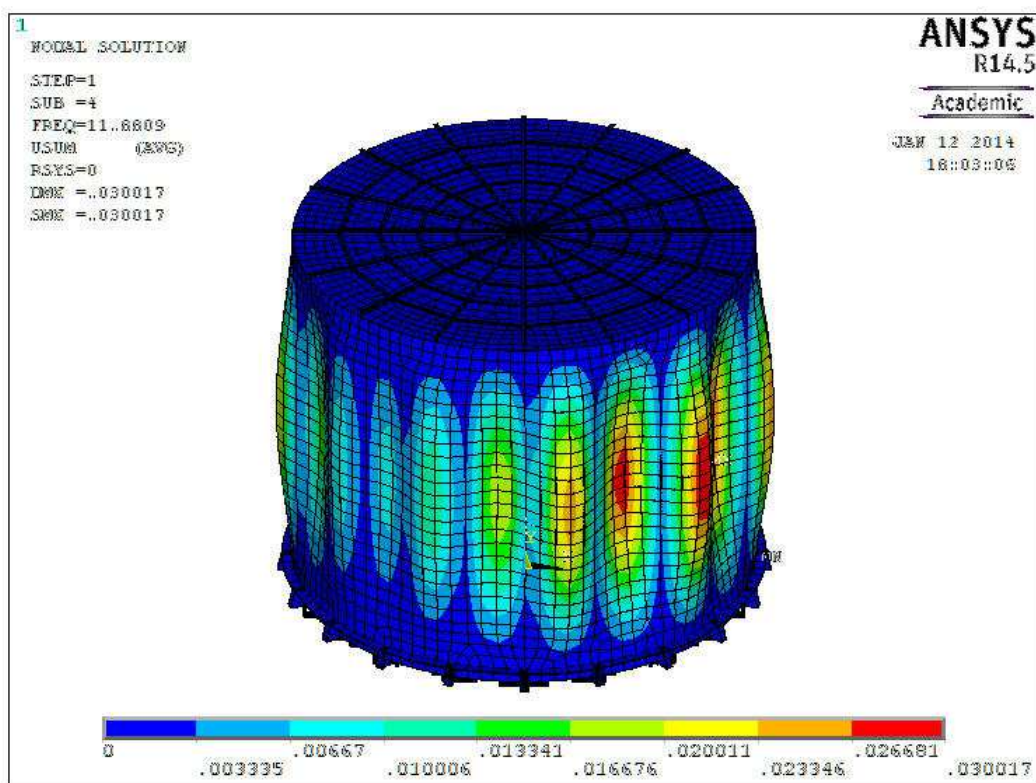
PROBLEM DIMENSIONALITY.....3-D
DEGREES OF FREEDOM..... UX UY UZ ROTX ROTY ROTZ
ANALYSIS TYPE.....MODAL
EXTRACTION METHOD.....BLOCK LANCZOS
EQUATION SOLVER OPTION.....SPARSE
NUMBER OF MODES TO EXTRACT..... 100
GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX.....SYMMETRIC
NUMBER OF MODES TO EXPAND..... 100
ELEMENT RESULTS CALCULATION.....OFF



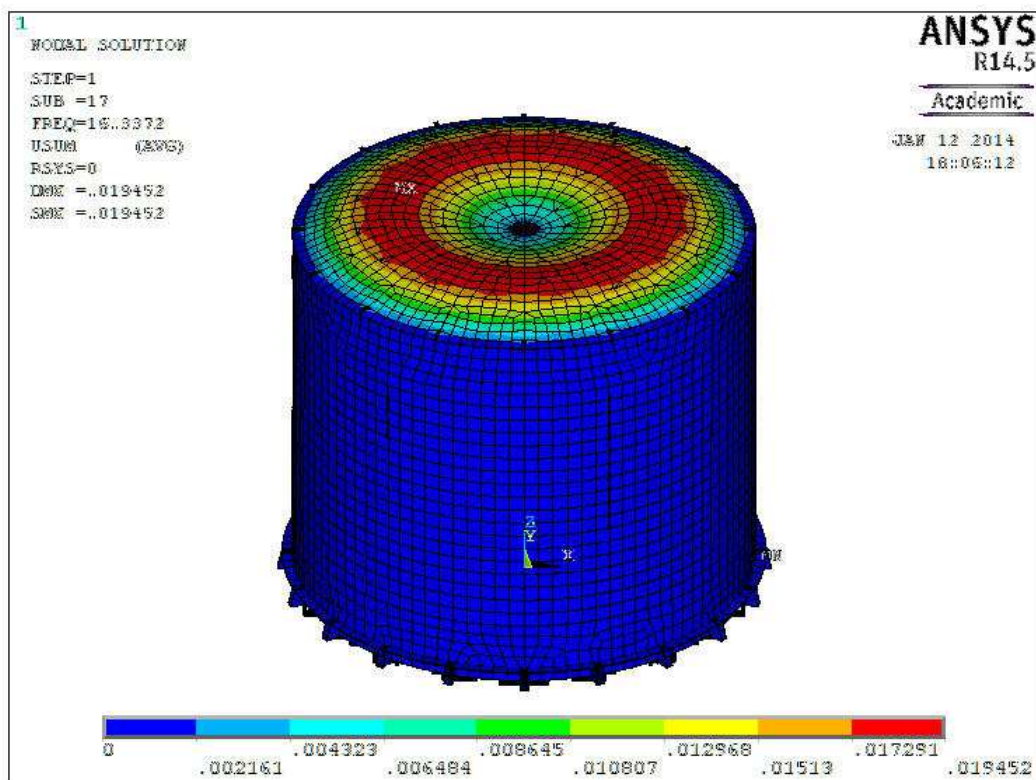
Obr. 5.1.1 Tvar kmitu č.1



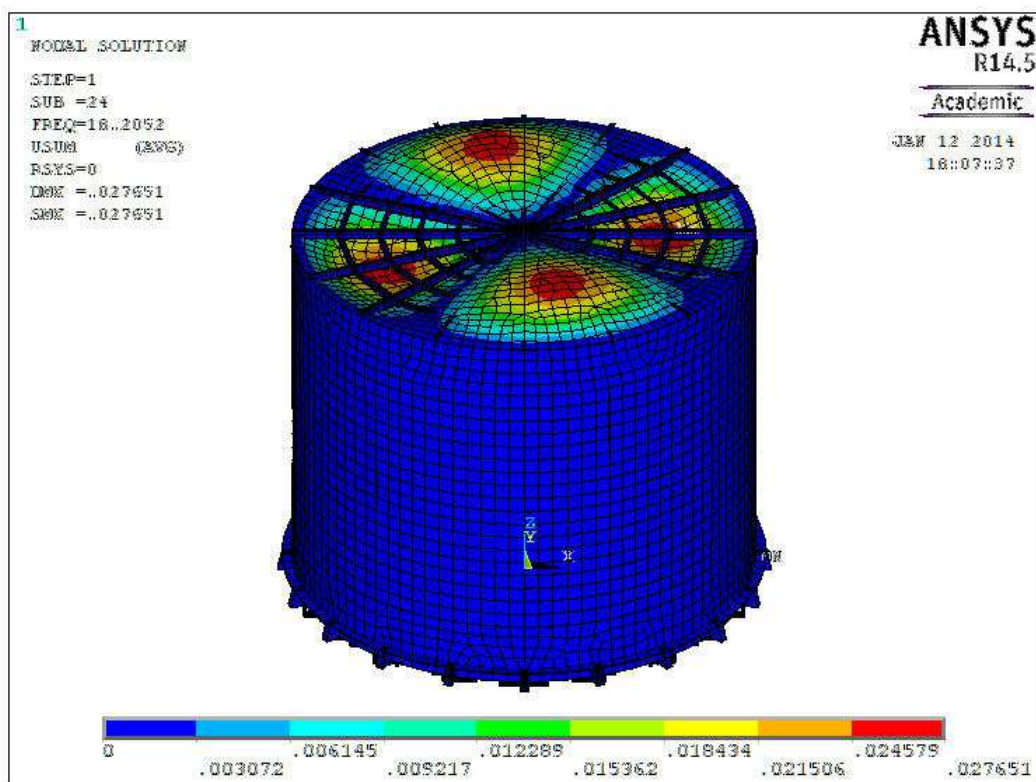
Obr. 5.1.2 Tvar kmitu č.2



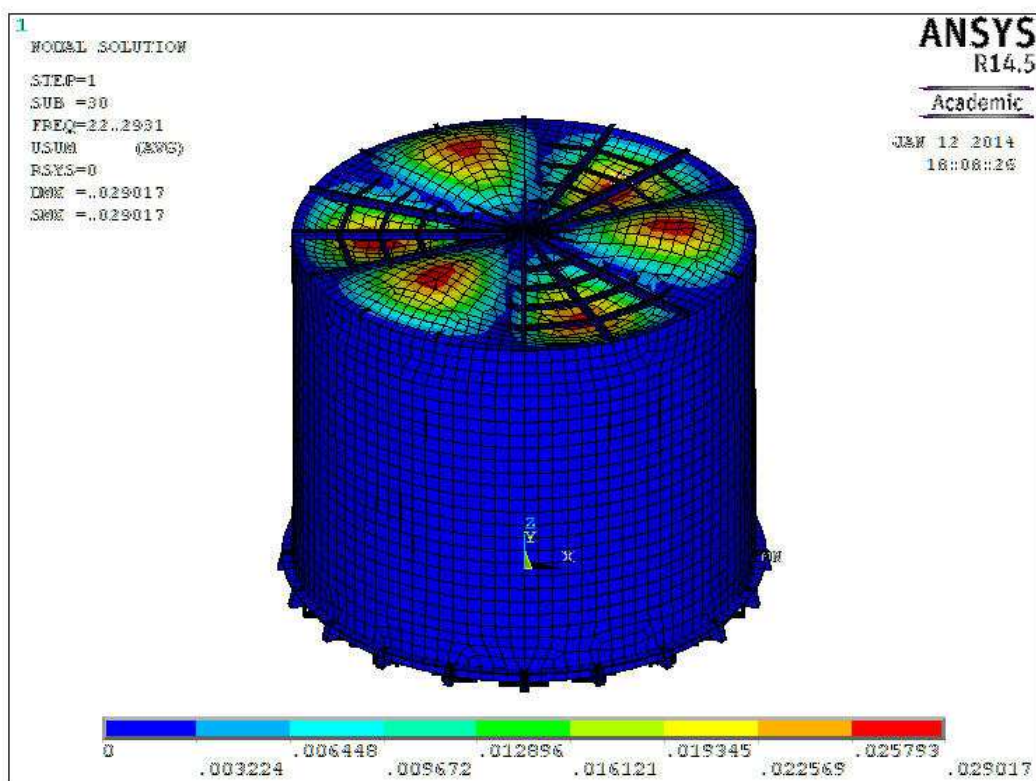
Obr. 5.1.3 Tvar kmitu č.3



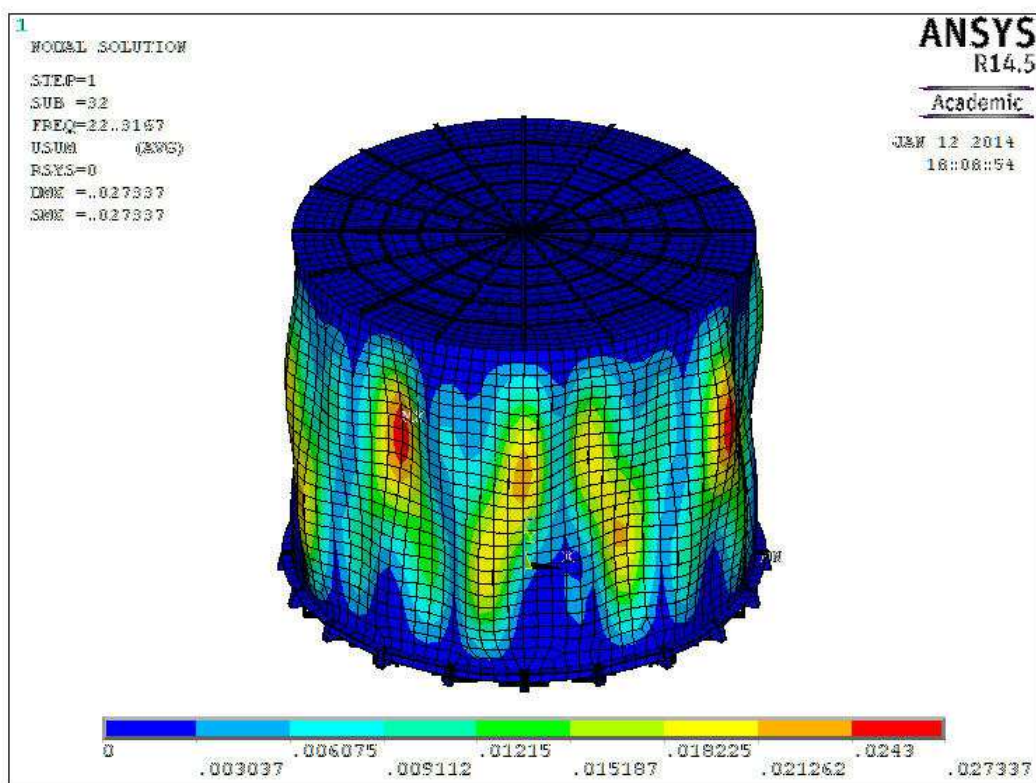
Obr. 5.1.4 Tvar kmitu č.4



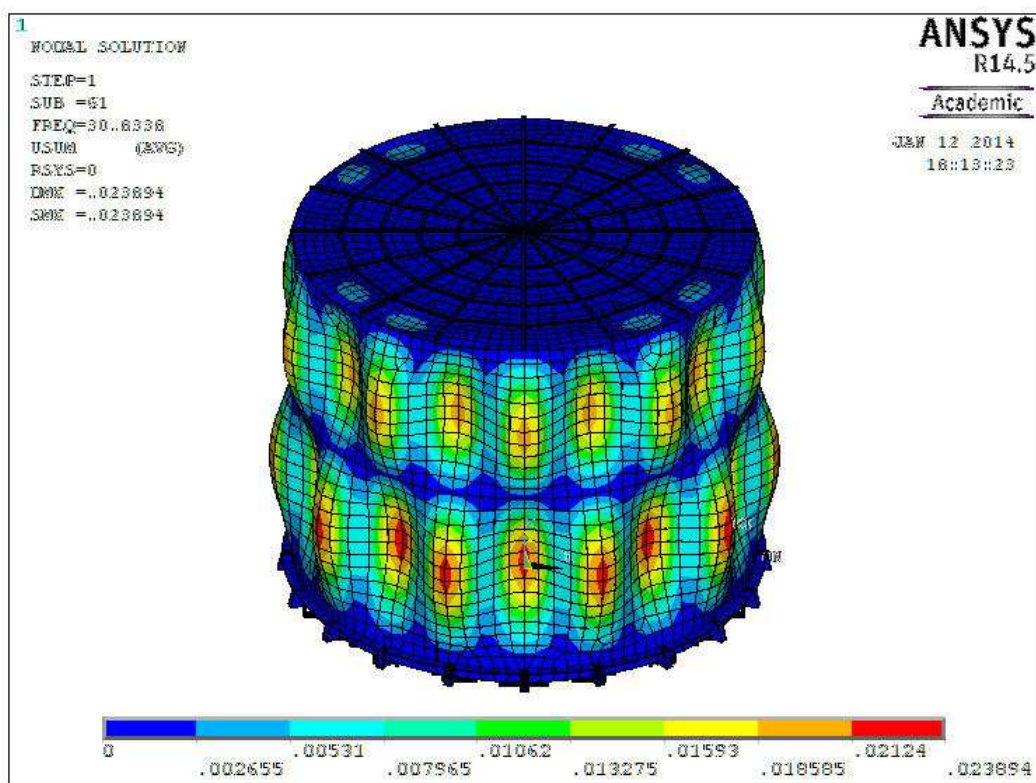
Obr. 5.1.5 Tvar kmitu č.5



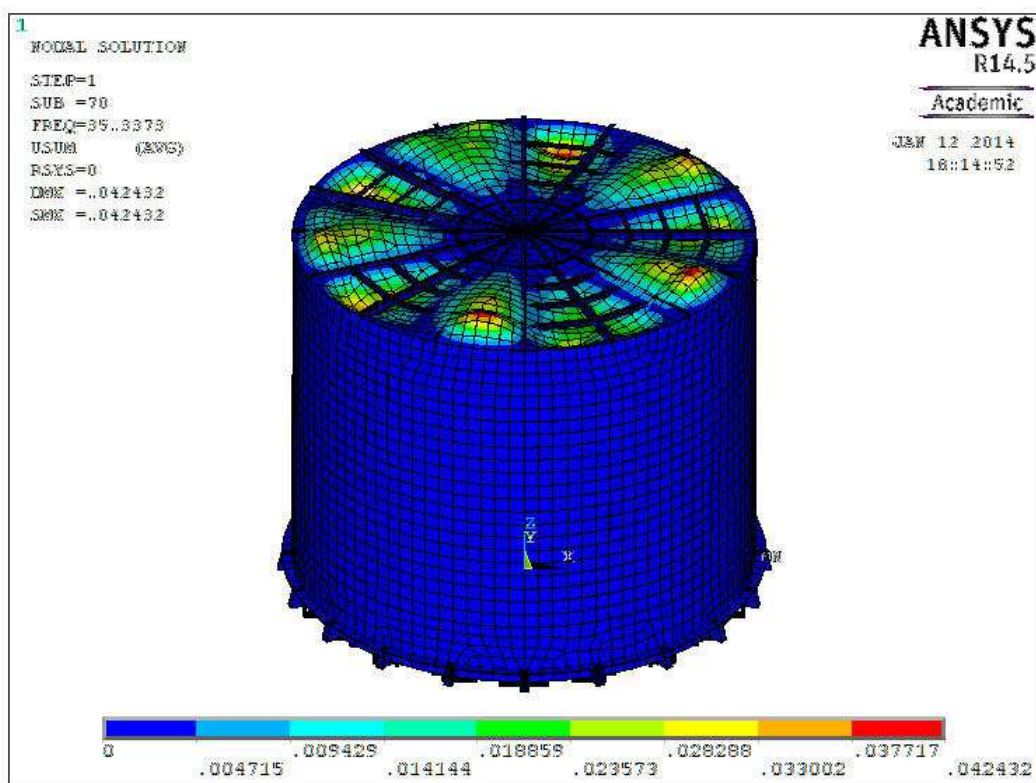
Obr. 5.1.6 Tvar kmitu č.6



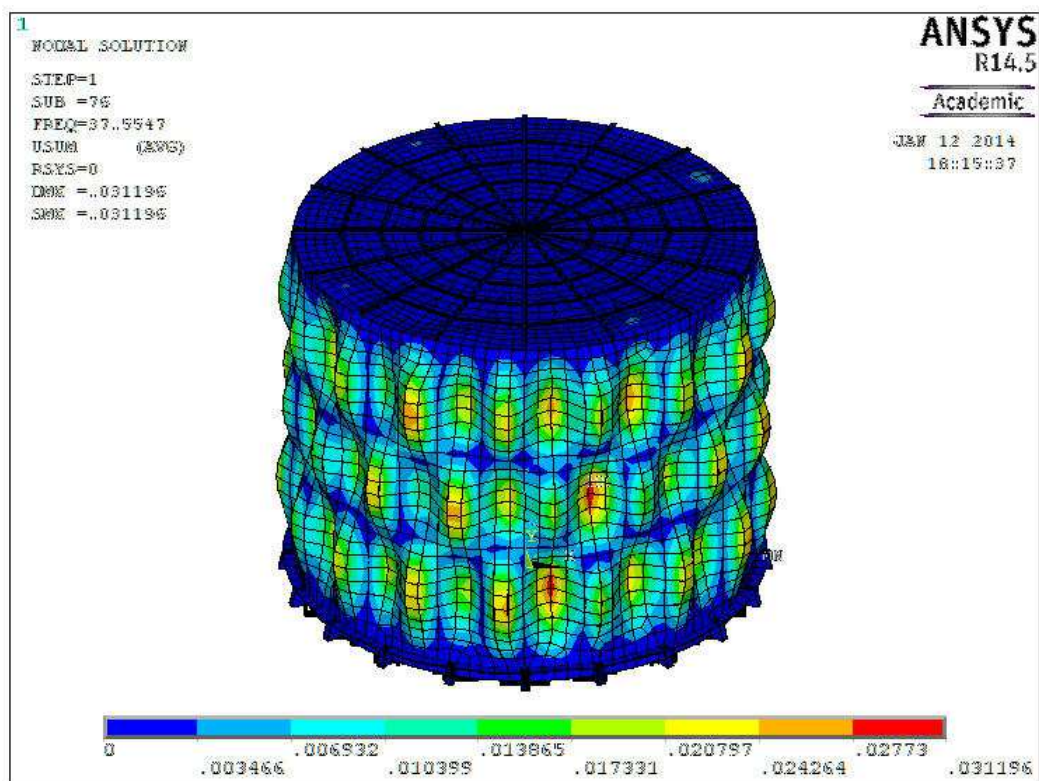
Obr. 5.1.7 Tvar kmitu č.7



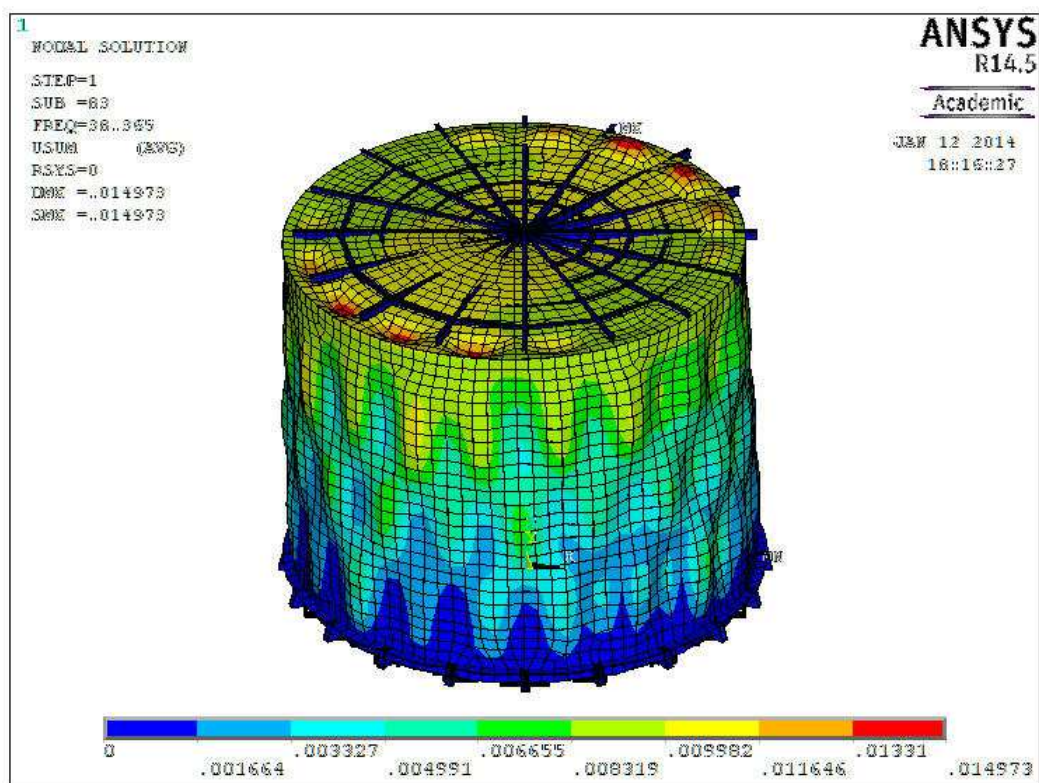
Obr. 5.1.8 Tvar kmitu č.8



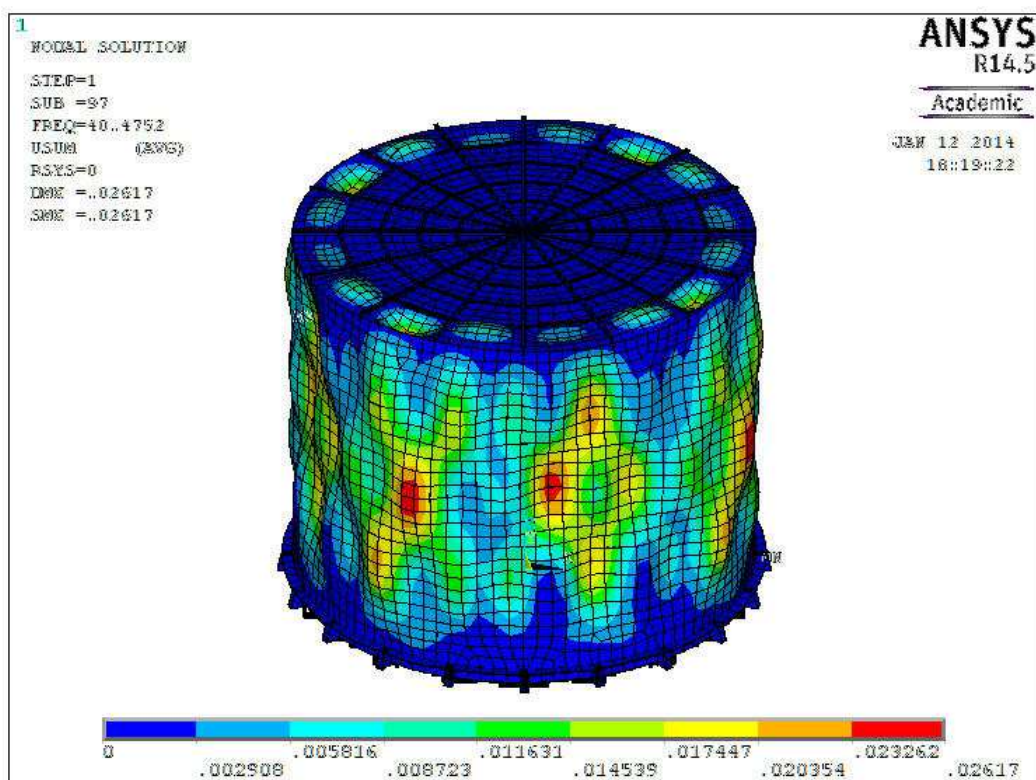
Obr. 5.1.9 Tvar kmitu č.9



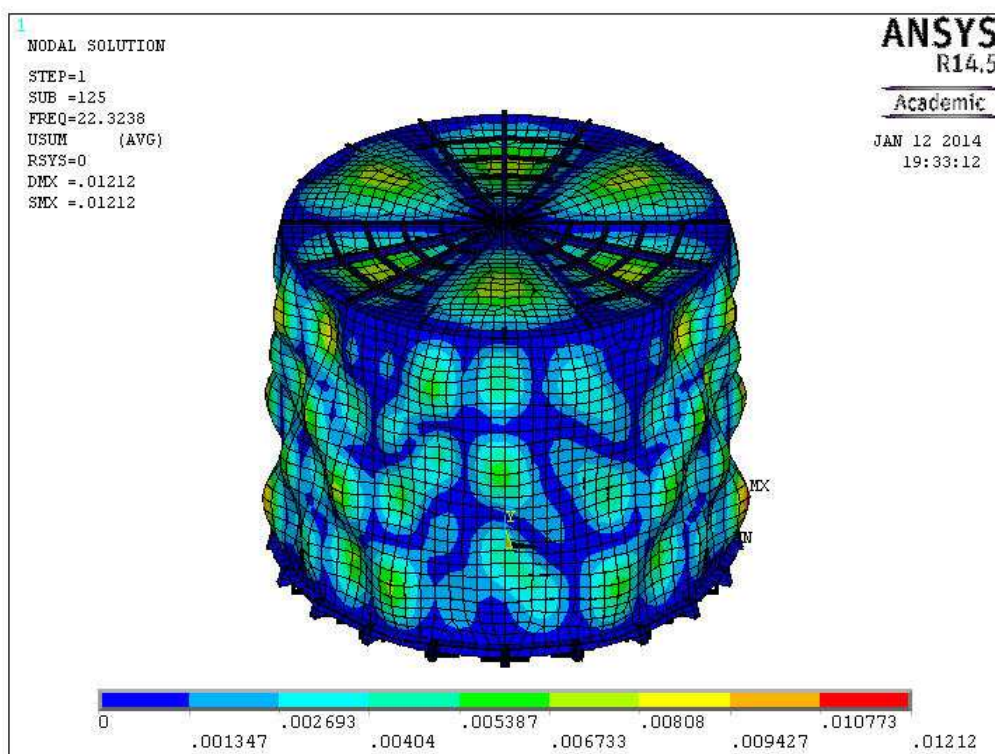
Obr. 5.1.10 Tvar kmitu č.10



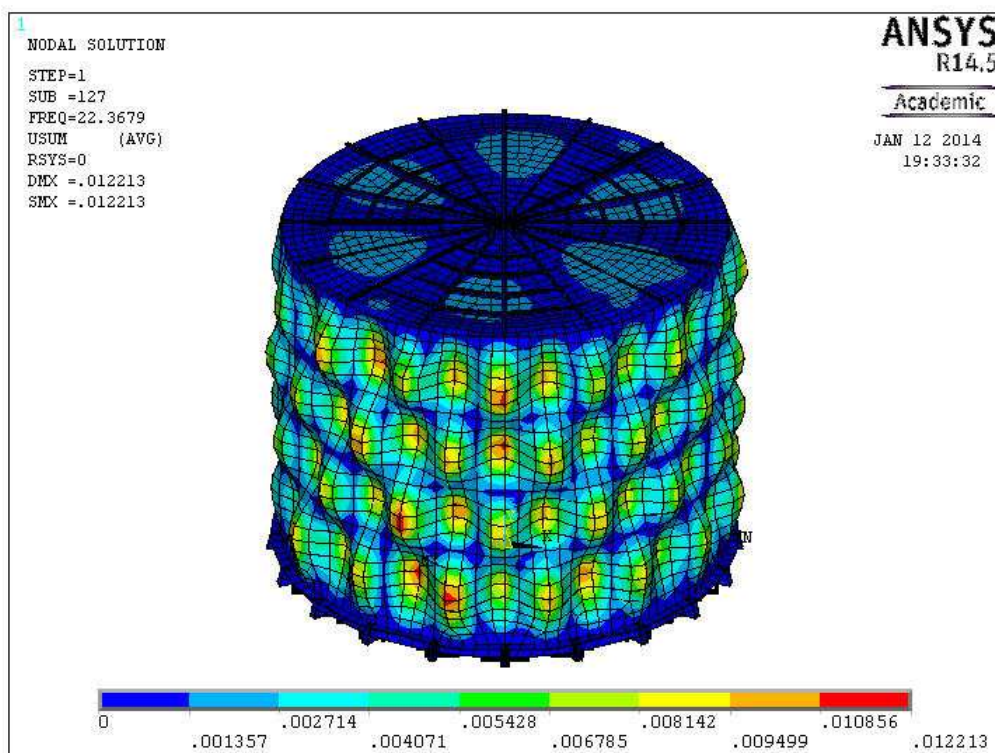
Obr. 5.1.11 Tvar kmitu č.11



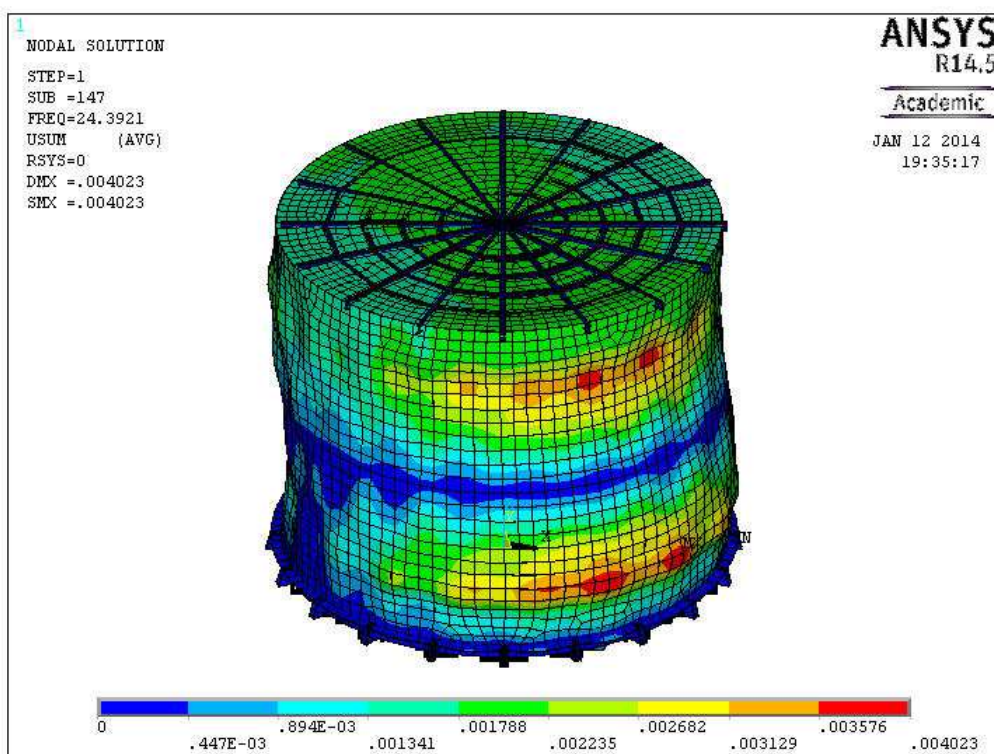
Obr. 5.1.12 Tvar kmitu č.12



Obr. 5.1.13 Tvar kmitu č.13



Obr. 5.1.14 Tvar kmitu č.14



Obr. 5.1.15 Tvar kmitu č.15

číslo tvaru kmitu	odpovídající hodnota frekvence [Hz]		
	bez kapaliny	FLUID30	FLUID220
1	11,56	3,53	3,29
2	11,78	11,76	11,7
3	11,88	3,64	3,39
4	16,34	16,34	16,14
5	18,21	18,2	17,92
6	22,29	22,15	21,94
7	22,32	8,13	7,94
8	30,83	8,63	8,00
9	35,34	28,74	27,89
10	37,55	20,7	13,32
11	38,37	30,92	28,47
12	40,48	25,09	-
13	-	22,32	21,58
14	-	22,37	18,48
15	-	24,39	22,44

Tabulka 5.2 – srovnání frekvencí pro jednotlivé tvary kmitu

Výsledkem modální analýzy jsou vlastní frekvence a jim odpovídající vlastní tvary kmitu jednotlivých výpočtových modelů. V případě této úlohy jsou vyšetřovány zejména frekvence v rozmezí do 30 Hz. Z tabulky je patrné, že vlastní frekvence výpočtového modelu bez kapalinového prostředí začínají na vyšších hodnotách než v případě prostředí s kapalinou. Při srovnání jednotlivých tvarů kmitů s tabulkou jejich frekvencí pro jednotlivé výpočtové modely můžeme vypořadovat několik skutečností.

V případech, kdy se vlastní tvar kmitu projevuje především v horní části konstrukce (oblast střešního pláště), mají odpovídající vlastní frekvence u všech třech výpočtových modelů přibližně stejnou hodnotu – jedná se o vlastní tvary kmitu číslo 2,4,5,9.

V případech, kdy se vlastní tvar kmitu projevuje především v oblasti pláště konstrukce (skořepinové vlastní tvary kmitu), mají odpovídající vlastní frekvence přibližně stejnou hodnotu pouze v případech výpočtových modelů s kapalinovým prostředím – jedná se o vlastní tvary kmitu číslo 1,3,6,7,8,10,11,12. V případě výpočtového modelu bez kapalinového prostředí jsou hodnoty vlastních frekvencí odpovídajících těmto vlastním tvarům kmitů výrazně vyšší než u ostatních dvou modelů. U některých vlastních tvarů kmitu výpočtových modelů bez kapalinového prostředí je dokonce překročena hodnota zkoumané oblasti přibližně do 30 Hz – jedná se o vlastní tvary kmitu číslo 10,11,12.

V ostatních případech se vlastní tvar kmitu projevuje jak v horní části konstrukce (oblast střešního pláště), tak v oblasti pláště konstrukce a konstrukce se pohybuje jako celek – jedná se o vlastní tvary kmitu číslo 13,14,15. Opět platí, že hodnoty odpovídajících vlastních frekvencí v případě výpočtových modelů s kapalinovým prostředím jsou přibližně stejné. Tyto tvary kmitu se však v případě výpočtových modelů bez kapalinového prostředí nevyskytují. S ohledem na vývoj frekvencí je možné, že by se tento vlastní tvar kmitu mohl objevit také v případě výpočtového modelu bez kapalinového prostředí, odpovídající vlastní frekvence by však pravděpodobně dosahovala hodnoty vyšší než 40 Hz.

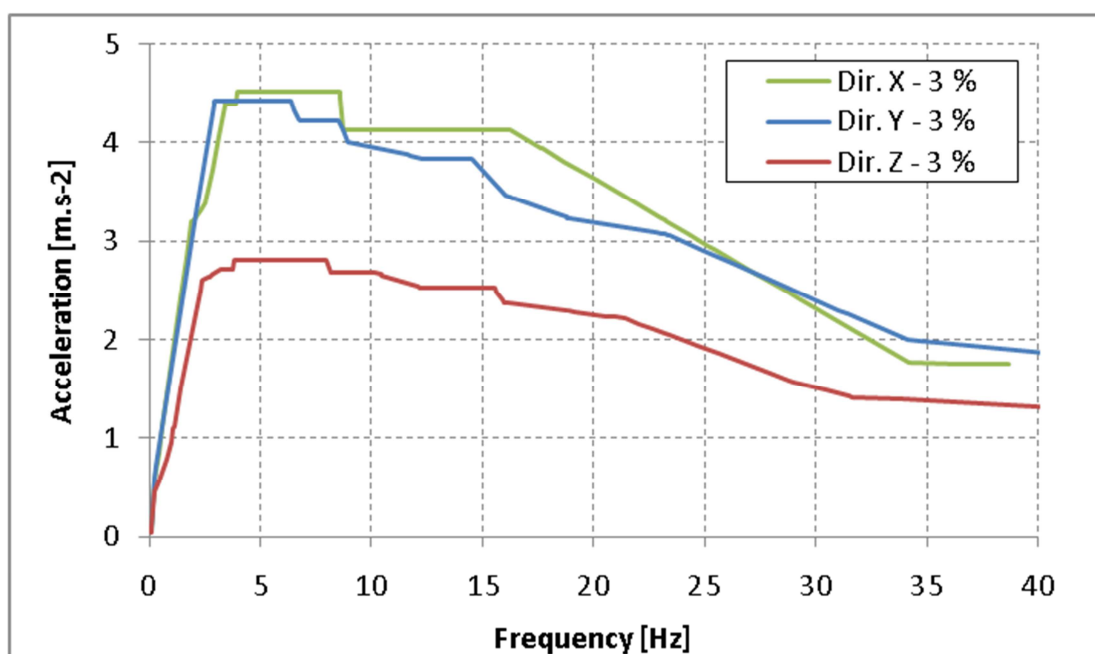
Obecně platí, že hodnoty vlastních frekvencí k odpovídajícím vlastním tvarům kmitu jsou v případě výpočtového modelu bez kapalinového prostředí obvykle vyšší než u ostatních dvou modelů. V případech výpočtových modelů s kapalinovým prostředím jsou hodnoty frekvencí odpovídajících tvarům kmitu přibližně stejné. Z tabulky je však patrné, že se zvyšující se frekvencí se také zvyšuje rozdíl mezi frekvencemi odpovídajícím tvaru kmitu u výpočtových modelů s kapalinovým prostředím. V takových případech je vyšší hodnota frekvence výpočtového modelu s kapalinovým prostředím FLUID30. Z hlediska řešení odezvy konstrukce na buzení vnějšími silami (spektrální analýza) jsou nejdůležitější vlastní tvary kmitu při nichž se konstrukce pohybuje jako celek.

6 Spektrální analýza

Spektrální analýza je formou dynamické analýzy. Jedná se o samostatnou analýzu, které však musí předcházet frekvenční analýza. V tomto případě spektrální analýze předchází modální analýza, je však nutné aby modální analýza byla vyřešena metodou uvažující symetrické matice prvku. Toto může být problematické při řešení úloh rotorů, ale také úloh interakce konstrukce s kapalinou, jelikož v defaultním nastavení kapalinové oblasti jsou zadány nesymetrické matice prvku. Spektrální analýza definuje dynamickou odezvu konstrukce na buzení spektry zjištěnými s využitím modální analýzy.

V analýze spektra odezvy se výsledky modální analýzy používají ve smyslu spektra k výpočtům posunů a napětí v modelu. Pro každý režim se odezva načte ze spektra návrhu na základě modální frekvence a daného poměru tlumení. V této úloze je tlumení uvažováno hodnotou součinitele tlumení 0,005. Všechny modální odezvy se potom kombinují a poskytují odhad celkové odezvy konstrukce. Spektrum odezvy se používá jako vstupní informace základového buzení pro analýzu spektra odezvy.

Výsledná odezva se skládá z odezev všech tvarů kmitu. Po vyčíslení všech odezev pro jednotlivé tvary kmitu je třeba tyto odezvy sečíst. Objevuje se však komplikace v důsledku toho, že dosažená maxima odezvy pro jednotlivé tvary nastávají v různých časech. Potom maximum odezvy získané přímo není rovno maximu součtu odezev získaných pomocí spektra odezvy. Přímý součet jednotlivých odezev dává poměrně konzervativní výsledky. Tento nedostatek je však možné vyřešit pomocí sumace SRSS, která pomocí vhodných kombinací dává uspokojivé přibližné maximum.



Graf 6.1 Spektrum odezvy

6.1 Výsledky spektrální analýzy

Spektrální analýza je provedena pouze pro výpočtové modely s kapalinovou oblastí. Obecně platí, že spektrální analýze musí předcházet frekvenční analýza. V tomto případě je využita modální analýza. Při výpočtu spektrální analýzy je však nutné, aby matice prvku byla symetrická, což vyžadovalo již zmíněnou úpravu prvků kapaliny.

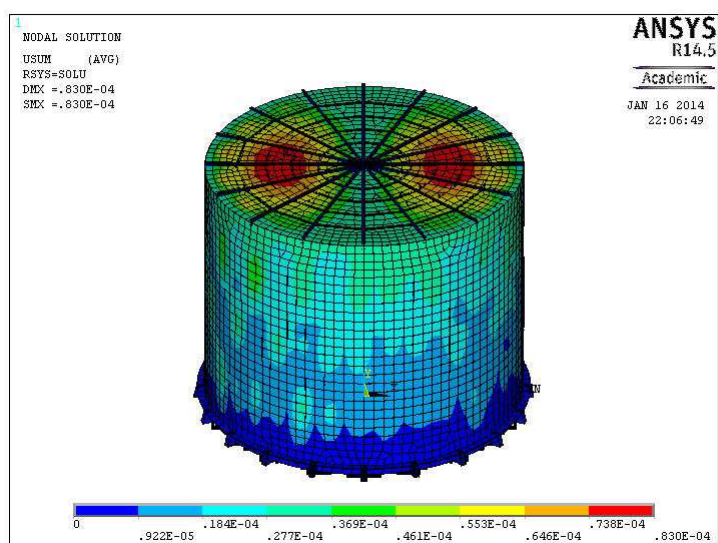
SOLUTION OPTIONS

```
PROBLEM DIMENSIONALITY.....3-D
DEGREES OF FREEDOM.....UX UY UZ ROTX ROTY ROTZ PRES SP01
ANALYSIS TYPE.....SPECTRUM
SPECTRUM TYPE.....SINGLE POINT
NUMBER OF MODES TO BE USED..... 200
GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX.....SYMMETRIC
```

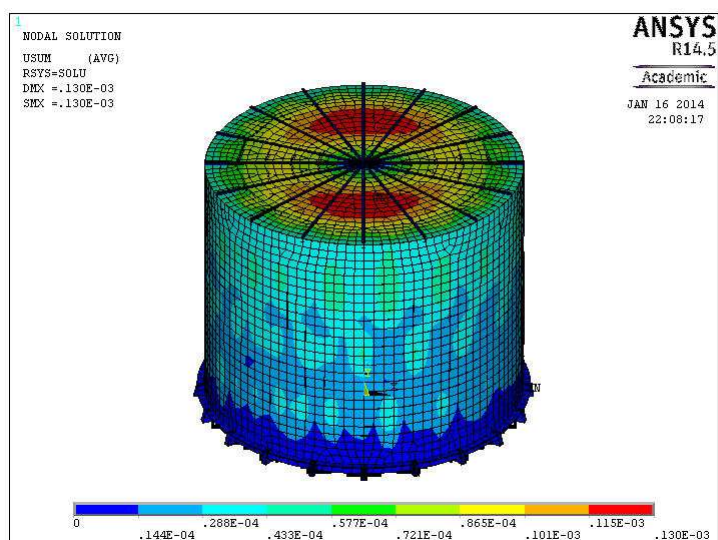
Parametry nastavení výpočtu jsou do systému ANSYS zadávány formou sady příkazů v jazyce APDL. Pro názornost je uvedena sada příkazů pro spektrální analýzu, vyvolující budící síly ve směru x, působící na konstrukci. Ze sady příkazů lze vyčíst, že byla nastavena forma analýzy jako spektrální a forma buzení spektrem odezvy jako single point (buzení celé konstrukce jednou křivkou spektra odezvy) pro všechny módy modální analýzy. Dále je zadán směr buzení a jednotlivé frekvence a jim příslušná zrychlení dle grafu spekter odezvy. U hodnot zrychlení je vypsána také hodnota tlumení. Ze sady příkazů je také patrná volba sumace SRSS, která pomocí vhodných kombinací udává přibližné maximum. Po dokončení výpočtu jsou výsledky včetně kombinací zapsány do .mcom souboru.

Směr X:

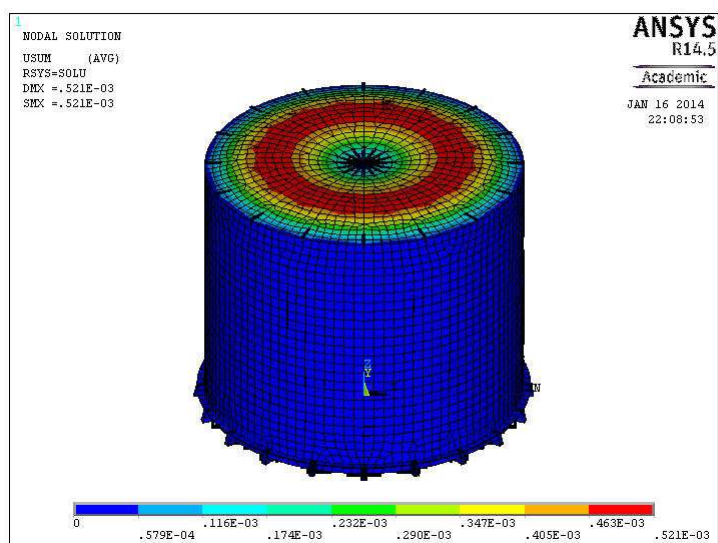
```
/SOLUTION
ANTYPE,SPECTR,NEW
SPOPT,SPRS,ALL,NO
SVTYP,2,1
SED,1,0,0
! frekvence
FREQ, 0.001, 0.25, 2.0, 2.5, 3.5, 4.0, 4.01, 8.75, 8.76
SV,0.005,0.001, 0.67, 3.17, 3.39, 4.39, 4.39, 4.5, 4.5, 4.11
FREQ, 16.25, 34.5, 39.25
SV,0.005, 4.11,1.78, 1.78
SRSS,0.001,DISP
SOLVE
/POST1
/input,,mcom
```



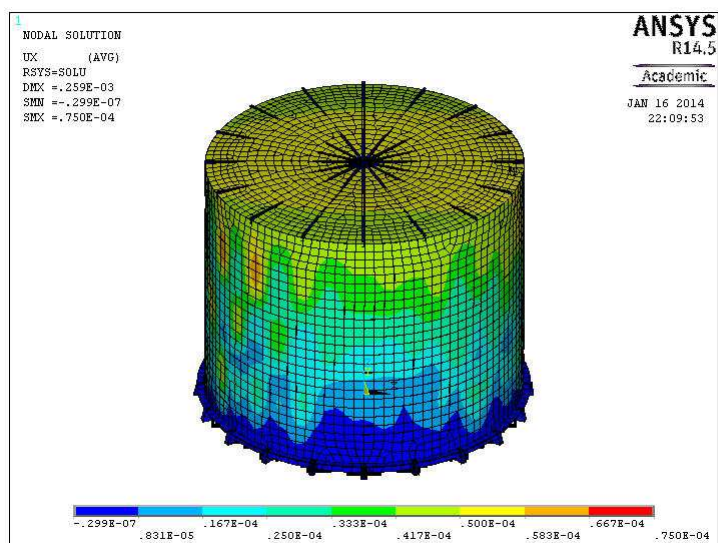
Obr. 6.2.1 Pole celkových posunutí při buzení ve směru x (FLUID30)



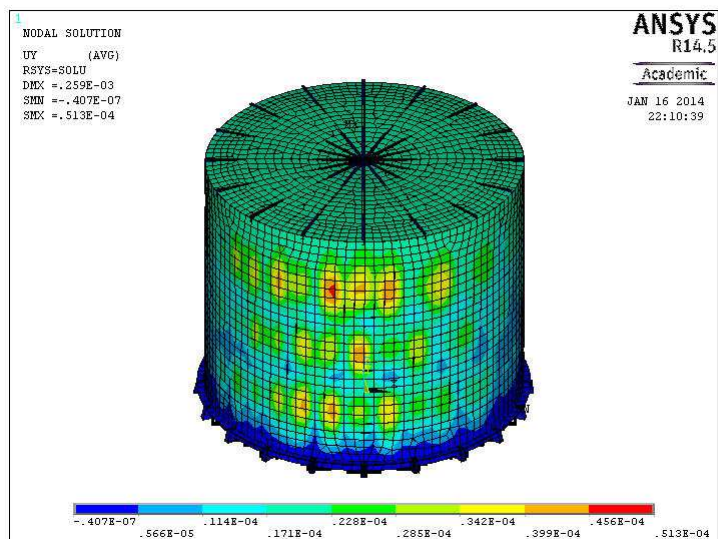
Obr. 6.2.2 Pole celkových posunutí při buzení ve směru y (FLUID30)



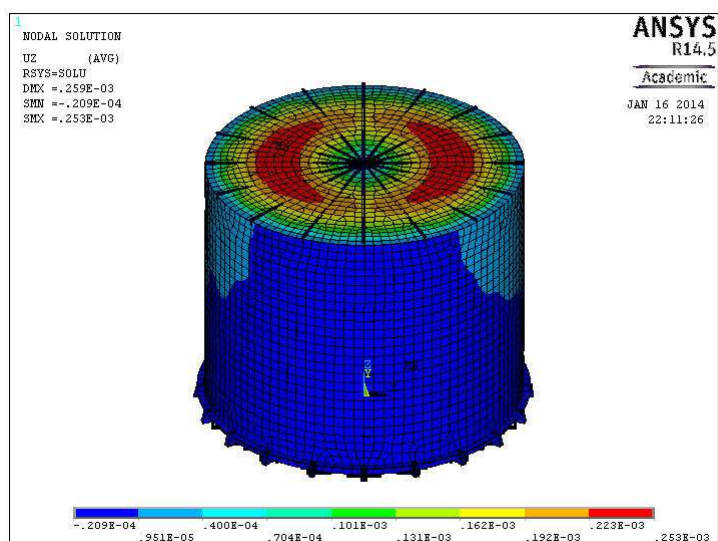
Obr. 6.2.3 Pole celkových posunutí při buzení ve směru z (FLUID30)



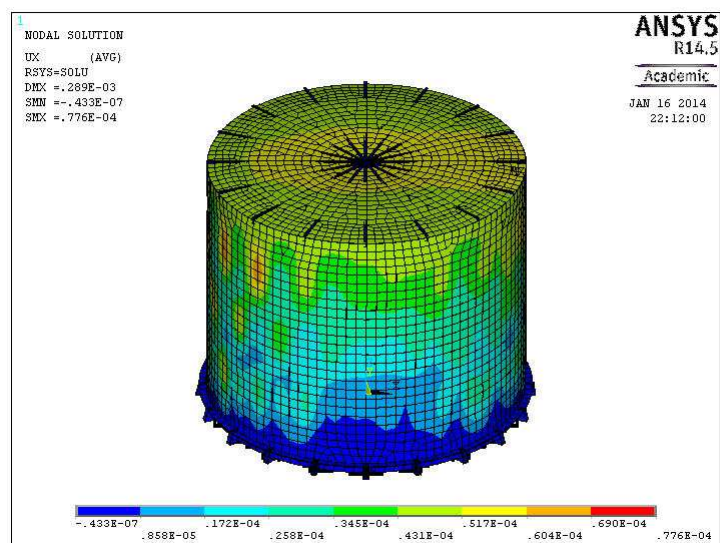
Obr. 6.2.4 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 1 (FLUID30)



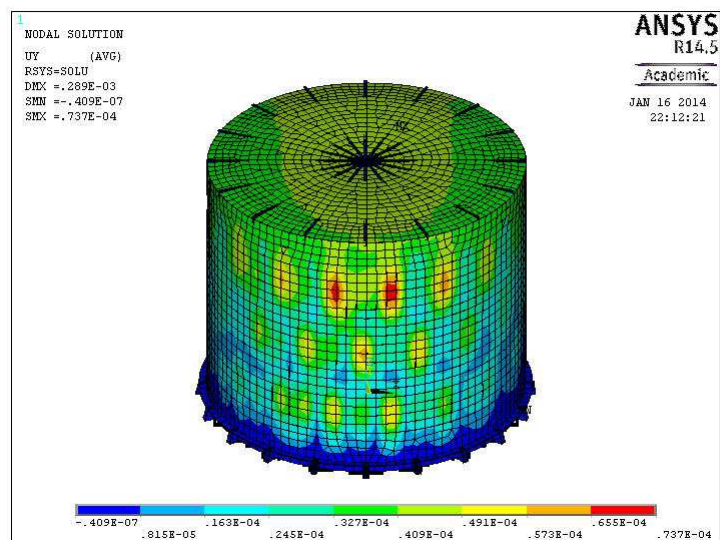
Obr. 6.2.5 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 1 (FLUID30)



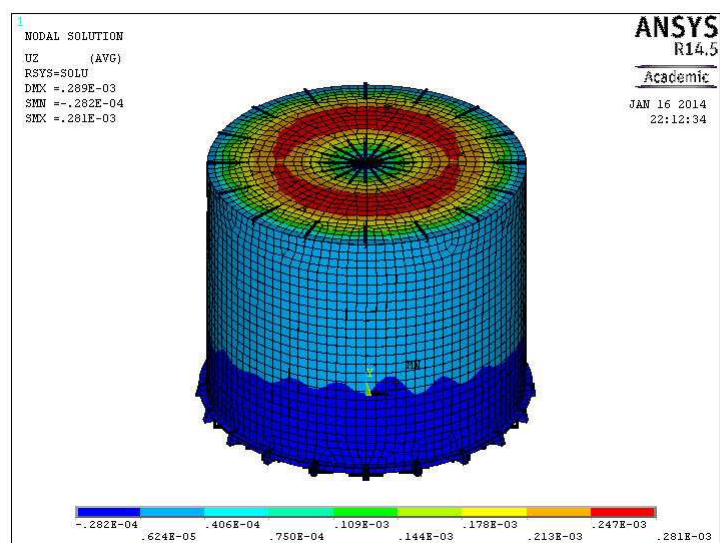
Obr. 6.2.6 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 1 (FLUID30)



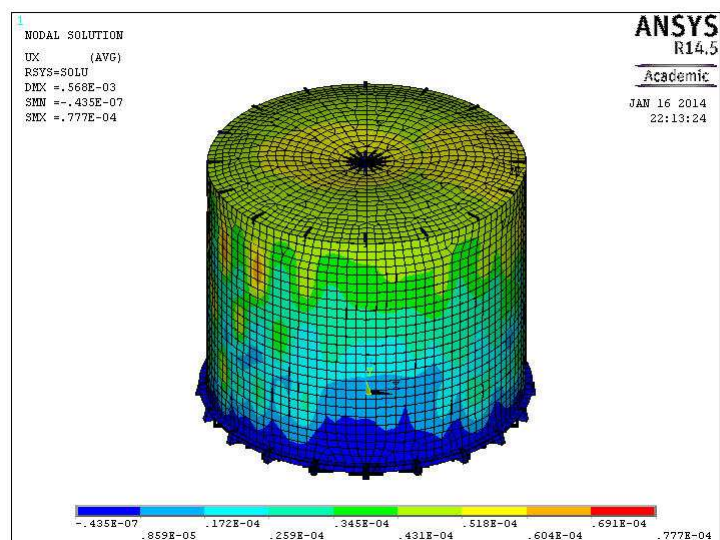
Obr. 6.2.7 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 2 (FLUID30)



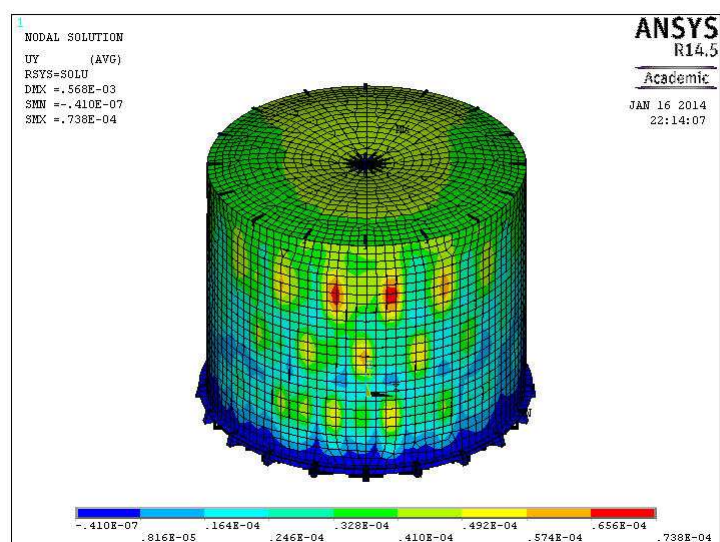
Obr. 6.2.8 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 2 (FLUID30)



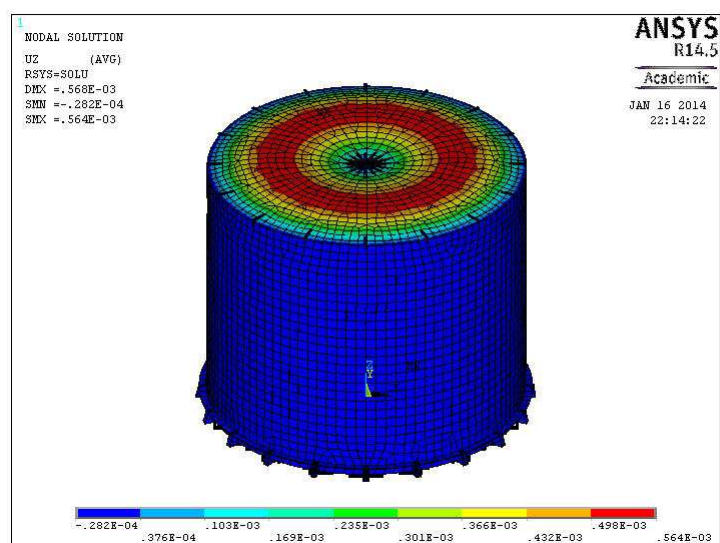
Obr. 6.2.9 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 2 (FLUID30)



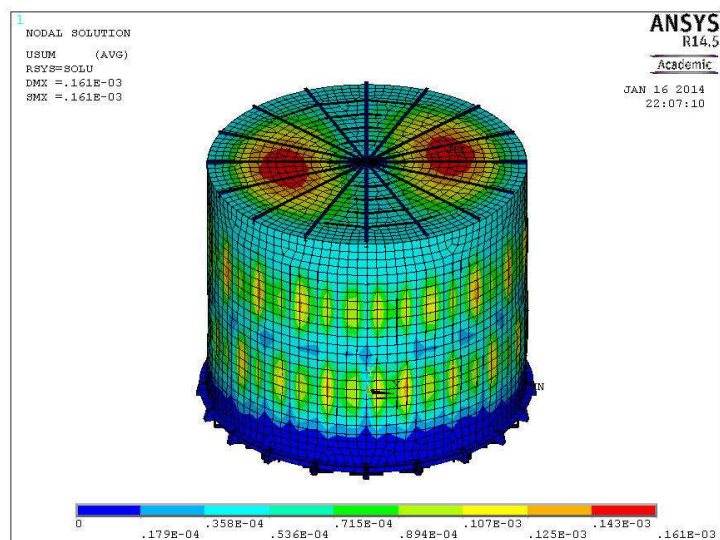
Obr. 6.2.10 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 3 (FLUID30)



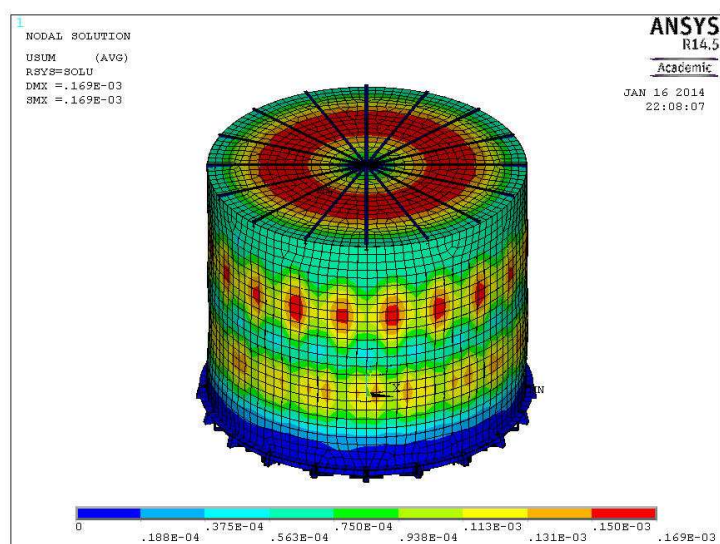
Obr. 6.2.11 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 3 (FLUID30)



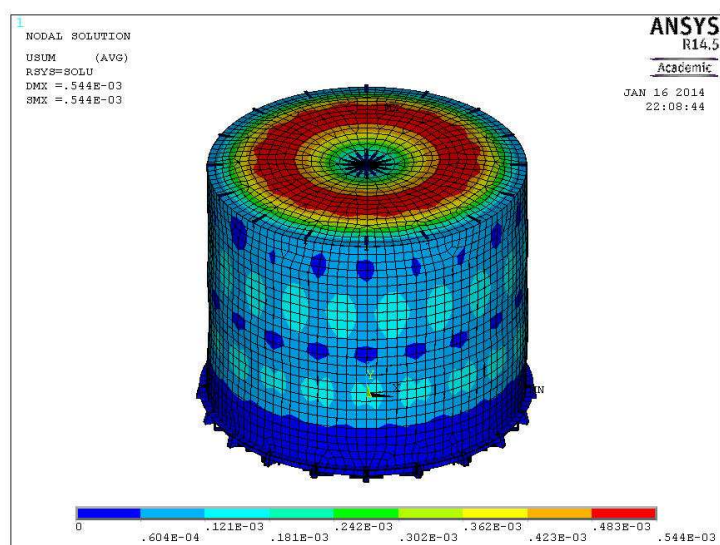
Obr. 6.2.12 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 3 (FLUID30)



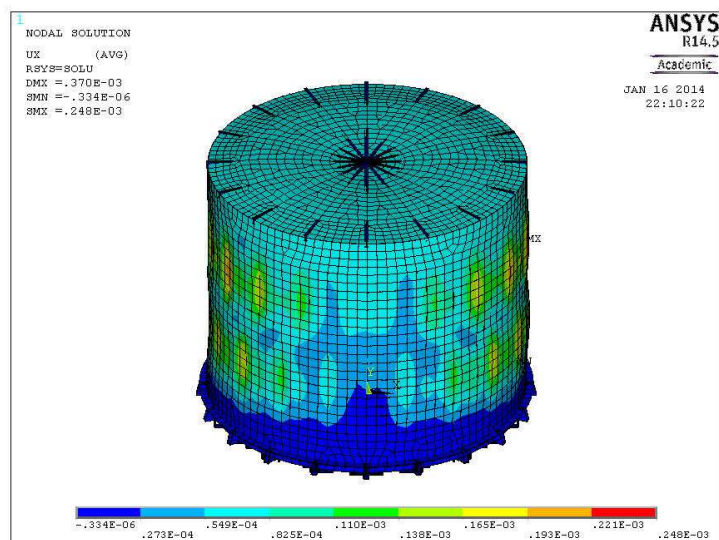
Obr. 6.2.13 Pole celkových posunutí při buzení ve směru x (FLUID220)



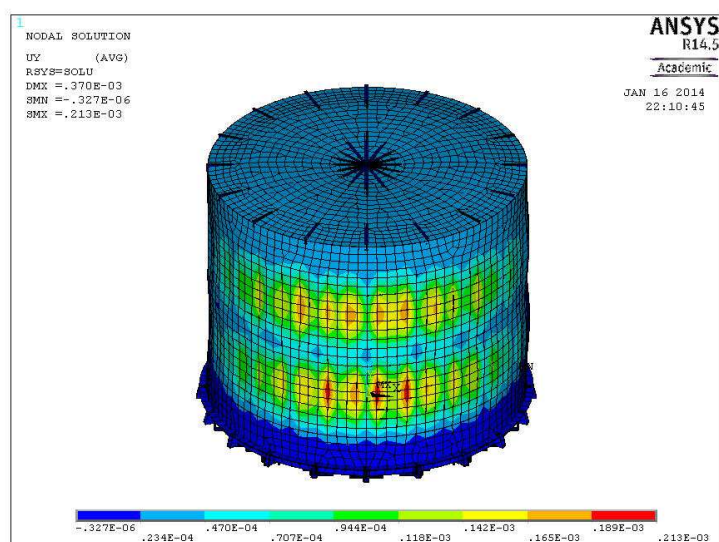
Obr. 6.2.14 Pole celkových posunutí při buzení ve směru y (FLUID220)



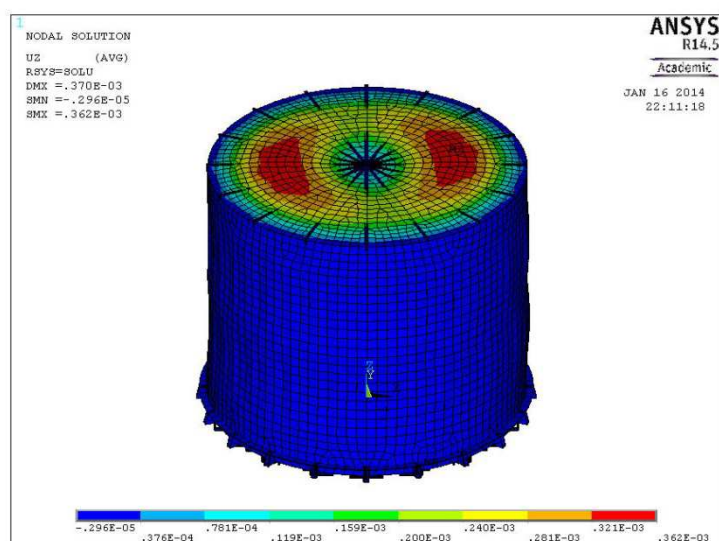
Obr. 6.2.15 Pole celkových posunutí při buzení ve směru z (FLUID220)



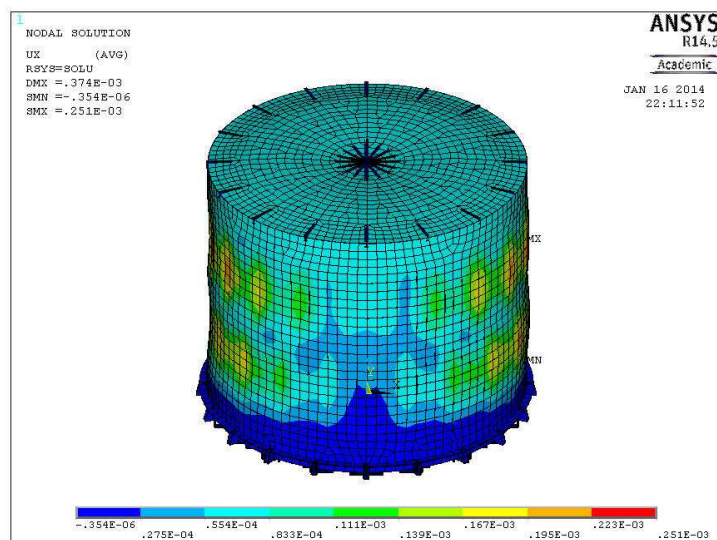
Obr. 6.2.16 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 1 (FLUID220)



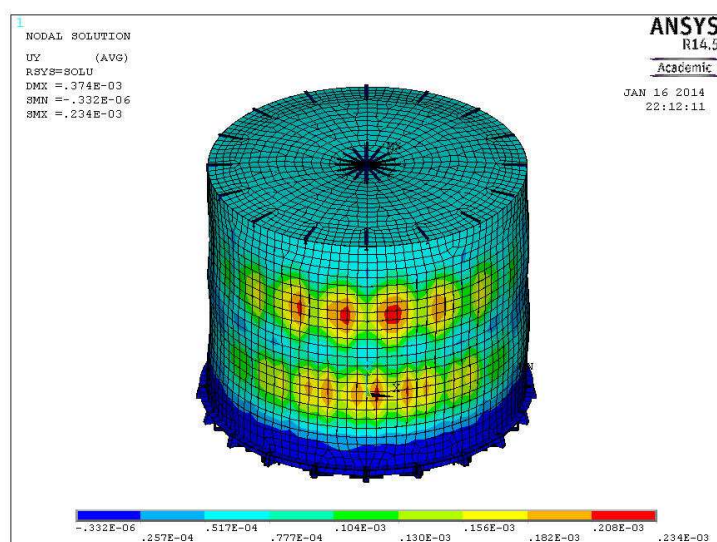
Obr. 6.2.17 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 1 (FLUID220)



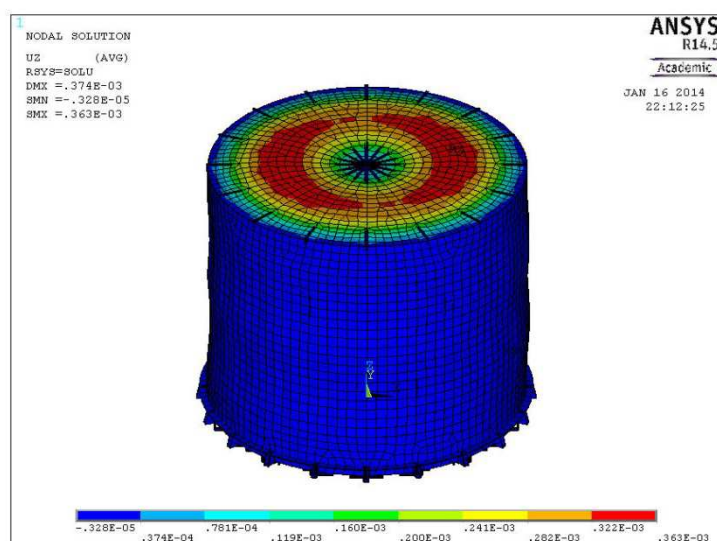
Obr. 6.2.18 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 1 (FLUID220)



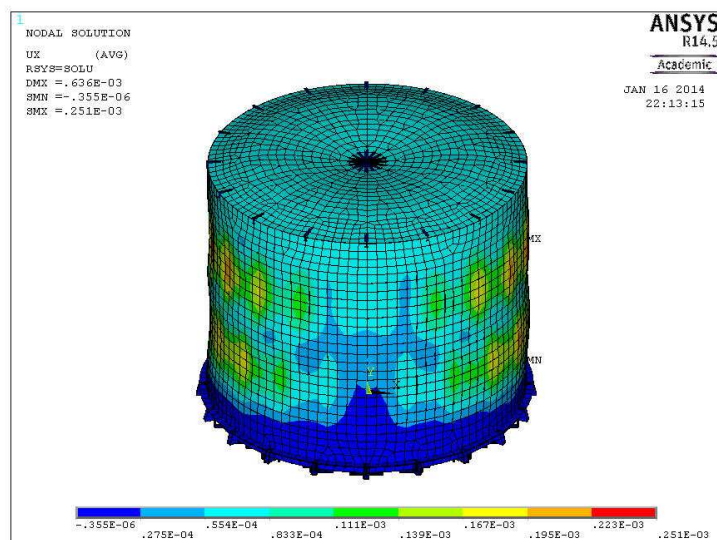
Obr. 6.2.19 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 2 (FLUID220)



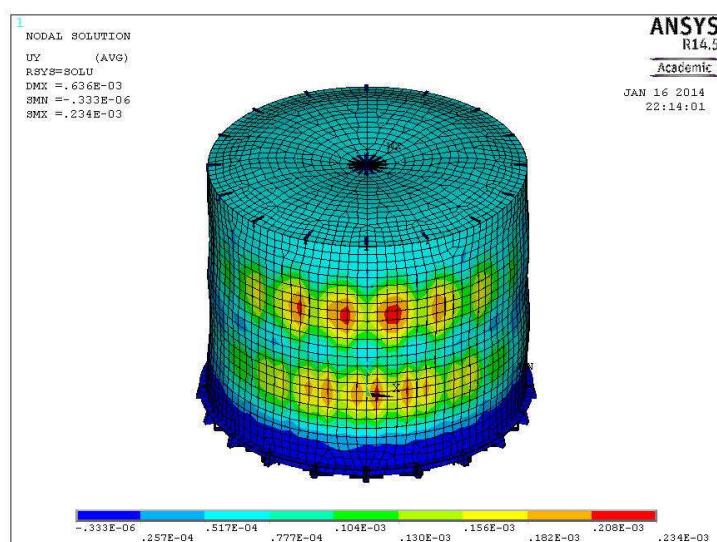
Obr. 6.2.20 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 2 (FLUID220)



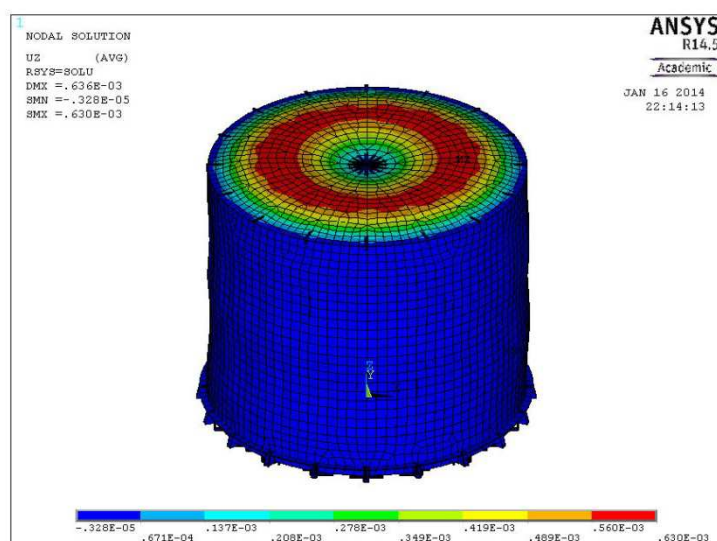
Obr. 6.2.21 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 2 (FLUID220)



Obr. 6.2.22 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 3 (FLUID220)



Obr. 6.2.23 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 3 (FLUID220)



Obr. 6.2.24 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 3 (FLUID220)

Výsledkem spektrální analýzy je odezva konstrukce na působení vnější budící síly. První tři obrázky jednotlivých výpočtových modelů s kapalinovým prostředím znázorňují hodnoty celkových posunů pro buzení ve směru x,y a z, v tomto pořadí. Následují obrázky pro jednotlivé kombinace a jednotlivé směry posunutí x,y a z. Zatěžovací stavy a jejich kombinace jsou pro názornost následně uvedeny.

Zatěžovací stavy:

- 1- Výsledky modální analýzy
- 2- Buzení ve směru x
- 3- Buzení ve směru y
- 4- Buzení ve směru z

Kombinace

$$K1 = ZS1+ZS2+0,3ZS3+0,3ZS4$$

$$K2 = ZS1+0,3ZS2+ZS3+0,3ZS4$$

$$K3 = ZS1+0,3ZS2+0,3ZS3+ZS4$$

7 Posouzení dle Eurokódu 3

Pro posouzení skořepin podle mezních stavů se uplatňuje jeden z následujících způsobů:

- Návrh podle výpočtu napětí
- Přímý návrh s použitím vztahů z normy
- Návrh s použitím globální numerické analýzy (například pomocí výpočtových programů založených na metodě konečných prvků)

V návrhu podle výpočtu napětí je rozlišováno primární, sekundární a místní napětí. Primární a sekundární napětí je možné podle potřeby nahradit vnitřními silami.

V globální analýze je primární a sekundární napětí nahrazeno mezním zatížením a spektrem rozkmitů napětí cyklických zatížení.

V této úloze byl využit návrh podle výpočtu napětí.

7.1 Mezní stav plasticity LS1

Mezní stav plasticity

Jako mezní stav plasticity je uvažován stav, při kterém je vyčerpána schopnost konstrukce přenášet zatížení v důsledku plastifikace materiálu. Únosnost v mezním stavu plasticity je stanovena jako zatížení při zhroucení konstrukce plastickým mechanismem, vypočtené podle teorie malých posunutí.

Jako mezní stav porušení tahem je uvažován stav, při kterém se neoslabený průřez stěny skořepiny poruší tahem, což vede ke vzájemnému oddělení dvou částí skořepiny.

Při ověřování mezního stavu plasticity je možné předpokládat plastické nebo částečně plastické chování konstrukce (mohou být zanedbány podmínky kompatibility v pružném stavu).

Návrhové hodnoty zatížení

Vychází z nejnepríznivější kombinace. Zohledněny jsou součinitele γ_F , Ψ . V úvahu se berou pouze zatížení ovlivňující rovnováhu konstrukce.

Hodnoty návrhové únosnosti:

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{235}{1} = 235 \text{ MPa}$$

Omezení napětí

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

a) Prázdná nádrž $25 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa}$

b) Nádrž s Fluid30 $76 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa}$

c) Nádrž s Fluid220 $76 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa}$

7.2 Mezní stav cyklické plastifikace LS2

Cyklická plastifikace

Jako mezní stav plastifikace se má uvažovat stav, při kterém dochází v důsledku cyklického zatěžování a odlehčování k plastifikaci určité oblasti v tahu a v tlaku, což způsobuje opakované plastické působení konstrukce nebo vede k případnému vzniku místních trhlin při vyčerpání schopnosti materiálu pohlcovat energii.

Při ověřování tohoto mezního stavu se má uvažovat kompatibilita deformací při pružném nebo pružně-plastickém působení konstrukce.

Návrhové hodnoty zatížení

Pro každý zatěžovací stav se jako návrhové hodnoty zatížení použijí charakteristické hodnoty složek celkového zatížení, které mohou během návrhové životnosti působit opakovaně více než třikrát. V úvahu se bere proměnná část zatížení mezi extrémními horními a dolními hodnotami.

Návrhové hodnoty srovnávacího rozkmitu:

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} = 2 \times 235 = 470 \text{ MPa}$$

Omezení rozkmitu napětí

$$\Delta \sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd}$$

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

a) Prázdná nádrž

$$17 \text{ MPa} \leq 470 \text{ MPa}$$

b) Nádrž s Fluid30

$$17 \text{ MPa} \leq 470 \text{ MPa}$$

c) Nádrž s Fluid220

$$17 \text{ MPa} \leq 470 \text{ MPa}$$

7.3 Mezní stav boulení LS3

Boulení

Jako mezní stav boulení se má uvažovat stav, při kterém v celé konstrukci nebo v její části náhle vzniknou velká posunutí ve směru kolmém k plášti skořepiny v důsledku ztráty stability při působení tlakových nebo smykových membránových napětí ve stěně skořepiny. Skořepina pak není schopná nadále přenášet vnitřní síly nebo může nastat její celkové zhroucení.

Protože pevnost v mezním stavu boulení podstatně závisí na jakosti provedení konstrukce, mají se při posouzení pevnosti také uvažovat související požadavky na výrobní úchytky.

Návrhové hodnoty zatížení

Jako návrhové hodnoty napětí $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $\tau_{x\theta,Ed}$ se uvažují rozhodující hodnoty tlakových a smykových membránových napětí.

Návrhová únosnost při boulení:

Únosnost při boulení se vyjadřuje pomocí návrhové pevnosti při boulení

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \frac{\sigma_{\theta,Rk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\tau_{x\theta,Rd} = \frac{\tau_{x\theta,Rk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\sigma_{x,Rd} = \frac{14,1}{1,1} = 12,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \frac{2,35}{1,1} = 2,14 \text{ MPa}$$

$$\tau_{x\theta,Rd} = \frac{12,2}{1,1} = 11,1$$

Charakteristické hodnoty pevnosti při boulení:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_{yk}$$

$$\sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} f_{yk}$$

$$\tau_{x\theta,Rk} = \frac{\chi_{\tau} f_{yk}}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma_{x,Rk} = 0,06.235 = 14,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,Rk} = 0,01.235 = 2,35 \text{ MPa}$$

$$\tau_{x\theta,Rk} = \frac{0,09.235}{\sqrt{3}} = 12,2 \text{ MPa}$$

Součinitele vzpěrnosti při boulení:

$$\chi=1 \quad \text{když} \quad \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^{\eta} \quad \text{když} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{když} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}$$

$$\chi_x = \frac{0,1}{1,3^2} = 0,06$$

$$\chi_{\theta} = \frac{0,5}{6,7^2} = 0,01$$

$$\chi_{\tau} = \frac{0,5}{2,4^2} = 0,09$$

Mezní poměrná štíhlost při stlačení:

$$\bar{\lambda}_{0_x} = 0,2; \bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,4; \bar{\lambda}_{0_\tau} = 0,4$$

Mezní relativní štíhlost:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}}$$

$$\bar{\lambda}_{xp} = \sqrt{\frac{0,1}{1-0,6}} = 0,5$$

$$\bar{\lambda}_{\theta p} = \sqrt{\frac{0,5}{1-0,6}} = 1,12$$

$$\bar{\lambda}_{\tau p} = \sqrt{\frac{0,5}{1-0,6}} = 1,12$$

Poměrná štíhlost skořepiny:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{xRcr}}$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{f_{yk} / \sigma_{\theta Rcr}}$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\left(\frac{f_{yk}}{\sqrt{3}}\right) / \sigma_{xRcr}}$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{235 / 138} = 1,3$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{235 / 5,25} = 6,7$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\left(\frac{235}{\sqrt{3}}\right) / 24,2} = 2,4$$

Pružná kritická napětí při boulení:

$$\sigma_{xRcr} = 0,605E C_x \frac{t}{r}$$

$$\sigma_{\theta Rcr} = 0,92E \frac{C_\theta t}{\omega r}$$

$$\tau_{x\theta Rcr} = 0,75E C_\tau \sqrt{\frac{1}{\omega} \frac{t}{r}}$$

$$\sigma_{xRcr} = 0,605 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 1 \frac{0,005}{4,6} = 138 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta Rcr} = 0,92 \cdot 210 \cdot 10^9 \frac{1,25}{50} \frac{0,005}{4,6} = 5,25 \text{ MPa}$$

$$\tau_{x\theta Rcr} = 0,75 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 1 \sqrt{\frac{1}{50} \frac{0,005}{4,6}} = 24,2 \text{ MPa}$$

Součinitel vlivu okrajových podmínek C_x :

$$C_x = 1,0 \quad \text{když} \quad 1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t}$$

$$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2} \quad \text{když} \quad \omega \leq 1,7$$

$$C_x = C_{xN} \quad \text{když} \quad \omega > 0,5 \frac{r}{t}$$

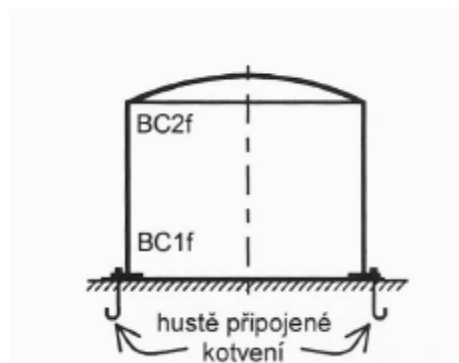
$$C_x = 1,0$$

Součinitel vlivu okrajových podmínek C_θ :

Dle tabulky

Případ	Konec válce	Okrajové podmínky	C_θ
1	1	BC1	1,5
	2	BC1	
2	1	BC1	1,25
	2	BC2	
3	1	BC2	1,0
	2	BC2	
4	1	BC1	0,6
	2	BC3	
5	1	BC2	0
	2	BC3	
6	1	BC3	0
	2	BC3	

Tabulka 7.3.1 Součinitel vlivu okrajových podmínek C_θ



Obr. 7.3.1 Okrajové podmínky

$$C_\theta = 1,25$$

Součinitel vlivu okrajových podmínek C_τ :

$$C_\tau = 1,0 \quad \text{když} \quad 10 \leq \omega \leq 8,7 \frac{r}{t}$$

$$C_x = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}} \quad \text{když} \quad \omega \leq 10$$

$$C_x = \frac{1}{3} \sqrt{\omega \frac{t}{r}} \quad \text{když} \quad \omega > 8,7 \frac{r}{t}$$

$$C_\tau = 1,0$$

Délkový parametr ω :

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}}$$

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}} = \frac{7,6}{\sqrt{4,6 \cdot 0,005}} = 50$$

l . . . výška válce

r . . . poloměr válce

t . . . tloušťka skořepiny

Součinitel plastické oblasti β a interakční exponent η :

$$\beta = 0,6; \eta = 1$$

Redukční součinitel pružné imperfekce α :

$$\alpha_{0x} = \frac{0,62}{1 + 1,91(\Delta w_k/t)^{1,44}}$$

$$\alpha_{0x} = \frac{0,62}{1 + 1,91(0,01/0,005)^{1,44}} = 0,1$$

$\alpha_{0\theta}$ - v závislosti na třídě jakosti výroby

$$\alpha_{0\theta} = 0,5$$

Třída jakosti výroby	Popis	$\alpha_{0\theta}$
A	speciální	0,75
B	vysoká	0,65
C	základní	0,5

Tabulka 7.3.2 součinitel $\alpha_{0\theta}$ v závislosti na třídě jakosti výroby

α_{0r} - v závislosti na třídě jakosti výroby

$$\alpha_{0r} = 0,5$$

Třída jakosti výroby	Popis	α_{0r}
A	speciální	0,75
B	vysoká	0,65
C	základní	0,5

Tabulka 7.3.3 součinitel α_{0r} v závislosti na třídě jakosti výroby

Charakteristická amplituda imperfekt Δw_k :

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} t$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{16} \sqrt{\frac{4,6}{0,005}} 0,005 = 0,01m$$

Součinitel vlivu jakosti výroby Q:

Třída jakosti výroby	Popis	Q
A	speciální	40
B	vysoká	25
C	základní	16

Tabulka 7.3.4 součinitel vlivu jakosti výroby Q

Omezení napětí:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}$$

$$\tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd}$$

a) Prázdná nádrž

$$3,5 \text{ MPa} \leq 12,8 \text{ MPa}$$

$$0,003 \text{ MPa} \leq 2,14 \text{ MPa}$$

$$0,25 \text{ MPa} \leq 11,1 \text{ MPa}$$

b) Nádrž s Fluid30

$$11,1 \text{ MPa} \leq 12,8 \text{ MPa}$$

$$0,08 \text{ MPa} \leq 2,14 \text{ MPa}$$

$$0,3 \text{ MPa} \leq 11,1 \text{ MPa}$$

c) Nádrž s Fluid220

$$9,5 \text{ MPa} \leq 12,8 \text{ MPa}$$

$$0,1 \text{ MPa} \leq 2,14 \text{ MPa}$$

$$0,4 \text{ MPa} \leq 11,1 \text{ MPa}$$

V případě vyšších hodnot napětí je možné zvýšit únosnost konstrukce zvýšením nároků na jakost výroby konstrukce nebo použitím materiálu s vyšší pevností. Dle Eurokódu 3 by měla být konstrukce posouzena také na mezní stav únavy. Tento posudek po domluvě nebyl proveden, protože nebyly zadány parametry únavy.

Závěr

Pro posuzovanou konstrukci ocelové nádrže byly na základě výkresové dokumentace s využitím programového systému ANSYS vytvořeny prostorové výpočtové modely. Všechny modely jsou uvažovány jako prostorové a jsou pokryt sítí konečných prvků. Při řešení problematiky diskretizace modelů konstrukcí s kapalinou je nutný dopočet přídavné hmotnosti kapaliny. Programový systém ANSYS při takovýchto úlohách automaticky zohledňuje vliv přídavné hmotnosti kapaliny. Úlohy interakce konstrukce s kapalinou lze obecně řešit přístupem dle Eulera nebo Lagrange. V této práci byl aplikován pouze přístup dle Eulera.

Byly uvažovány tři výpočtové modely. Model bez kapalinového prostředí simuluje stav prázdné nádrže, další modely byly uvažovány s kapalinovým prostředím FLUID30 a FLUID220. Prvek FLUID220 je dvacetizlovým prvkem, čímž je značně navýšen počet rovnic, což ovlivňuje také dobu výpočtu. Tato skutečnost se projevila zejména při výpočtu statické a modální analýzy.

Pro jednotlivé modely byla provedena statická analýza uvažující dva zatěžovací stavy a jejich kombinaci. Pro srovnání jsou uvedeny výsledky analýzy pro všechny výpočtové modely.

Modální analýzou byly zjištěny hodnoty vlastních frekvencí a jím příslušné vlastní tvary kmitu pro jednotlivé výpočtové modely. Vlastní frekvence pro příslušné vlastní tvary kmitu byly v případech konstrukcí s kapalinovým prostředím velmi podobné, zatímco v případě výpočtového modelu bez kapalinového prostředí byly hodnoty frekvencí výrazně vyšší.

Spektrální analýza je formou dynamické analýzy. Tato analýza byla provedena pouze pro výpočtové modely s kapalinovým prostředím, a to na základě modální analýzy. Konstrukce byla buzena pomocí spekter odezvy ve směru x, y a z. Výsledky jednotlivých analýz jsou pro názornost a možnost porovnání uvedeny pro jednotlivé výpočtové modely. V rámci práce byly také provedeny posudky skořepinových prvků dle Eurokódu 3.

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Schéma posuzované konstrukce	11
Obr. 1.2 Schéma roštu a řez s uložením	11
Obr. 1.3 Střešní konstrukce v půdoryse	12
Obr. 1.4 Kotevní patky	12
Obr. 2.2.1 Výpočtový model	13
Obr. 2.2.2 Skořepinové prvky	14
Obr. 2.2.3 Vyztužení střešního pláště	14
Obr. 2.2.4 Podpěrný rošt	15
Obr. 2.5.1.1 Konečný prvek BEAM188	16
Obr. 2.5.2.1 Konečný prvek LINK180	16
Obr. 2.5.3.1 Konečný prvek SHELL181	17
Obr. 2.5.4.1 Konečný prvek SHELL281	18
Obr. 2.5.5.1 Konečný prvek FLUID30	19
Obr. 2.5.6.1 Konečný prvek FLUID220	20
Obr. 4.1.1 vlastní tíha konstrukce bez kapaliny – pole posunutí ve směru z	26
Obr. 4.1.2 vlastní tíha konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru z	27
Obr. 4.1.3 vlastní tíha konstrukce s FLUID220 – pole posunutí ve směru z	27
Obr. 4.2.1 užité zatížení konstrukce bez kapaliny – pole posunutí ve směru z	28
Obr. 4.2.2 užité zatížení konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru z	29
Obr. 4.2.3 užité zatížení konstrukce s FLUID220 – pole posunutí ve směru z	29
Obr. 4.3.1 kombinace zatížení konstrukce bez kapaliny – pole posunutí ve směru z	30
Obr. 4.3.2 kombinace zatížení konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru z	31
Obr. 4.3.3 kombinace zatížení konstrukce s FLUID220 – pole posunutí ve směru z	31
Obr. 4.3.4 kombinace zatížení konstrukce s FLUID30 – pole posunutí ve směru x	32
Obr. 4.3.5 kombinace zatížení konstrukce s FLUID220 – pole posunutí ve směru x	32
Obr. 4.3.6 kombinace zatížení konstrukce bez kapaliny – tlakové pole	33
Obr. 4.3.7 kombinace zatížení konstrukce s FLUID30 – tlakové pole	33
Obr. 4.3.8 kombinace zatížení konstrukce s FLUID220 – tlakové pole	34
Obr. 5.1.1 Tvar kmitu č.1	38
Obr. 5.1.2 Tvar kmitu č.2	38
Obr. 5.1.3 Tvar kmitu č.3	39
Obr. 5.1.4 Tvar kmitu č.4	39
Obr. 5.1.5 Tvar kmitu č.5	40
Obr. 5.1.6 Tvar kmitu č.6	40
Obr. 5.1.7 Tvar kmitu č.7	41
Obr. 5.1.8 Tvar kmitu č.8	41
Obr. 5.1.9 Tvar kmitu č.9	42
Obr. 5.1.10 Tvar kmitu č.10	42
Obr. 5.1.11 Tvar kmitu č.11	43
Obr. 5.1.12 Tvar kmitu č.12	43

Obr. 5.1.13 Tvar kmitu č.13	44
Obr. 5.1.14 Tvar kmitu č.14	44
Obr. 5.1.15 Tvar kmitu č.15	45
Obr. 6.2.1 Pole celkových posunutí při buzení ve směru x (FLUID30)	49
Obr. 6.2.2 Pole celkových posunutí při buzení ve směru y (FLUID30)	49
Obr. 6.2.3 Pole celkových posunutí při buzení ve směru z (FLUID30)	49
Obr. 6.2.4 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 1 (FLUID30)	50
Obr. 6.2.5 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 1 (FLUID30)	50
Obr. 6.2.6 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 1 (FLUID30)	50
Obr. 6.2.7 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 2 (FLUID30)	51
Obr. 6.2.8 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 2 (FLUID30)	51
Obr. 6.2.9 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 2 (FLUID30)	51
Obr. 6.2.10 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 3 (FLUID30)	52
Obr. 6.2.11 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 3 (FLUID30)	52
Obr. 6.2.12 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 3 (FLUID30)	52
Obr. 6.2.13 Pole celkových posunutí při buzení ve směru x (FLUID220)	53
Obr. 6.2.14 Pole celkových posunutí při buzení ve směru y (FLUID220)	53
Obr. 6.2.15 Pole celkových posunutí při buzení ve směru z (FLUID220)	53
Obr. 6.2.16 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 1 (FLUID220)	54
Obr. 6.2.17 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 1 (FLUID220)	54
Obr. 6.2.18 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 1 (FLUID220)	54
Obr. 6.2.19 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 2 (FLUID220)	55
Obr. 6.2.20 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 2 (FLUID220)	55
Obr. 6.2.21 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 2 (FLUID220)	55
Obr. 6.2.22 Pole posunutí ve směru x pro kombinaci 3 (FLUID220)	56
Obr. 6.2.23 Pole posunutí ve směru y pro kombinaci 3 (FLUID220)	56
Obr. 6.2.24 Pole posunutí ve směru z pro kombinaci 3 (FLUID220)	56
Obr. 7.3.1 Okrajové podmínky	64

Seznam tabulek a grafů

<i>Tabulka 4.3.1 Celková reakce F_z</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 5.2 – srovnání frekvencí pro jednotlivé tvary kmitu.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 7.3.1 Součinitel vlivu okrajových podmínek C_θ.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 7.3.2 součinitel $\alpha_{0\theta}$ v závislosti na třídě jakosti výroby</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 7.3.3 součinitel $\alpha_{0\tau}$ v závislosti na třídě jakosti výroby</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 7.3.4 součinitel vlivu jakosti výroby Q</i>	<i>66</i>
 <i>Graf 6.1 Spektrum odezvy</i>	 <i>47</i>

Použité zdroje

- [1] ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, Release 14.5, 2012
- [2] ČSN EN 1998-1 Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby
- [3] ČSN EN 1998-4 Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 4: Zásobníky, nádrže a potrubí
- [4] ČSN EN 1993-1 Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [5] ČSN EN 1993-6 Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí
- [6] SALAJKA, V., CD03 Dynamika, přednášky, 2012
- [7] VOŘECHOVSKÝ, M., Pružnost a plasticita, Modul CD03 – MO1
- [8] Ansys, Inc. Ansys 14.5 Help, 2013