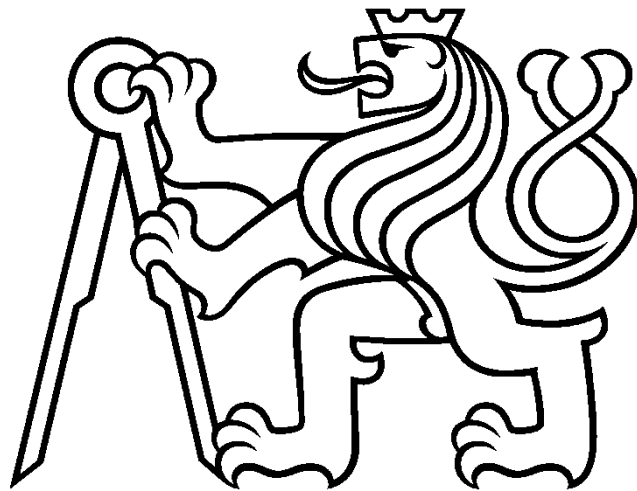


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A  
MECHATRONIKY**

**Odbor mechaniky a mechatroniky**



**Diplomová práce**

**Vliv prostředí na modální vlastnosti nosného válce  
reaktoru VVER 1000**

**Praha, 2020**

**František Hrouda**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrouda** Jméno: **František** Osobní číslo: **457562**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vliv prostředí na modální vlastnosti nosného válce reaktoru VVER 1000**

Název diplomové práce anglicky:

**Influence of the environment on the modal properties of the supporting cylinder of the VVER 1000 reactor**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s fungováním a konstrukcí jaderného reaktoru VVER 1000.
- 2) Prostudujte problematiku vibrací a jejich vliv na jednotlivé komponenty reaktoru.
- 3) Vypočítejte modální vlastnosti nosného válce reaktoru.
- 4) Prostudujte vliv tlumení média reaktoru, s uvažováním různého množství média okolo nosného reaktoru, na hodnoty vlastních frekvencí.
- 5) Navrhněte metodu získání ověřujících dat na skutečném reaktoru, případně pomocí srovnávacího experimentu.

Seznam doporučené literatury:

Švrček M. (2016): Spolehlivost reaktoru VVER 1000 s ohledem na poškození vlivem nízkocyklové únavy. Plzeň: ZČU, dizertační práce.  
Blevins R. (1979): Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. London: Van Nostrand Reinhold Ltd. ISBN 0-442-20710-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


**Ing. Jan Zavřel, Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS**


Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce:

  
Ing. Jan Zavřel, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, Dr.Sc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

3. 8. 2020  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně za odborného vedení vedoucího práce. Veškeré zdroje informací, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, dne .....

Podpis.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svým rodičům za podporu při studiu, manželce za jazykové korekce a motivační podporu, konzultantovi z firmy UJV Řež Panu Ing. Miroslavu Švrčkovi Ph.D. za rady a připomínky k práci a dále pak vedoucímu práce, panu Ing. Janu Zavřelovi Ph.D. za odborné vedení a ochotu při poskytování rad, připomínek a za vstřícnost během konzultací.

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Bc. František Hrouda
<b>Název diplomové práce:</b>	Vliv prostředí na modální vlastnosti nosného válce reaktoru VVER 1000
<b>Anglický název:</b>	Influence of the environment on the modal properties of the supporting cylinder of the VVER 1000 reactor
<b>Akademický rok:</b>	2019/2020
<b>Obor studia:</b>	Aplikovaná mechanika
<b>Ústav/odbor:</b>	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Odbor mechaniky a mechatroniky
<b>Vedoucí diplomové práce:</b>	Ing. Jan Zavřel Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 66 Počet obrázků: 19 Počet tabulek: 6 Počet rovnic: 20
<b>Klíčová slova:</b>	jaderný reaktor, VVER, modální vlastnosti
<b>Keywords:</b>	nuclear reactor, VVER, modal properties
<b>Anotace:</b>	Cílem práce je seznámení čtenáře s principem fungování a jednotlivými součástmi jaderného reaktoru VVER 1000. Vypočítat hodnoty vlastních frekvencí nosného válce reaktoru VVER 1000 při uvažování tlumícího vlivu vodního prostředí. Navrhnout postup experimentu, který by ověřil vypočtené hodnoty.

**Abstract:**

The goal of this work is to get acquainted with the principle of operation and individual components of the VVER 1000 nuclear reactor. Calculate the values of the natural frequencies of the supporting cylinder of the VVER 1000 reactor when considering the damping effect of the water environment. Design an experiment procedure that would verify the calculated values.

# OBSAH

## Obsah

1	Úvod .....	9
2	Cíle diplomové práce.....	10
3	Jaderná elektrárna.....	11
3.1	Struktura jaderné elektrárny .....	11
3.2	Princip fungování jaderné elektrárny.....	12
3.3	Bezpečnostní opatření .....	14
4	Reaktor VVER 1000 .....	16
4.1	Specifikace jaderného reaktoru VVER 1000 .....	17
4.2	Součásti reaktoru VVER 1000 .....	21
4.2.1	Tlaková nádoba.....	21
4.2.2	Nosný válec .....	23
4.2.3	Horní blok reaktoru.....	25
4.2.4	Plášť aktivní zóny .....	26
4.2.5	Aktivní zóna .....	26
4.3	Poškození způsobené kmitáním .....	28
5	Metody výpočtu .....	29
5.1	Metoda konečných prvků .....	31
5.2	Acoustic-shell interaction.....	33
6	Vlastní frekvence pro model s prvky typu solid a shell.....	36
6.1	Geometrie modelů.....	37
6.1.1	Model s prvky typu solid .....	38
6.1.2	Model s prvky typu shell.....	39
6.1.3	Výsledky.....	41
6.1.4	Shrnutí výsledků srovnání prvků solid a shell .....	46
7	Výpočet vlastních frekvencí ve vodním prostředí metodou konečných prvků.....	46
7.1	Geometrie modelu.....	47
7.2	Redukce materiálových vlastností .....	48
7.3	Okrajové podmínky .....	51

7.4	Výsledky výpočtu .....	52
8	Návrh experimentu pro potvrzení správnosti vypočtených výsledků metodou konečných prvků .....	60
8.1	Geometrie a materiálové vlastnosti vzorků.....	61
8.2	Průběh měření.....	61
8.3	Zpracování výsledků.....	62
9	Závěr .....	63
10	Citovaná literatura .....	65



## Seznam obrázků

Obrázek 1 : Schéma primárního okruhu (Doležal, et al., 2011).....	14
Obrázek 2 : Jaderný reaktor VVER 1000. (ČEZ, 2008) .....	16
Obrázek 3 : Komponenty primárního okruhu. (ČEZ, 2008) .....	19
Obrázek 4 : Vrchní část talkové nádoby. (ČEZ, 2008) .....	21
Obrázek 5 : Nosný válec reaktoru VVER 1000. (ČEZ, 2008).....	23
Obrázek 6 : Horní blok reaktoru VVER 1000. (ČEZ, 2008) .....	25
Obrázek 7 : Schéma rozložení palivových souborů v aktivní zóně (ČEZ, 2008). .....	27
Obrázek 8 : Prvek typu solid C3D8 s osmi uzly (Abaqus, nedatováno). .....	36
Obrázek 9 : Prvek typu conventional shell (Abaqus, nedatováno). .....	37
Obrázek 10 : Model nosného válce s prvky solid.....	39
Obrázek 11 : Model nosného válce s prvky typu shell.....	40
Obrázek 12 : Zavedení hodnot m a n. (Švrček, 2018) .....	41
Obrázek 13 : Kmitání dolní částí nosného válce m=1, n=3. ....	42
Obrázek 14 : Kmitání horní částí nosného válce m=1, n=3. ....	43
Obrázek 15 : Graf závislosti vlastních frekvencí na hodnotách m a n při použití prvků shell za stavu za studena. ....	45
Obrázek 16 : Graf závislosti vlastních frekvencí na hodnotách m a n při použití prvků shell za stavu za tepla. ....	45
Obrázek 17 : Vliv velikosti tlumení na poměr budící a vlastní frekvence. (Stejskal, et al., 2003).....	53
Obrázek 18 : Průběh frekvencí na hodnotě m a n ve vodním prostředí za studena. ....	55
Obrázek 19 : Průběh frekvencí na hodnotě m a n ve vodním prostředí za studena s uvažováním odchylky. ....	58

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty vlastních frekvencí modelů s prvky typu solid a shell .....	43
Tabulka 2 Hodnoty vlastních frekvencí modelů s prvky typu solid a shell pro chod za tepla .....	44
Tabulka 3 Hodnoty materiálových vlastností .....	51
Tabulka 4 Tabulka výsledků pro stav za studena.....	54
Tabulka 5 Tabulka výsledků pro stav za tepla .....	57
Tabulka 6 Tabulka výsledků pro různé rozměry prostředí .....	59

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se věnuje určení modálních vlastností součásti jaderného reaktoru a vlivu, jaký na tyto vlastnosti má prostředí, ve kterém součást je. Modální vlastnosti jsou důležitým údajem, který musíme znát v případě, že řešíme odezvu systému na vnější buzení. Při rezonančním buzení by hrozilo rychlejší poškozování součásti, což je u zařízení, jehož chod by měl být co nejplynulejší, nežádoucí.

Český statistický úřad uvádí, že v roce 2019 bylo v České republice vyrobeno 34,8 % celkového množství elektrické energie právě v jaderných elektrárnách (Adam, 2019). Z tohoto údaje vyplývá, že jaderné elektrárny mají výrazný podíl na produkci elektrické energie v České republice.

Se vzrůstajícím podílem jaderných zdrojů energie probíhá také celospolečenská debata o možnostech rozšíření kapacit již existujících elektráren výstavbou nových bloků. Přestože se jedná o do značné míry politické téma, jedním z důležitých bodů této debaty je téma bezpečnosti jaderných zařízení. V rámci tohoto rozsáhlého a komplexního problému nabízí tato diplomová práce vzhled do jednoho z dílčích témat, a tím je životnost komponent jaderných elektráren. Predikce životnosti dílčích částí jaderného reaktoru VVER 1000 nabízí doplňující data o stavu součástí reaktoru a může i nahradit fyzické kontroly reaktorů a tím zkracuje pravidelné odstávky a zabezpečuje plynulejší a bezpečnější chod jaderného zařízení.

## 2 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je určit hodnoty vlastních frekvencí ve vodním prostředí reaktoru VVER 1000, porovnat tyto hodnoty s hodnotami vlastních frekvencí bez uvažování vlivu prostředí a okomentovat rozdíly mezi těmito hodnotami, následně přidělit hodnotám vlastních frekvencí ve vodním prostředí příslušné vlastní tvary kmitů.

V práci bude nejprve představen princip fungování jaderné elektrárny, bezpečnostní prvky a opatření nezbytná pro její bezrizikový chod. Dalším krokem budou specifika jaderného reaktoru VVER 1000 a seznámení s jeho komponenty a s jejich funkcemi. Větší pozornost bude věnována nosnému válci reaktoru, neboť určení jeho modálních vlastností je hlavním cílem této diplomové práce. Budou pospány rovnice a metody použité při výpočtu. Hlavní použitou metodou je metoda konečných prvků, jejíž princip bude vysvětlen v páté kapitole diplomové práce.

Další částí bude porovnání výsledků výpočtu provedeného metodou konečných prvků při použití dvou různých typů elementů. Pro určení, zda má na tlumení vliv velikost prostředí, ve kterém se nosný válec nachází, budou vytvořeny dva modely s různě velkými oblastmi představujícími vodní prostředí. V závěru práce bude navržen experiment, který by měl poskytnout data, potvrzující správnost výsledků získaných výpočtem.

Výsledky diplomové práce by měly mít stěžejní význam pro firmu UJV Řež, která bude vypočtená data nadále používat pro hodnocení stavu součástí jaderných reaktorů.

## **3 Jaderná elektrárna**

Pro lepší představu namáhání součástí si na začátek vysvětlíme princip fungování a procesy probíhající v jaderné elektrárně a popíšeme si funkce jednotlivých součástí, budou popsána opatření a konstrukční součásti nutné pro bezpečný chod jaderné elektrárny.

### **3.1 Struktura jaderné elektrárny**

Pro zvýšení účinnosti a jednodušší uskladňování nového i vyhořelého paliva, má jaderná elektrárna větší počet bloků v rámci jednoho zařízení. Každý blok lze rozdělit na provozní a reaktorovou část (Doležal, et al., 2011).

V reaktorové části dochází k řízené štěpné reakci. Štěpná reakce probíhá v reaktoru, který je spojen s dalšími součástmi nezbytnými pro jeho fungování. Chladivo, které odebírá teplo z reaktoru, je hlavním cirkulačním potrubím dopraveno do výměníků (ČEZ, 2008). Ve výměnících dochází k předání tepla dalšímu okruhu. Proudění chladiva je zajištěno hlavními cirkulačními čerpadly. Chladivo je po předání tepla přivedeno zpět do reaktoru, kde znovu dochází k jeho ohřevu (ČEZ, 2008).

Při jaderném štěpení vzniká zdraví škodlivé záření. Aby nedocházelo k úniku záření, je celý reaktor hermeticky oddělen. Komponenta, která oddělení zajišťuje, se nazývá kontejnment (Doležal, et al., 2011). Kontejnment má za úkol pohlcovat záření a slouží i jako obal pro případnou havárii zařízení. Kolem reaktoru jsou umístěna biologická stínění, která pohlcují škodlivé záření, tepelné výměníky a čerpadla. Celá zástavba je koncipována tak, aby ztráty způsobené prouděním chladiva byly co nejmenší a nebezpečný prostor, ve kterém je pohyb omezen či přímo zakázán, byl co možná nejmenší (Doležal, et al., 2011).

V provozní části dochází k výrobě elektrické energie. Elektrická energie vzniká na alternátorech, které jsou poháněny turbínou. Pára, vyrobená ve výměníku, je dopravena na turbínu, kterou roztáčí a po ochlazení je opět přivedena k výměníku (Doležal, et al., 2011).

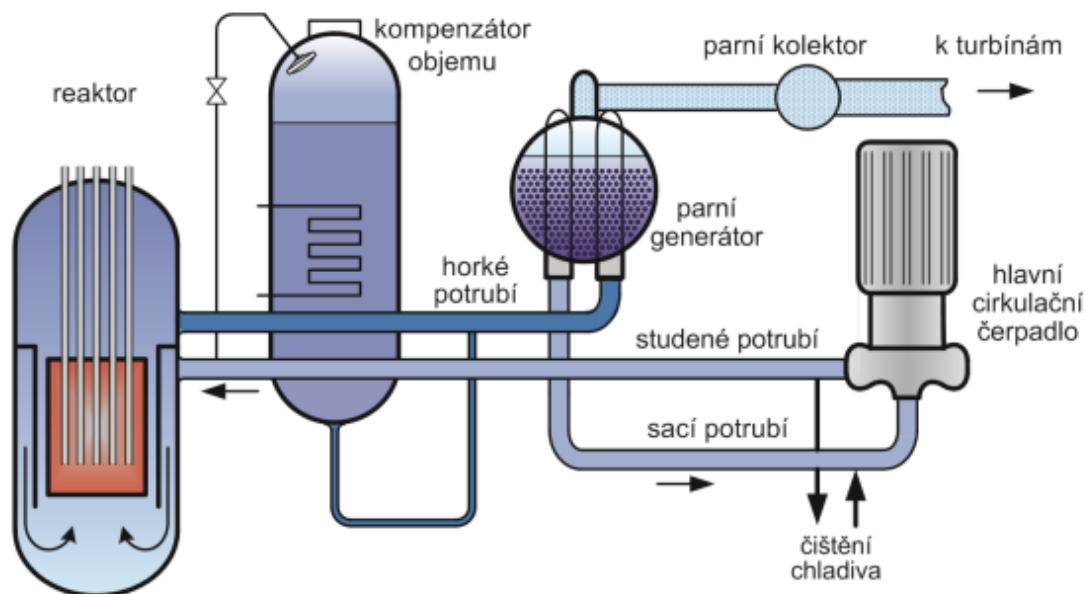
## **3.2 Princip fungování jaderné elektrárny**

V jaderné elektrárně dochází k přeměně energie – z jaderné na tepelnou, která je dále převáděna na mechanickou a na závěr na elektrickou. Oproti ostatním mají jaderné elektrárny výrazně vyšší výkon. Z jednoho kilogramu jaderného paliva lze získat až 1 GWh, což je milionkrát více než například z 1 kg hnědého uhlí, ale s provozem

jaderné elektrárny je spojeno výrazně více bezpečnostních předpisů a s nimi spojených bezpečnostních opatření, která musí elektrárna splňovat (Doležal, et al., 2011).

Reaktor, ve kterém probíhá řízená štěpná reakce, je velká tlaková nádoba. V této nádobě jsou palivové tyče, které jsou uloženy v palivových souborech (ČEZ, 2008).

Pro regulaci rychlosti štěpné reakce jsou v reaktoru také regulační tyče (ČEZ, 2008). Regulační tyče jsou součástí palivových souborů. Ty mohou být podle potřeby zasouvány a vysouvány z aktivní zóny reaktoru, kde dochází ke štěpné reakci. Pokud je v reaktoru naměřen příliš vysoký neutronový tok a dochází k nárůstu teploty, lze palivové soubory spustit hlouběji do reaktoru. Sníží se tak reaktivita a nadbytečný počet neutronů pohltí regulační tyče (ČEZ, 2008). Při štěpení paliva dochází k rozpadu atomového jádra, které se přemění na stabilní prvek a na dva až tři rychlé neutrony. Tyto rychlé neutrony mají pro některé typy reaktorů příliš velkou energii a nejsou proto vhodné pro další štěpnou reakci (ČEZ, 2008). V těchto reaktorech je moderátor, který zpomaluje část rychlých neutronů. Zpomalené neutrony jsou již vhodné k další štěpné reakci a díky redukci množství těchto pomalých neutronů je jaderná reakce stabilní a kontrolovatelná.



Obrázek 1 : Schéma primárního okruhu (Doležal, et al., 2011).

### 3.3 Bezpečnostní opatření

Kvůli bezpečnosti je jaderný blok rozdělen na okruhy. V minulosti bylo médium z reaktoru dopraveno přímo na turbínu. Dosahovalo se tak vyšších výkonů díky nižším ztrátám a vyšší kinetické energii média, ale nevýhodou bylo škodlivé záření, které výrazně snižovalo životnost turbíny a celý zástavbový prostor kolem ní musel podléhat vyššímu zabezpečení (Doležal, et al., 2011). Dnešní elektrárenské bloky využívané v energetice jsou rozděleny na dva okruhy. Do prvního, tzv. primárního okruhu (Obrázek 1), spadá reaktor, hlavní cirkulační potrubí, hlavní cirkulační čerpadla, kompenzátor objemu a výměník. Všechny tyto součásti jsou odstíněny a vstup do jejich blízkosti je přísně zakázán nebo omezen. V sekundárním okruhu je již záření minimální a přístup k jeho součástem nepodléhá tak přísné

kontrole. Kritickým místem, kde může docházet k úniku záření, je výměník (Doležal, et al., 2011). Z toho důvodu je velmi pečlivě utěsněn a přítomnost radioaktivních plynů v sekundárním okruhu je velmi přísně hlídána. V případě úniku jsou v sekundárním okruhu filtry a zásobníky, které mají za úkol záření pohltit (Doležal, et al., 2011).

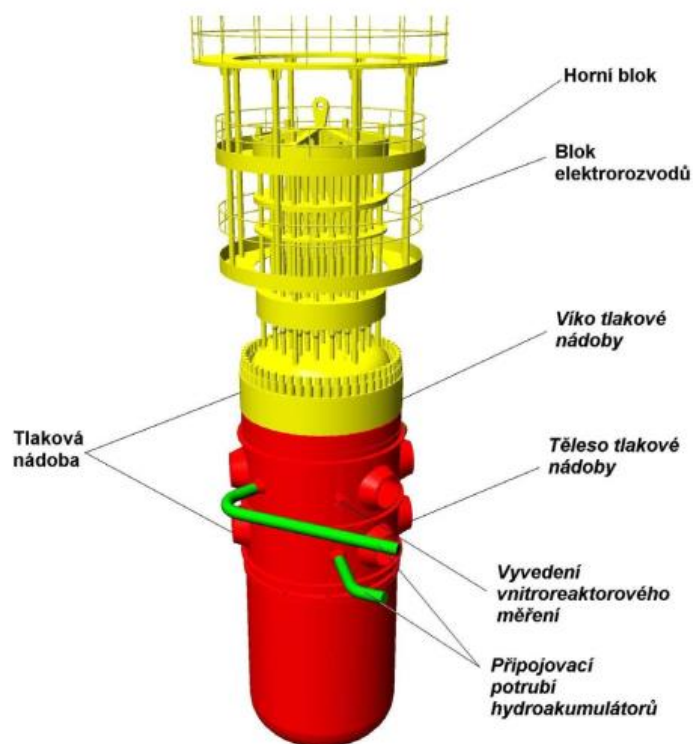
Do vnitřku reaktoru je zavedena měřicí aparatura. Díky tomu je při chodu elektrárny možné sledovat hodnoty teploty, neutronového toku a tlaku. Všechny tyto parametry jsou automaticky regulovány na optimální hodnoty. Automatické systémy vyhodnocují stav reaktoru a v případě nutnosti provádějí zásahy (ČEZ, 2008).



## 4 Reaktor VVER 1000

Reaktor VVER (Obrázek 2) je typ reaktoru, který je více využíván v zemích bývalého sovětského svazu. Z celkového počtu 253 jaderných elektráren je téměř 57 % právě typu VVER (ČEZ, 2016).

V České republice jsou dvě jaderné elektrárny pracující s typem VVER. Elektrárna Temelín má dva reaktory typu VVER 1000 a elektrárna Dukovany čtyři reaktory typu VVER 440. Číselné označení udává projektovaný výkon jaderného reaktoru.



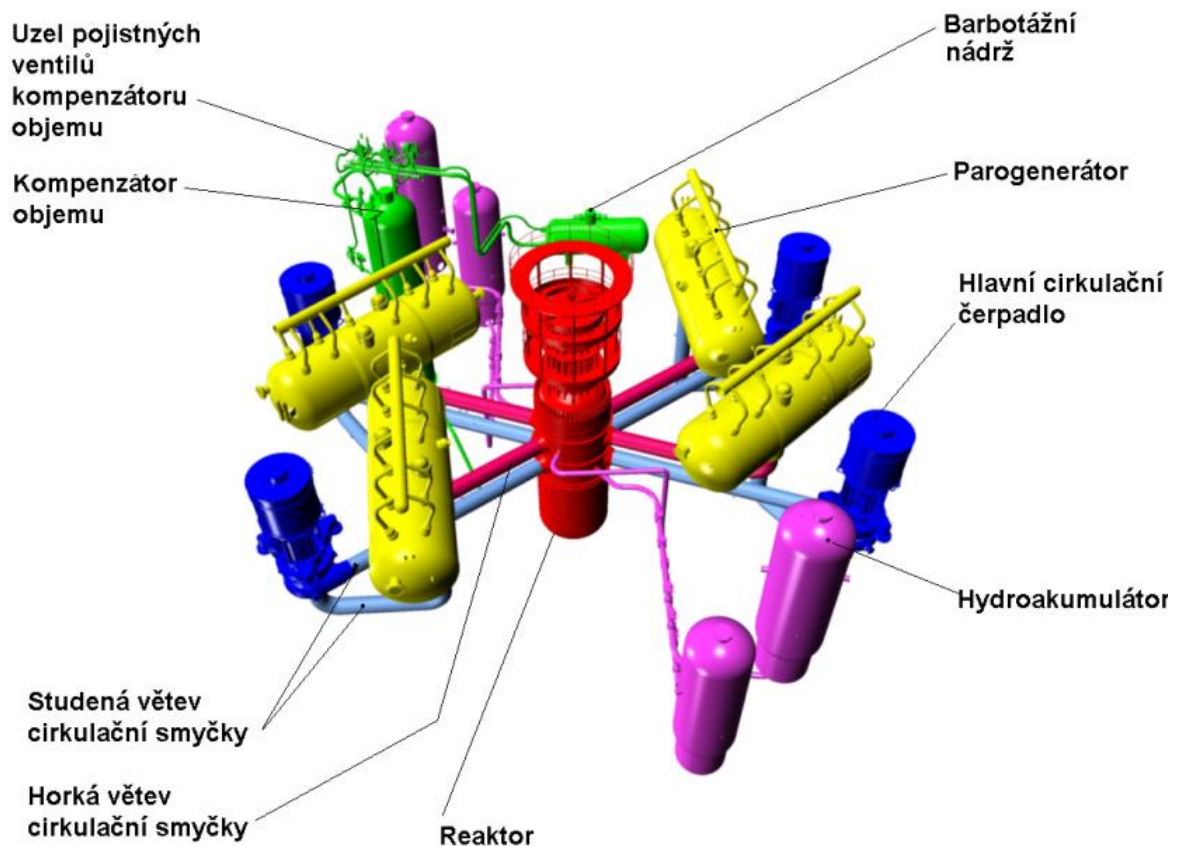
Obrázek 2 : Jaderný reaktor VVER 1000. (ČEZ, 2008)

## 4.1 Specifikace jaderného reaktoru VVER 1000

VVER je zkratka pro vodo-vodní elektrický reaktor. Médium v tomto reaktoru je voda s kyselinou boritou, která slouží jako moderátor pro zpomalení neutronů (ČEZ, 2008). Kyselina boritá je rozpuštěna v médiu v dané koncentraci, aby docházelo ke zpomalení optimálního množství neutronů. ČEZ dále uvádí, že v průběhu kampaně dochází k snižování koncentrace kyseliny v médiu, ale zároveň se štěpením snižuje aktivita paliva a štěpná reakce se tím udržuje na stabilní úrovni. ČEZ definuje kampaň jako období mezi výměnou paliva, při které probíhá fyzická kontrola reaktoru a dochází k přeskupení palivových souborů (ČEZ, 2008). Médium v jaderném reaktoru je v kapalném skupenství. Výhoda kapalného skupenství oproti plynnému je ta, že médium má vyšší tepelnou kapacitu. Tepelná kapacita vody v kapalném skupenství je  $4187 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  a tepelná kapacita páry se pohybuje okolo  $1840 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  což je až dvaapůlkrát méně (Křenek, nedatováno). Protože je teplota média v reaktoru vysoko nad bodem varu, je nutné udržovat v reaktoru vysoký tlak, aby nedošlo k vypaření média. Hodnota tlaku v reaktoru se pohybuje okolo 15,5 MPa (ČEZ, 2008). Aby tato hodnota nerostla, nebo příliš neklesla, je k oběhu připojen objemový kompenzátor. V případě poklesu tlaku dochází k přívodu média a tlak tak naroste na potřebnou hodnotu. Při nárůstu naopak objemový kompenzátor upustí médium z reaktoru a sníží tak rostoucí tlak (ČEZ, 2008).

Pro vyšší účinnost jsou na jeden reaktor připojeny čtyři hlavní cirkulační potrubí, každé s vlastním výměníkem a s vlastním čerpadlem (ČEZ, 2008). Jednotlivá potrubí jsou k reaktoru připojena do kříže. Jaderné zařízení může pracovat na různých módech, kdy je hnáno médium jen do některých potrubí. Můžou tak vznikat různé výslednice sil v závislosti na kombinaci pracujících čerpadel a může se tak i měnit hodnota budicí frekvence (ČEZ, 2008).

Cirkulační oběh média se dělí na teplou a studenou větev. Větve jsou odděleny těsnícím nákrůžkem, který je umístěn v prostoru mezi tlakovou nádobou a nosným válcem (Doležal, et al., 2011). Médium, ohřáté jaderným palivem, je odváděno z reaktoru perforovanou stěnou v horní části nosného válce. Potrubí s ohřátým médiem se nazývá teplá větev. Teplota v teplé větvi je 375 °C (ČEZ, 2008). Ve výměníku předá teplo sekundárnímu okruhu a ochladí se na teplotu přibližně 350 °C. Po předání tepla je médium přes čerpadla přivedeno zpět do reaktoru perforovaným eliptickým dnem nosného válce a stoupá přes aktivní zónu, kde opět dochází k jeho ohřívání. Rozložení jednotlivých komponent v primárním okruhu je zachyceno na obrázku (Obrázek 3).



Obrázek 3 : Komponenty primárního okruhu. (ČEZ, 2008)

V reaktoru typu VVER je jako palivo používán obohacený  $^{235}_{92}\text{U}$  ve formě oxidu  $\text{UO}_2$ . Uran je v podobě tablet uložen v palivových tyčích a je odstřelován neutrony. Tím dochází k rozpadu jeho nestabilního jádra na stabilní prvek a 1-3 neutrony. Palivové tyče jsou uloženy do palivových souborů, které mají tvar šestiúhelníku (Doležal, et al., 2011). Díky tomuto tvaru je možné do aktivní zóny dát velké množství palivových souborů.

V reaktoru je používáno nové obohacené palivo, ale i palivo z předešlých kampaní. Nové palivo je umístěno do středu a palivové

tyče s již použitým palivem je umístěno na okraj aktivní zóny. Tímto rozdělením se zajišťuje lepší rozložení teploty a neutronového toku v aktivní zóně. Po každé kampani jsou palivové tyče přesunuty ze středů více na okraj a do středu aktivní zóny jsou vloženy tyče s novým obohaceným uranem. Plně využitá tyče jsou umístěny do bazénu v blízkosti reaktoru, kde dojde k jejich dochlazení a snížení radioaktivity (Doležal, et al., 2011).

## 4.2 Součásti reaktoru VVER 1000

### 4.2.1 Tlaková nádoba



*Obrázek 4 : Vrchní část tlakové nádoby. (ČEZ, 2008)*

Tlaková nádoba (Obrázek 4) má válcový tvar, zakončený eliptickým dnem. Celková výška je téměř 11 metrů a průměr je přes 4,5 metru (Švrček, 2015).

Tlaková nádoba se skládá z několika prstenců a eliptického dna (Švrček, 2015). Tyto části jsou spojeny obvodovými svary. Materiálem je kvalitní austenitická ocel s nerezovým návarem. Kvůli vysokým teplotám a tlakům a ionizujícímu záření, kvůli kterému dochází ke

křehnutí oceli, jsou na materiál kladeny velmi vysoké nároky (Doležal, et al., 2011).

Ve dvou horních prstencích je prolisováno 8 přírub, které slouží ke spojení s jednotlivými hlavními cirkulačními potrubími (Švrček, 2015). Pro případ nutnosti jsou k tlakové nádobě přivedena další čtyři potrubí, která mohou dochladiť aktivní zónu v případě havarijního stavu. Další otvor je určen pro vývod vnitro-reaktorových měření. Po obvodu vrchního prstence je vyvrtáno 54 otvorů se závity pro uzavření a utěsnění reaktoru víkem. Ve spodní části tlakové nádoby jsou uvnitř přivařena pera, kterými je spojen nosný válec s tlakovou nádobou. V horní části je také obvodové osazení pro zavěšení nosného válce. Tlaková nádoba je uložena v kontejnmentu, který přesně vymezuje polohu, pohlcuje nebezpečné záření a slouží jako ochrana v případě porušení reaktoru (ČEZ, 2008).

## 4.2.2 Nosný válec



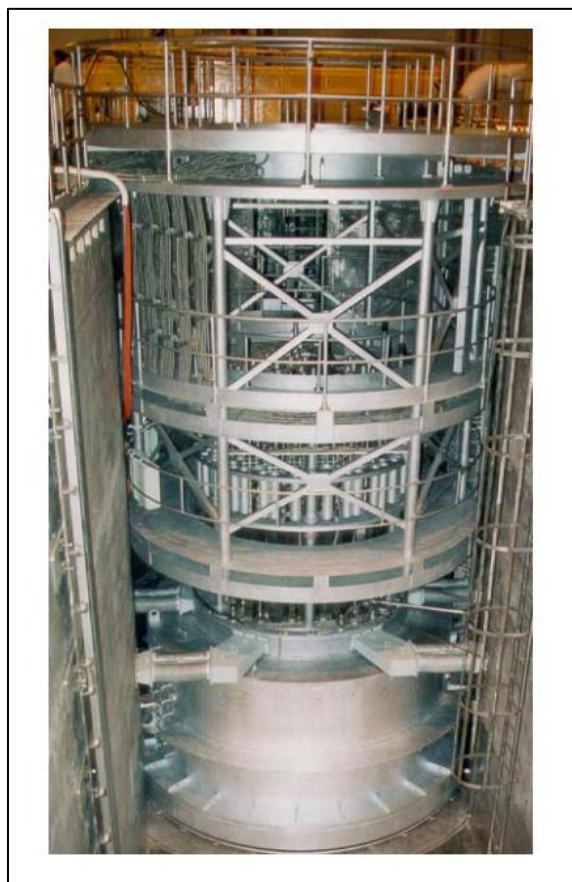
*Obrázek 5 : Nosný válec reaktoru VVER 1000. (ČEZ, 2008)*

Nosný válec (Obrázek 5) je tenkostěnná nádoba, vysoká zhruba 10 metrů s průměrem 3 620 mm a tloušťkou stěny 60 mm. Jeho úkolem je zajistit polohu aktivní zóny a chrání tlakovou nádobu před poškozením neutronovým tokem (Švrček, 2015). Stejně jako tlaková nádoba je



složen z prstenců a eliptického dna vzájemně spojených obvodovými svary. Materiálem je opět kvalitní austenitická ocel s nerezovým návarem. V dolní části jsou z vnějšku po obvodu drážky, kterými je nosný válec spojen s tlakovou nádobou. V horní části má nosný válec osazení, které dosedá na plošku obvodového osazení tlakové nádoby (Švrček, 2015). Vrchní část nosného válce je perforovaná. Po obvodu je 280 otvorů o průměru 180 mm, kterými odchází ohřáté médium z reaktoru. Perforované je i dno nosného válce. Do eliptického dna je navrtáno 1344 otvorů o průměru 40 mm, kterými vtéká ochlazené médium zpět do aktivní zóny (ČEZ, 2008). V dolní části nosného válce je deska s podpěrami palivových souborů. V těchto podpěrách jsou umístěny patice palivových souborů a zajišťují správné proudění chladiva reaktorem. V horní části tlakové nádoby je nalisován dělicí prsteneček. Za studena je mezi prstencem a nosným válcem 2 mm široká mezera. Při chodu reaktoru a ohřátí média dojde vlivem rozdílné teplotní roztažnosti prstence a nosného válce k jejich vzájemnému kontaktu. Nosný válec je tím ještě přesněji vystředěn a také dojde k ucpání mezery mezi nosným válcem a tlakovou nádobou a je tak oddělena teplá a studená větev média (Švrček, 2015).

### 4.2.3 Horní blok reaktoru



Obrázek 6 : Horní blok reaktoru VVER 1000. (ČEZ, 2008)

Horní blok (Obrázek 6) se sestává z víka reaktoru a z pohonů regulačních orgánů reaktoru. Regulační orgány zasouvají a vysouvají palivové soubory z aktivní zóny. Víko má eliptický tvar s přivařenými nátrubky pro spojení regulačních tyčí s jejich pohony. Po obvodu eliptické části je osazení s 54 otvory pro šrouby pro spojení s tlakovou nádobou. Součástí horního bloku je metalokonstrukce, která se skládá z nosných tyčí a traverzy s uchem. Traverza s uchem se používá pro transport horního bloku při výměně paliva po kampani (Švrček, 2016).

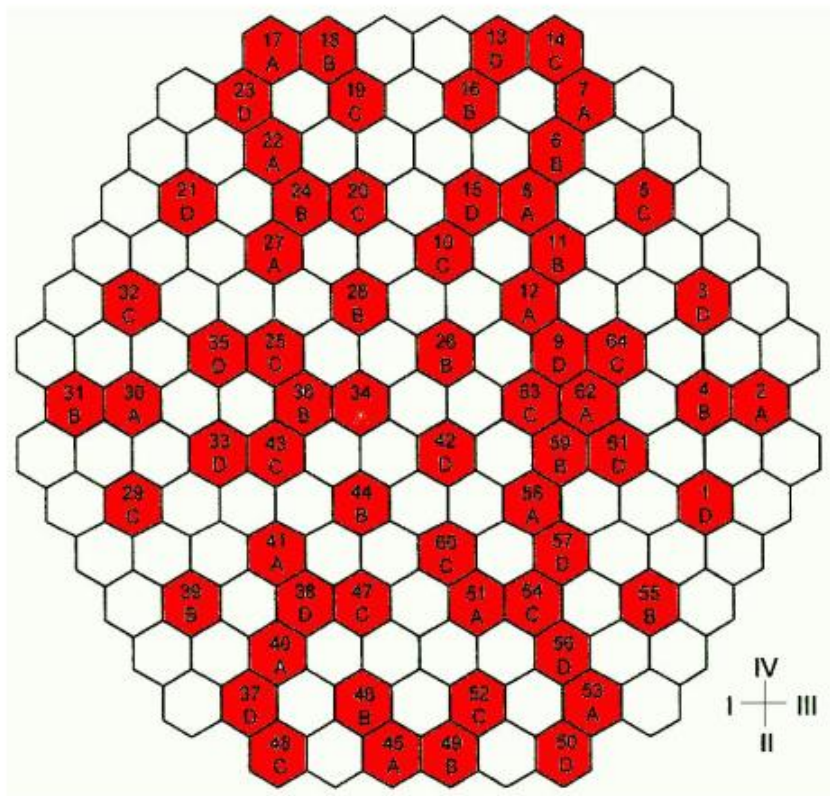
#### 4.2.4 Plášť aktivní zóny

Plášť aktivní zóny se skládá z pěti prstenců, které jsou spojeny šrouby. Vnější strana má válcový tvar a jsou v ní cirkulační drážky, které napomáhají chlazení. Pro další chlazení jsou v plášti vyvrtány kanálky, kterými rovněž dochází k odvodu tepla. Vnitřní strana má stejný tvar jako geometrie palivových souborů (obrázek 7). Hlavní funkce pláště aktivní zóny je ochrana dalších komponent reaktoru před neutronovým tokem a zajištění palivových souborů v přesně předepsané poloze. Plášť aktivní zóny je uchycen v nosném válci pomocí závitových tyčí a vnitřního osazení nosného válce (Švrček, 2015).

#### 4.2.5 Aktivní zóna

Jak již bylo řečeno, v aktivní zóně dochází ke štěpení jaderného paliva. Toto palivo je ve formě tablet uloženo v palivových prutech, které mají průměr 9 mm. Tablety tvoří oxid uraničitý  $UO_2$  a pruty jsou vyrobeny ze zirkonové oceli. V horní části prutu je distanční pružina, která předepíná tablety paliva ve vertikálním směru. Při hoření paliva dochází k nárůstu objemu tablet a pružina je stlačována (Doležal, et al., 2011). Palivové pruty jsou uloženy v palivových souborech. Jeden palivový soubor obsahuje 312 palivových prutů a regulační tyče. Palivové soubory můžeme rozdělit na tři části – hlavici, patici a skelet. Ve skeletu jsou přesně uloženy palivové pruty, slouží také jako jejich

ochrana a zajišťuje takový průtok chladiva, aby přenos tepla byl co nejefektivnější. Patice dosedá do podpěr palivových souborů. Tím jsou palivové soubory zajištěny v horizontální poloze. Pomocí hlavice je celý palivový soubor uložen v desce bloku ochranných trub a je také předepjat pružinami ve vertikálním směru (Švrček, 2015). V reaktoru je 163 palivových souborů, které jsou v trojúhelníkové síti, která je zobrazena na obrázku (Obrázek 7).



Obrázek 7 : Schéma rozložení palivových souborů v aktivní zóně (ČEZ, 2008).

### 4.3 Poškození způsobené kmitáním

Harmonické buzení má zdroj v hlavních centrálních čerpadlech. Toto buzení je distribuováno po celém reaktoru chladičem. Frekvence buzení odpovídá násobku lopatkové frekvence čerpadla, jejíž hodnota je 16,635 Hz (Švrček, 2015). Maximální budící frekvence, které čerpadla mohou dosahovat je méně než 300 Hz, proto nebudou vyšší frekvence zkoumány.

Tlakové pulzace působí na stěny nosného válce při přitékání média do reaktoru studenou větví oběhu. Tyto pulzace rozkmitávají nosný válec, který následně koná kmitavý pohyb a dochází k namáhání spojů nosného válce s tlakovou nádobou.

V minulosti bylo ve firmě UJV Řež provedeno měření úbytku materiálu ve spojení pero-drážka. Relativní pohyb mezi nosným válcem a tlakovou nádobou způsobuje otěr pera. Bylo provedeno opakované měření při koncích kampaní a byl stanoven časový úbytek materiálu. Zprávu z tohoto měření vytvořili Vladimír Zeman a Zdeněk Hlaváč (Zeman & Hlaváč, 2018).

S vyšší amplitudou kmitání dochází k většímu relativnímu pohybu, který má za následek rychlejší úbytek materiálu způsobený otěrem. Vysoká amplituda pohybu má za následek také větší namáhání celého nosného válce a dalších spojů.

## 5 Metody výpočtu

Jedním z cílů diplomové práce je výpočet vlastních frekvencí nosného válce. Při výpočtu vlastních frekvencí se vychází z pohybové rovnice systému (1). Pro názornost bude ukázáno řešení pro systém s  $n$  stupni volnosti (Stejskal, et al., 2003).

$$\underline{M} \cdot \underline{\ddot{x}} + \underline{K} \cdot \underline{x} = \mathbf{0} \quad (1)$$

Kde:

$\underline{M}$  je matice hmotnosti

$\underline{K}$  je matice tuhosti

$\underline{\ddot{x}}$  je vektor zrychlení

$\underline{x}$  je vektor posuvů

K rovnici jedna připojíme okrajové podmínky  $\underline{x}(0) = \underline{x}_0$  a  $\underline{\dot{x}}(0) = \underline{\dot{x}}_0$ .

Řešení rovnice předpokládáme v exponenciálním tvaru daný rovnicí (2)

$$\underline{x} = \underline{a} \cdot e^{i\Omega t} \quad (2)$$

Po dosazení řešení ve tvaru (2) do rovnice (1) získáme rovnici (13).

$$(\underline{K} - \Omega^2 \underline{M})\underline{a} = \mathbf{0} \quad (3)$$

Rovnice (3) popisuje problematiku vlastních čísel a jejím netriviálním řešením jsou vlastní čísla  $\lambda_i$  kde  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  a vlastní vektory  $\underline{a}_i$ . Vlastní frekvence systému jsou pak dány vztahem (4). Abychom získali právě jedno řešení, je nutné normovat rovnici vahou matice  $\underline{M}$ . Normovaný tvar vlastního vektoru  $\underline{v}_i$  je pak dán rovnicí (5). Vektor  $v_i$  je dán vztahem (6) a  $\alpha_i$  je dáno vztahem (7) (Stejskal, et al., 2003).

$$\Omega_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (4)$$

$$\underline{v}_i^T \underline{M} \underline{v}_j = \begin{cases} 1 & \text{pro } i = j \\ 0 & \text{pro } i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

$$\underline{v}_i = \alpha_i \underline{a}_i \quad (6)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\sqrt{\underline{a}_i^T \underline{M} \underline{a}_i}} \quad (7)$$

Zavedeme matici  $\underline{V}$ , která má ve sloupcích jednotlivé vektory vlastních tvarů kmitů  $v_i$  a diagonální matici  $\underline{\Lambda}$ , která má na diagonále vlastní čísla  $\lambda_i$ . Zavedeme podmínku ortonormality (8) a (9), kde  $\underline{I}_n$  je jednotková matice řádu  $n$ . Tyto rovnice zároveň popisují takzvanou modální transformaci matic  $\underline{M}$  a  $\underline{K}$  (Stejskal, et al., 2003).

$$\underline{V}^T \underline{M} \underline{V} = \underline{I}_n \quad (8)$$

$$\underline{V}^T \underline{K} \underline{V} = \underline{\Lambda} = \underline{\Omega}^2 \quad (9)$$

Pro řešení rovnice (1) zavedeme nové proměnné dané vztahem (10).

$$\underline{x} = \underline{V} \underline{q} \quad (10)$$

Dosazením vztahu (10) do rovnice (1) a vynásobením této rovnice zleva  $\underline{V}^T$  po úpravě dostaneme vztah (11)

$$\underline{\ddot{q}} + \underline{\Lambda} \underline{q} = 0 \quad (11)$$

Rovnice (11) je zápisem n samostatně řešitelných rovnic (12). Tyto rovnice odpovídají rovnici systému s jedním stupněm volnosti (Stejskal, et al., 2003).

$$\ddot{q}_i + \Omega_i^2 q_i = 0 \quad (12)$$

## 5.1 Metoda konečných prvků

Pro výpočet vlastních frekvencí bude použita metoda konečných prvků. Metoda konečných prvků se používá v úlohách mechaniky tuhých těles, proudění tekutin, přenosů tepla atd.

Základem metody konečných prvků je nahrazení spojitého fyzikálního modelu, popsaného diferenciálními rovnicemi, diskretizovaným



modelem, který je popsán lineárními algebraickými rovnicemi (Nikishov, 2004). Diskretizace spočívá ve vytvoření konečně prvkové sítě, kterou tvoří elementy a uzly, ve kterých je počítána hodnota hledané funkce. Při výpočtu musíme zvolit typ a vlastnosti elementů a přiřadit okrajové podmínky. Výsledkem je pak řešení systému globálních funkcí. Například hodnoty posuvů v uzlech. Poslední částí výpočtu je určení dalších hledaných funkcí například deformace a napětí. Výhodou metody je možnost dosahovat vyšší přesnosti řešení zvyšováním počtu prvků sítě (Nikishov, 2004).

## 5.2 Acoustic-shell interaction

Problematika vlivu prostředí na modální vlastnosti součásti vyžaduje výpočetní metodu, která spojuje dva matematické modely do jednoho výpočtu. Pro výpočet byl použit program Comsol multiphysics, který nabízí možnost výpočtu metodou acoustic-shell interaction. Touto metodou lze simulovat změny akustického tlaku média, které jsou vyvolány pohybem součásti v médiu (Comsol, nedatováno). Při vlastním kmitání součásti dochází ke změnám akustického tlaku prostředí, který působí na stěny součásti. Tento proces simuluje reálný odpor vody proti pohybu a dochází tak ke snížení hodnot vlastních frekvencí. Pro diskretizaci tuhého tělesa jsou použity elementární prvky typu shell. Použití těchto prvků je vhodné při modelování tenkostěnných součástí. Nádobu můžeme považovat za tenkostěnnou, pokud poměr nejmenšího poloměru vnější hrany nádoby a tloušťky nádoby v tomto místě je menší než deset (Michalec & kolektiv, 1998). Tuto podmínku nosný válec splňuje, neboť jeho nejmenší poloměr je 1800 mm a tloušťka v tomto místě je 50 mm. Poměr těchto dvou rozměrů vychází 36, proto můžeme nosný válec pokládat za tenkostěnnou nádobu.

Rovnice pro výpočet vlastních frekvencí metodou acoustic-shell interaction jsou defaultně dány programem.

Pro pevné těleso je dána rovnice (13) . Rovnice (13) představuje vztah mezi posuvem a silami působícími na tuhé těleso. Posuv je dán tvarem vlastních kmitů a působící síly představují odpor média.

$$-\rho \cdot \omega^2 \cdot u = \nabla \cdot \sigma + F_V + 6(M_V \times n) \frac{z}{d^2} \quad (13)$$

Kde:

$\nabla$  je diferenciální operátor

$\rho$  je hustota

$\sigma$  je plošné napětí

$F_V$  je síla

$\omega$  je úhlová frekvence

$M_V$  je silový moment působící na rameni  $n$

$z$  je souřadnice

$d$  je průměr tuhého tělesa

Pro prostředí je dána rovnice (14). Rovnice (14) je Helmholtzova rovnice akustického tlaku. Tato rovnice udává vztah mezi změnou akustického tlaku a působící síle. Sílu při výpočtu představuje pohybující se model nosného válce.

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla \cdot p_t - q_d) \right) - \frac{\omega^2 \cdot p_t}{C_c^2 \cdot \rho_c} = Q_m \quad (14)$$

Kde:

$\nabla$  je diferenciální operátor

$\rho$  je hustota

$p$  je tlak

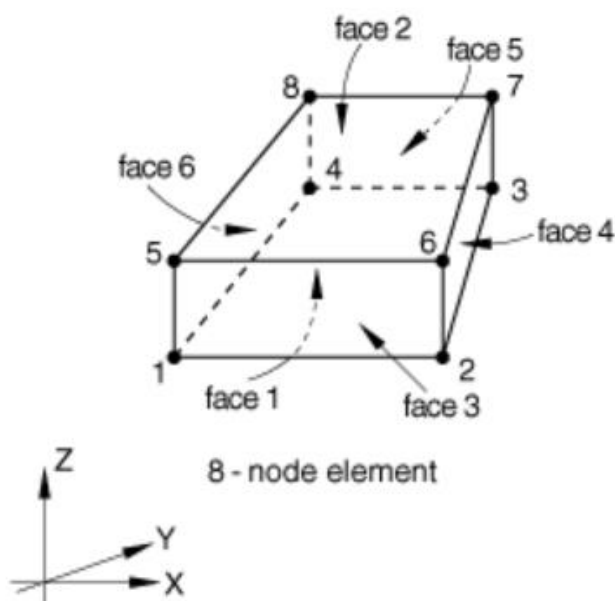
$C_c$  je rychlost zvuku

$\omega$  je úhlová frekvence

$q_d$  je dipolový zdroj v našem výpočtu je roven 0

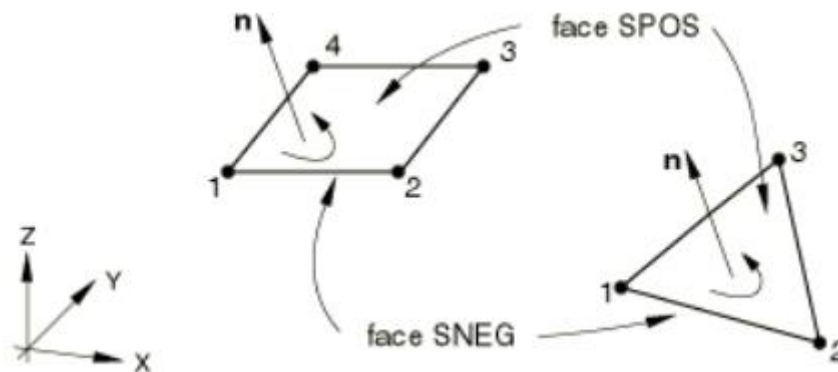
## 6 Vlastní frekvence pro model s prvky typu solid a shell

Pro ověření, zda je možné považovat nosný válec za tenkostěnnou nádobu, bude v rámci této kapitoly proveden porovnávací výpočet dvou modelů. Výpočty budou provedeny v programu Abaqus. První model bude tvořen elementárními prvky typu solid C3D8 (obrázek 8). Prvky typu solid jsou trojrozměrné. Mohou se deformovat ve všech směrech a zkosit se ve všech rovinách. Mají široké využití a poskytují dobré výsledky. Při vyšší hustotě sítě dosahují modely vysokého počtu elementů a s ním roste doba výpočtového času a výpočtové náročnosti.



Obrázek 8 : Prvek typu solid C3D8 s osmi uzly (Abaqus, nedatováno).

Pro druhý výpočet budou použity prvky typu conventional shell (obrázek 9), které jsou dvourozměrné. Prvky typu shell jsou velmi dobře použitelné u modelů jejichž tloušťka je desetkrát menší než ostatní rozměry. Tloušťka při použití těchto elementů je zadána jen jako parametr. Díky tomu se výrazně sníží počet elementů modelu a také se sníží náročnost výpočtu a celková doba jeho trvání.



Obrázek 9 : Prvek typu conventional shell (Abaqus, nedatováno).

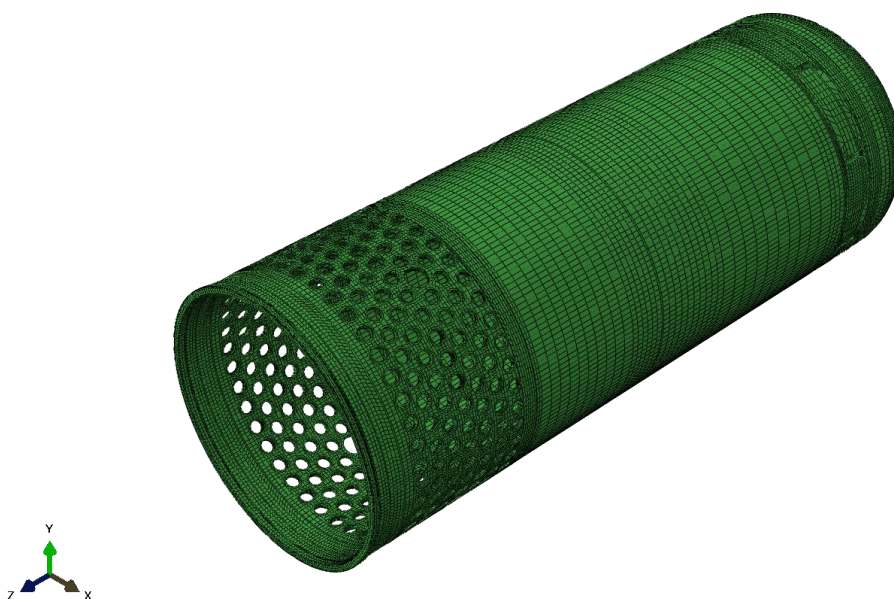
## 6.1 Geometrie modelů

Modely byly vytvořeny na základě výkresové dokumentace týkající se reaktoru VVER 1000. Výkresová dokumentace byla poskytnuta firmou UJV Řež.

### 6.1.1 Model s prvky typu solid

Model nosného válce pro výpočet s prvky solid byl vytvořen přesně podle výkresové dokumentace. Do modelu byly zahrnuty veškeré perforace, zkosení sražení a další konstrukční prvky.

Materiálové vlastnosti byly přiřazeny pro celý model stejné. Hodnoty modulu pružnosti a hustoty pro austenitickou ocel byly také poskytnuty firmou UJV Řež. Hodnota hustoty je  $7850 \text{ kgm}^{-3}$ , modul pružnosti  $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$  a Poissonovo číslo 0,3. Přiřazené okrajové podmínky odpovídaly reálným vazbám. Horní osazení, na které doléhá víko jaderného reaktoru je v modelu reprezentováno omezením pohybu i rotace ve všech třech směrech. Spojení pero-drážka bylo nahrazeno omezením pohybu v části nosného válce, kde se pera nachází. Omezen byl pohyb v radiálním a tangenciálním směru. Jak bylo řečeno v rámci třetí kapitoly, je pro oddělení teplé a studené větve v tlakové nádobě nalisován těsnící nákrůžek. Vlivem rozdílné teplotní roztažnosti nákrůžku a nosného válce dochází při chodu reaktoru k dolehnutí nákrůžku na nosný válec. Tím dojde k oddělení větví a také ke vzniku nové vazby, která je představována omezením pohybu i rotace ve všech směrech v místě dotyku nosného válce a těsnícího nákrůžku.



*Obrázek 10 : Model nosného válce s prvky solid.*

Na obrázku (Obrázek 10) je zobrazena síť nosného válce tvořená prvky typu solid. Celkový počet prvků je 218 540 s čtyřmi prvky po tloušťce.

### **6.1.2 Model s prvky typu shell**

Základní rozměry modelu byly přiřazeny dle výkresové dokumentace. Na rozdíl od modelu typu solid byla geometrie modelu typu shell velmi zjednodušená. Toto zjednodušení bylo zavedeno pro výrazné usnadnění modelování a snížení výpočtové náročnosti. Rozdílná tloušťka stěny byla zohledněna přiřazením tloušťky jako parametru pro dané úseky nosného válce. Přechody v podobě zkosení či zaoblení byly zanedbány vzhledem k jejich nízkému vlivu na modální vlastnosti. Podstavce palivových tyčí byly nahrazeny prvky typu beam. Prvky typu beam jsou

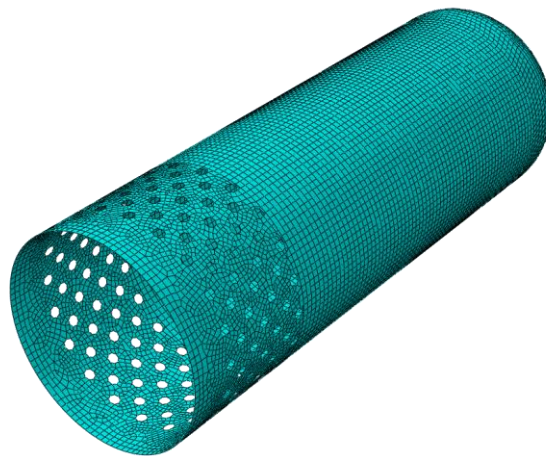


jednodimenzionální elementy, které mají tvar a rozměry profilu dané jen jako parametr.

Materiálové vlastnosti nosného válce jsou stejné, jako u modelu typu solid.

Okrajové podmínky jsou velmi podobné jako pro model s prvky solid. V horní části je omezení pohybu i rotace ve všech směrech. V oblasti spojení pero-drážka je pohyb umožněn pouze v tangenciálním a radiálním směru. Kontakt s těsnícím nákrůžkem je opět zastoupen nulovými posuvy a natočeními po obvodu nosného válce v místě kontaktu s nákrůžkem.

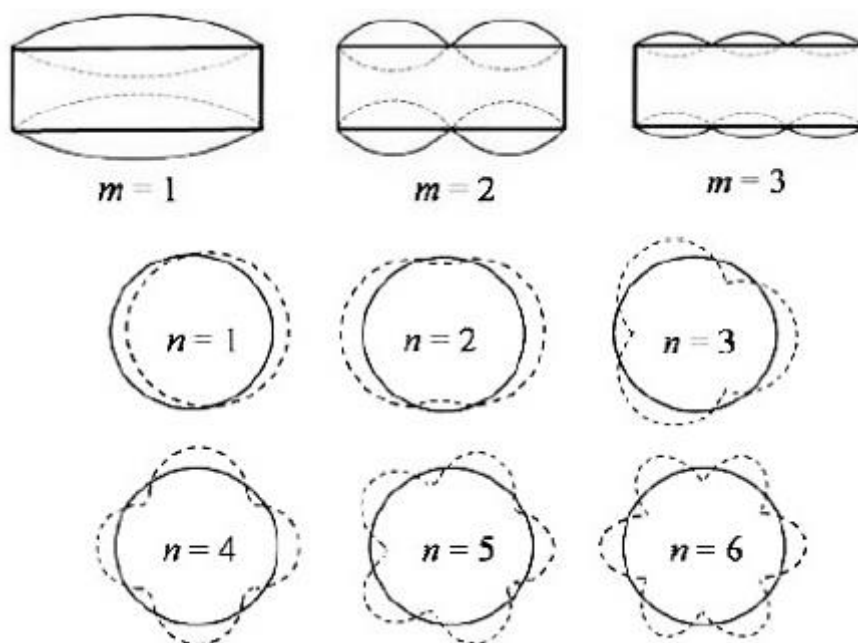
Na obrázku (Obrázek 11) je vidět vytvořená síť modelu tvořená prvky shell. Počet prvků je výrazně nižší a výpočetní náročnost značně klesla. Model obsahuje 16 915 prvků typu shell a 1 824 prvků typu beam.



*Obrázek 11 : Model nosného válce s prvky typu shell.*

### 6.1.3 Výsledky

Pro přiřazení hodnot vlastních frekvencí příslušným vlastním tvarům kmitů, byly zavedeny hodnoty  $m$  a  $n$ , které udávají počet podélných a příčných vln. Způsob přiřazení lze vidět na obrázku (Obrázek 12).

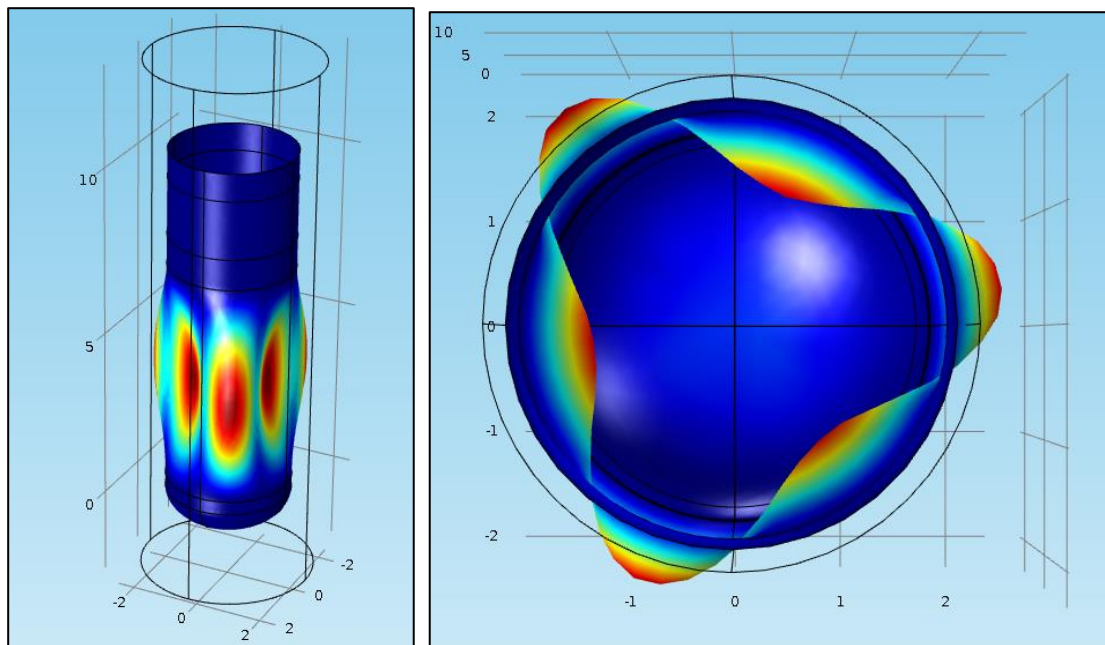


Obrázek 12 : Zavedení hodnot  $m$  a  $n$ . (Švrček, 2018)

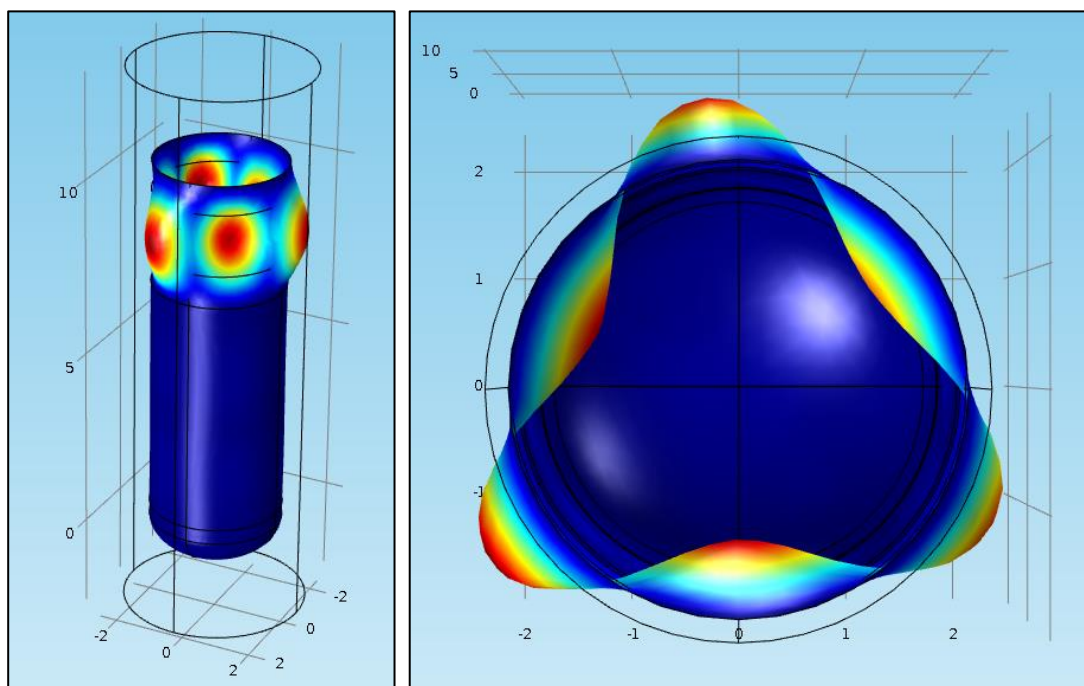
Výsledky ze dvou modelů jsou zapsány v tabulkách. V tabulce 1 jsou hodnoty vlastních frekvencí při režimu za studena, kdy nedochází k realizaci kontaktu s těsnícím nákrůžkem. Odchyšky výsledků rostou s rostoucí hodnotou  $n$ .

Chodu za tepla, kdy je realizována vazba s těsnícím nákrůžkem, odpovídají hodnoty v tabulce 2. Zohlednění vazby nosného válce s nákrůžkem zvýší tuhost modelu a zvýší se hodnoty vlastních frekvencí. Dále dojde k pomyslnému rozdělení nosného válce v místě

dotyku s nákuřkem. Nosný válec se rozdělí na horní a dolní část což je dobře viditelné na obrázcích 13 a 14. Ve výsledcích se objeví hodnoty vlastních frekvencí pro kmitání pouze střední a horní části.



Obrázek 13 :Kmitání dolní částí nosného válce  $m=1, n=3$ .



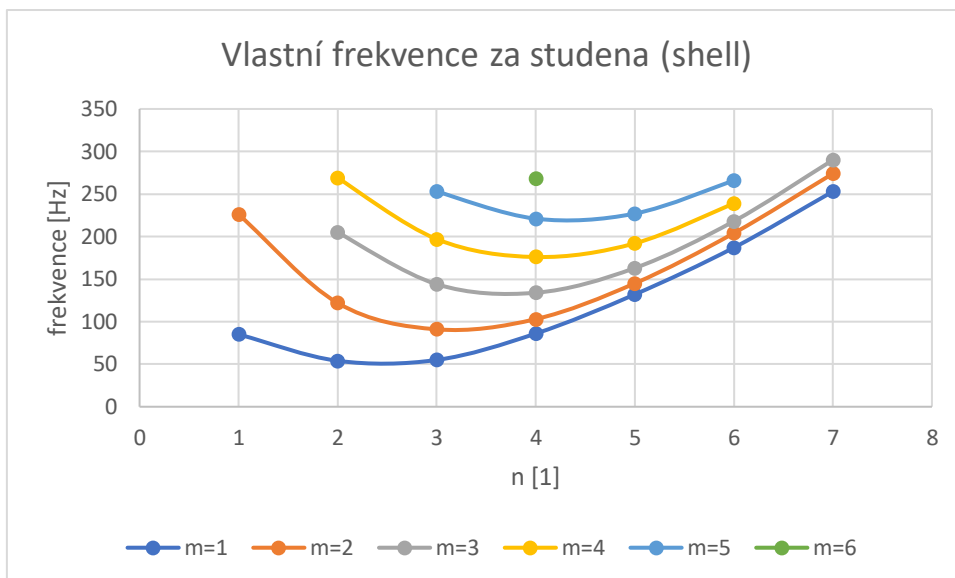
Obrázek 14 :Kmitání horní části nosného válce  $m=1$ ,  $n=3$ .

			Solid	Shell	Odchylka
	m	N	f [Hz]	f [Hz]	rozdíl v %
4	1	1	81,50	85,30	4,66
2	1	2	52,70	54,30	3,04
1	1	3	48,00	54,50	13,54
3	1	4	71,90	85,60	19,05
7	1	5	109,40	131,60	20,29
13	1	6	154,90	187,30	20,92
20	1	7	207,20	252,50	21,86
24	2	1	215,20	225,70	4,88
8	2	2	123,40	121,50	-1,54
5	2	3	87,20	90,80	4,13
6	2	4	92,00	102,90	11,85
9	2	5	124,20	145,10	16,83
15	2	6	170,90	203,80	19,25
25	2	7	226,60	273,50	20,70
19	3	2	203,00	205,30	1,13
11	3	3	145,10	143,80	-0,90
10	3	4	128,60	134,40	4,51
12	3	5	145,70	163,00	11,87
17	3	6	185,20	217,50	17,44
27	3	7	242,00	289,60	19,67
29	4	2	252,30	268,70	6,50
18	4	3	190,80	197,30	3,41
14	4	4	166,80	175,70	5,34
16	4	5	175,40	192,00	9,46
21	4	6	209,60	238,60	13,84
28	5	3	244,90	252,70	3,18
23	5	4	213,70	220,50	3,18
22	5	5	212,70	227,34	6,88
26	5	6	241,80	265,90	9,97
30	6	4	258,40	267,80	3,64

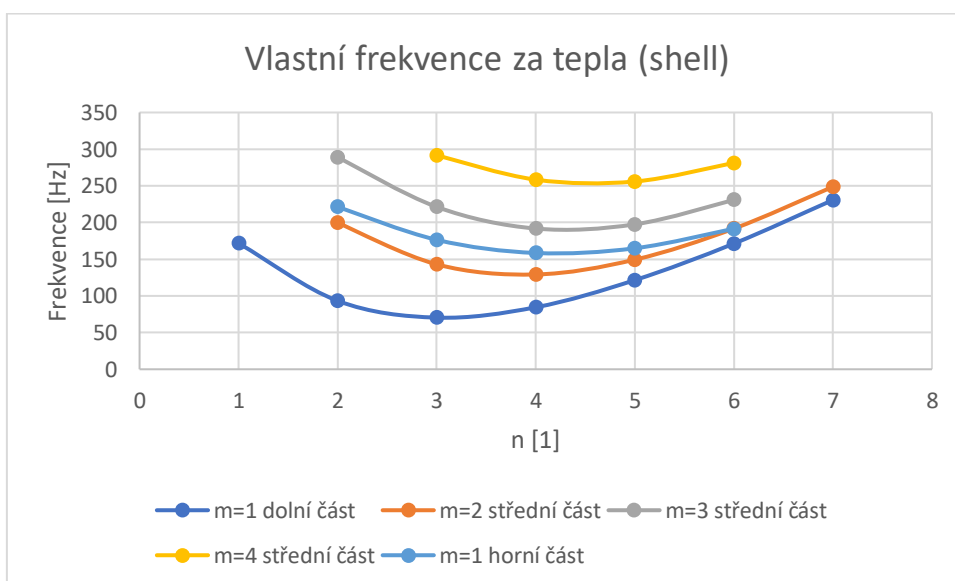
Tabulka 1 Hodnoty vlastních frekvencí modelů s prvky typu solid a shell

Číslo vlastní frekvence dolní /horní část			shell dolní část	shell horní část	solid dolní část	Solid horní část	odchylka dolní část	odchylka horní část
	m	n	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	rozdíl v %	rozdíl v %
i								
11	1	1	171,70	/	167,10	/	-2,68	/
3/19	1	2	93,30	221,40	87,20	257,70	-6,54	16,40
1/12	1	3	70,40	176,40	72,70	205,40	3,27	16,44
2/8	1	4	84,50	158,50	96,30	184,60	13,96	16,47
4/9	1	5	121,50	164,90	143,50	193,50	18,11	17,34
10/13	1	6	171,30	191,60	205,20	227,80	19,79	18,89
20	1	7	230,70	/	278,70	/	20,81	/
17	2	2	199,70	/	195,40	/	-2,15	/
6	2	3	143,00	/	139,00	/	-2,80	/
5	2	4	129,20	/	134,30	/	3,95	/
7	2	5	149,40	/	166,00	/	11,11	/
14	2	6	191,70	/	222,00	/	15,81	/
22	2	7	248,70	/	294,70	/	18,50	/
26	3	2	289,10	/	284,70	/	-1,52	/
18	3	3	221,30	/	219,10	/	-0,99	/
15	3	4	191,80	/	193,47	/	0,87	/
16	3	5	197,50	/	208,40	/	5,52	/
21	3	6	230,90	/	254,30	/	10,13	/
27	4	3	291,70	/	289,70	/	-0,69	/
24	4	4	258,40	/	258,60	/	0,08	/
23	4	5	255,90	/	263,10	/	2,81	/
25	4	6	281,30	/	299,20	/	6,36	/

*Tabulka 2 Hodnoty vlastních frekvencí modelů s prvky typu solid a shell pro chod za tepla*



Obrázek 15 : Graf závislosti vlastních frekvencí na hodnotách  $m$  a  $n$  při použití prvků shell za stavu za studena.



Obrázek 16 : Graf závislosti vlastních frekvencí na hodnotách  $m$  a  $n$  při použití prvků shell za stavu za tepla.

#### **6.1.4 Shrnutí výsledků srovnání prvků solid a shell**

Výsledky z výpočtu, provedeného na modelu s prvky solid, budou považovány za správné, protože model byl vytvořen přesně podle výkresové dokumentace a také u něj nedošlo k žádným zjednodušením. Dalším důvodem je velký počet prvků, který byl modelu s prvky solid přidělen díky tomu jsou výsledky výpočtu přesnější. Z hodnot v tabulce je vidět, že odchylka výsledků při použití prvků typu shell a prvků typu solid roste s rostoucí hodnotou  $n$ . Pro nižší hodnoty  $n$  je odchylka zanedbatelná. Při vyšších hodnotách  $n$  je potřeba zahrnout do výsledků i procentuální odchylku. Chybějící hodnoty v tabulce (Tabulka 2) přesahující hodnotu 300 Hz. Vyšší frekvence nejsou zkoumány, protože budící frekvence čerpadla nedosahují tak vysokých hodnot.

## **7 Výpočet vlastních frekvencí ve vodním prostředí metodou konečných prvků.**

Prostředí vnáší do výpočtu vlastních frekvencí tlumící složku závislou na rychlosti posuvu. Z tohoto předpokladu vyplývá, že výsledné vlastní frekvence, tlumené vodním prostředím, by měly být nižší než vlastní frekvence neovlivněné prostředím.

Jak již bylo řečeno ve čtvrté kapitole bude kmitání řešeno metodou acoustic-shell interaction. Tato metoda dovoluje simulovat změny tlaku prostředí v závislosti na pohybu pevného tělesa. Pohyb tělesa je dán tvarem vlastních kmitů. Akustický tlak prostředí vytváří odpor proti tomuto pohybu a simuluje tak reálný odpor kapaliny. V předchozí kapitole bylo ověřeno, že je možné použít prvky typu shell s nutným uvažováním procentuální odchylky. Pro ověření, zda mají rozměry prostředí vliv na velikost tlumení, budou provedeny dva výpočty s různými rozměry vodního prostředí.

## 7.1 Geometrie modelu

Celkový model tělesa je zjednodušen na válcovou skořepinu s eliptickým dnem. Válcová skořepina je rozdělena na čtyři části různých délek o stejném průměru a stejné tloušťce. Toto rozdělení je zavedeno kvůli přiřazování rozdílných materiálových vlastností. Pro zjednodušení výpočtu nebyly perforace pláště, dna a desky vytvořeny na modelu. Jejich vliv na modální vlastnosti byl reprezentován sníženými hodnotami hustoty a modulu pružnosti. Výpočty těchto redukovaných hodnot jsou uvedeny v další podkapitole.

Dno je modelováno jako elipsoid s poloosami  $a = 1\,810\text{ mm}$

$b = 1\,810\text{ mm}$   $c = 1\,100\text{ mm}$ . Válcové skořepiny mají všechny shodný průměr  $d = 3\,620\text{ mm}$ .



Oblasti představující prostředí budou modelovány pro dva případy. První případ představuje reálný objem kapaliny, která obklopuje nosný válec. Průměr válce reprezentujícího prostředí je 3 878 mm. Tento rozměr odpovídá vnitřnímu průměru tlakové nádoby. Model nosného válce je 160 mm nad dolním krajem prostředí. Vrchní část oblasti prostředí je souběžná s vrchní částí nosného válce. Druhý případ představuje nosný válec umístěný v nádobě o nekonečném objemu. Kvůli tomu, že prostředí je také rozděleno na konečný počet prvků není možné modelovat nekonečný objem prostředí. Rozměry válce, představujícího prostředí, jsou zvoleny tak, aby byli maximální, ale aby bylo možné výpočet provést. Výsledný průměr válce představujícího prostředí je 25 000 mm a výška je 50 000 mm. Model nosného válce byl umístěn do centra válce představujícího vodní prostředí.

## **7.2 Redukce materiálových vlastností**

Pro zjednodušení výpočtu jsou perforace pláště, dna a desky nahrazeny sníženou hodnotou modulu pružnosti a hustoty. Toto zjednodušení je zavedeno kvůli vysoké složitosti modelování v programu Comsol. Výpočet těchto redukováných hodnot byl proveden na základě rozdílného objemu. Korekční koeficient je podílem objemu části komponenty bez perforace a s perforací. Toto zjednodušení je převzato z ruské normy PNAE G 7-002-86.

Pro horní část pláště, kde je perforace vytvořená pro odvod média z reaktoru byl korekční koeficient vypočten rovnicí (15). Objem pláště

bez perforací byl vypočten vztahem (16) a objem, který představují perforace vztahem (17).

$$k_{plaste} = \frac{V_{bezperf}}{V_{sperfor}} = \frac{V_{bezperfor}}{V_{bezperfor} - V_{der}} \quad (15)$$

$$V_{bezperfor} = S_{mezikruz} \cdot h_{perfor} = \frac{\pi \cdot (d_{out} - d_{in})^2}{4} \cdot h_{perfor} \quad (16)$$

$$V_{der} = S_{der} \cdot t_{plaste} = \frac{\pi \cdot d_{der}^2}{4} \cdot n \cdot t_{plaste} \quad (17)$$

Kde:

$k_{plaste}$  – korekční koeficient pláště

$V_{bezperforace}$  – objem části pláště bez perforace

$V_{der}$  – objem děr v plášti

$S_{mezikruz}$  – obsah mezikruží pláště

$h_{perforace}$  – výška oblasti s perforací

$d_{out}$  – vnější průměr pláště

$d_{in}$  – vnitřní průměr pláště

$S_{der}$  – plocha děr

$t_{plaste}$  – tlouška stěny pláště

$d_{der}$  – průměr děr

$n$  – počet děr

Hodnota koeficientu při uvažování  $d_{out} = 3620$  mm;

$d_{in} = 3500$  mm ;  $d_{der} = 180$  mm  $n = 280$  ;  $t_{plaste} = 65$  mm

vychází 0,621.

Redukovaný modul pružnosti a hustotu určíme ze vztahů (18) a (19).

$$E_{red} = k_{plaste} \cdot E_{ocel} \quad (18)$$

$$\rho_{red} = k_{plaste} \cdot \rho_{ocel} \quad (19)$$

Hodnoty redukovaného modulu pružnosti a hustoty při uvažování

$E_{aust.ocel} = 210000$  MPa a  $\rho_{aust.ocel} = 7850$  kgm<sup>-3</sup> vychází

$E_{redplast} = 130476,9$  MPa ;  $\rho_{redplast} = 4877,4$  kgm<sup>-3</sup>

Podobně je určen koeficient pro desku, ve které jsou otvory pro uložení palivových souborů. Jeho hodnota vychází  $k_{desky} = 0,255$  a hodnoty modulu pružnosti a hustoty

$E_{reddeska} = 53476$  MPa ;  $\rho_{reddeska} = 1999$  kgm<sup>-3</sup>

Stejně je i určen koeficient pro oblast eliptického dna. Hodnota koeficientu vychází  $k_{dna} = 0,872$  a hodnoty modulu pružnosti a hustoty  $E_{reddna} = 175234,6 \text{ MPa}$  a  $\rho_{reddna} = 6844 \text{ kgm}^{-3}$ .

Přehledný zápis materiálových parametrů je uveden v tabulce 3

	neredukované	plášť	deska	eliptické dno
koeficient [1]	1	0,621	0,255	0,872
hustota [ $\text{kgm}^{-3}$ ]	7850	4877,4	1999	6844
E [MPa]	210000	130476,9	53476	175234,6

*Tabulka 3 Hodnoty materiálových vlastností*

### 7.3 Okrajové podmínky

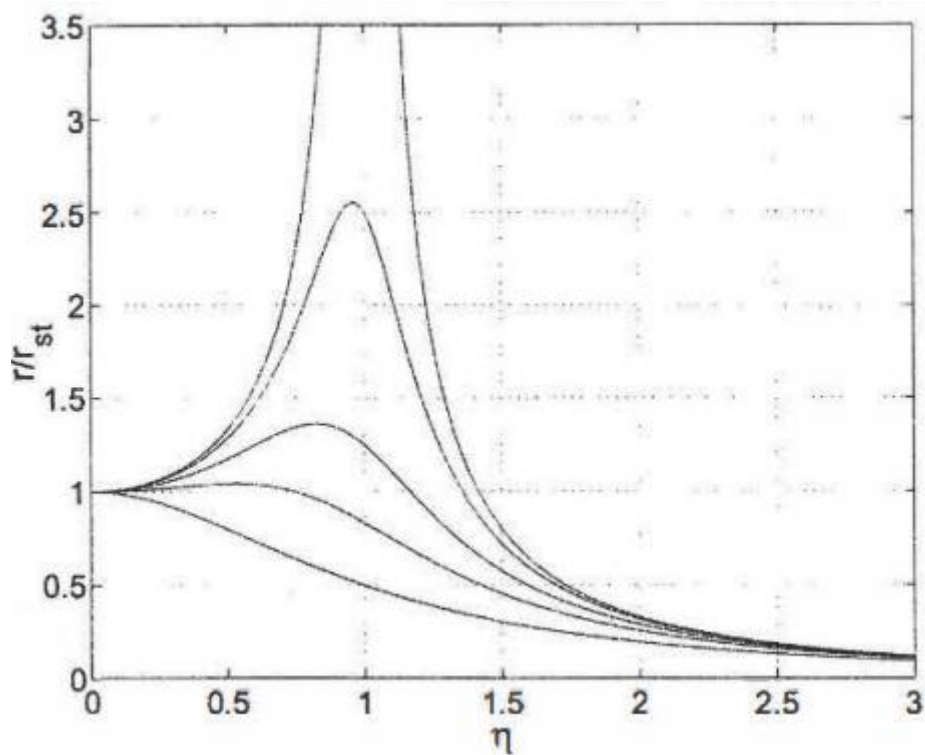
Stejně jako v páté kapitole budou provedeny dva výpočty. První výpočet bude pro stav za studena, kdy nedochází k dolehnutí těsnícího nákrůžku na nosný válec. V takovém případě se tato vazba nerealizuje a nosný válec má kontakt pouze ve spoji pero-drážka a opření horní příruby o plošku tlakové nádoby a víko tlakové nádoby. Spoj pero drážka je reprezentován okrajovou podmínkou, která umožňuje pohyb v radiálním a tangenciálním směru. Opření horní příruby je reprezentováno okrajovou podmínkou, která zabraňuje v pohybu ve směru všech os a rotaci kolem těchto os.

Druhý výpočet zohledňuje dolehnutí nákrůžku na nosný válec. Vzniká tak další vazba, které je zohledněna okrajovou podmínkou,

která nedovoluje součásti v místě styku s nákrůžkem pohyb ani rotaci ve všech směrech.

## 7.4 Výsledky výpočtu

Hodnoty vlastních frekvencí ve vodním prostředí pro chod za studena jsou zapsány v tabulce (Tabulka 4). Hodnoty  $m$  a  $n$  určují tvar vlastních podélných a příčných kmitů. Podle očekávání jsou hodnoty vlastních frekvencí nižší ve vodním prostředí než hodnoty vlastních frekvencí bez uvažování vlivu prostředí. Toto očekávání bylo založeno na vlivu, který má velikost tlumení na vlastní frekvenci. S rostoucím tlumením klesá amplituda v okolí rezonance a klesá i vlastní frekvence daného tvaru kmitu. Tento trend je zobrazen v grafu (Obrázek 17).  $\eta$  je poměr budící a vlastní frekvence kmitání.



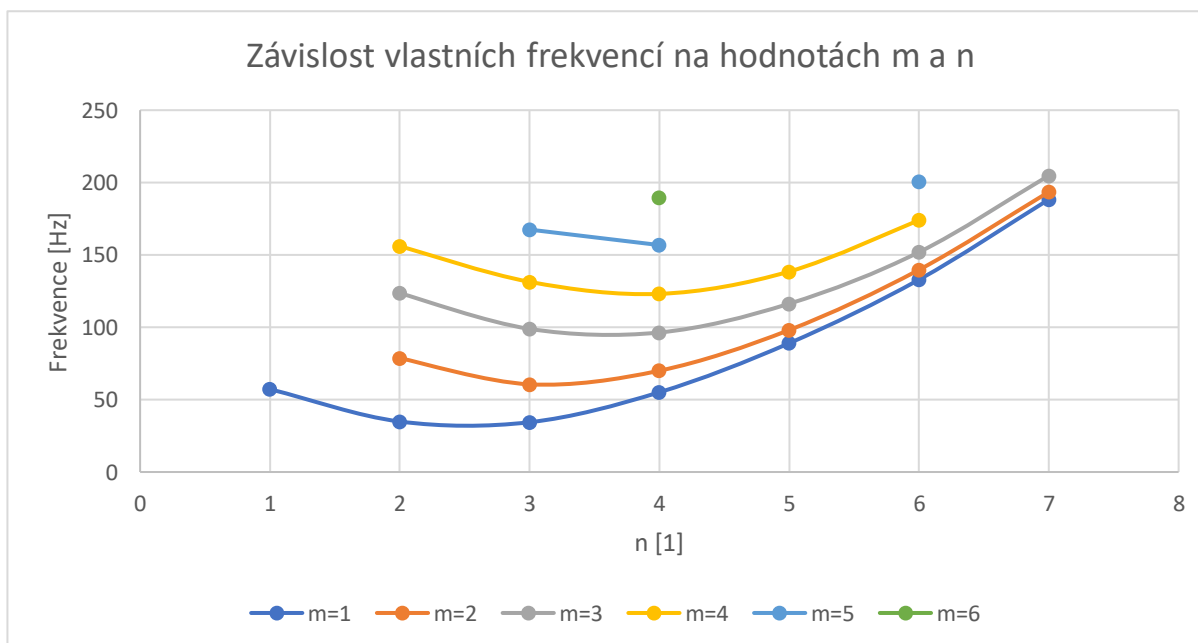
Obrázek 17 : Vliv velikosti tlumení na poměr budící a vlastní frekvence.  
(Stejskal, et al., 2003)

Číslo vlastní frekvence			vlastní frekvence $f_i$	vlastní frekvence redukované $f_{i\text{red}}$
i	m	N	f [Hz]	f [Hz]
3	1	1	60	57,2
1	1	2	36	34,9
2	1	3	39,8	34,4
5	1	4	68,1	55,1
10	1	5	111,7	89
18	1	6	168	132,9
26	1	7	241	188,3
6	2	2	77,5	78,7
4	2	3	63,2	60,6
7	2	4	79,4	70
11	2	5	118	98,1
21	2	6	172	139,7
25	2	7	244	193,5
12	3	2	125	123,6
8	3	3	98	98,9
9	3	4	101	96,4
14	3	5	132	116,3
22	3	6	184	151,9
27	3	7	255	204,8
19	4	2	167	156,1
15	4	3	136	131,4
13	4	4	130	123,1
16	4	5	153	138,5
24	4	6	202	174
20	5	3	173	167,5
17	5	4	162	156,8
25	5	6	223	200,8
23	6	4	197	189,8

Tabulka 4 Tabulka výsledků pro stav za studena

V šesté kapitole byly určeny odchylky hodnot vlastních frekvencí modelu s prvky shell. Pokud tyto odchylky zohledníme ve výsledcích modální analýzy ve vodním prostředí vztahem (20), dostáváme hodnoty vlastních frekvencí, které jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 4). Průběh frekvencí na hodnotách  $m$  a  $n$  ve vodním prostředí pro stav za studena je vidět v grafu (Obrázek 18).

$$f_{i\ red} = f_i - f_i \frac{\text{odchylka v \%}}{100} \quad (20)$$



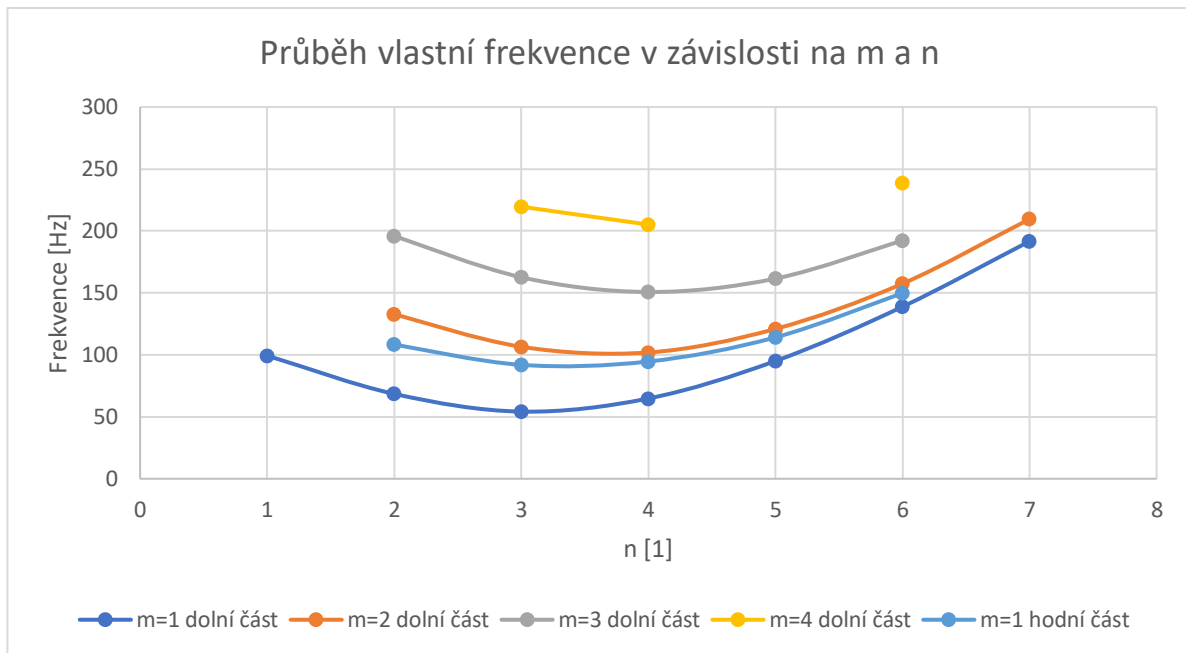
Obrázek 18 : Průběh frekvencí na hodnotě  $m$  a  $n$  ve vodním prostředí za studena.



Výsledky výpočtu pro stav za tepla, při kterém se realizuje vazba s těsnícím nákrůžkem jsou zapsány v tabulce (Tabulka 5). Vlivem rozdělení nosného válce na dvě pomyslné části dochází k vlastnímu kmitání v horní a dolní části odděleně. Také dochází k celkovému zpevnění komponenty a tím k zvýšení hodnot vlastních frekvencí. Hodnoty vlastních frekvencí jsou opět podle očekávání nižší při uvažování vodního prostředí než při výpočtu bez vlivu prostředí. V následující tabulce jsou zapsány hodnoty vlastních kmitů pro daný tvar, který je určen hodnotami  $m$  a  $n$ . Tabulka (Tabulka 5) obsahuje hodnoty s uvažováním odchyly  $i$  bez ní. Odchylyka je zohledněna vztahem (20). Chybějící hodnoty v tabulce jsou mimo zkoumanou oblast vlastních frekvencí, která je od 0 do 300 Hz. V grafu (Obrázek 19) jsou vidět průběhy vlastních frekvencí na hodnotách  $m$  a  $n$  pro stav za tepla s uvažováním odchylyky.

Číslo vlastní frekvence			shell střední část	shell horní část	shell střední část redukce	shell horní část redukce
	m	N	$f_i$	$f_i$	$f_{ired}$	$f_{ired}$
i			f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]
4	1	1	96,7	/	99,29156	/
2/10	1	2	64,3	129,6	68,50522	108,3456
1/7	1	3	56	110	54,1688	91,916
3/8	1	4	75,3	113,2	64,78812	94,55596
9/13	1	5	116	138	94,9924	114,0708
17/18	1	6	173	184,7	138,7633	149,8102
24	1	7	242	/	191,6398	/
11	2	2	130	/	132,795	/
5	2	3	103,6	/	106,5008	/
6	2	4	106,1	/	101,90905	/
12	2	5	136	/	120,8904	/
19	2	6	187	/	157,4353	/
26	2	7	257	/	209,455	/
20	3	2	193	/	195,9336	/
16	3	3	161	/	162,5939	/
14	3	4	152	/	150,6776	/
15	3	5	170,9	/	161,46632	/
22	3	6	214	/	192,3218	/
23	4	3	218	/	219,5042	/
21	4	4	205,3	/	205,13576	/
	4	5	/	/	/	/
25	4	6	255	/	238,782	/

Tabulka 5 Tabulka výsledků pro stav za tepla



Obrázek 19 : Průběh frekvencí na hodnotě m a n ve vodním prostředí za studena s uvažováním odchylky.

Výsledky z výpočtů pro dvě prostředí různých velikostí jsou zapsány v tabulce (Tabulka 6). Z výsledků v tabulce je vidět, že hodnoty jsou sodné pro oba případy. Z toho vyplývá, že velikost tlumení prostředí není závislá na jeho velikosti.

číslo vlastní frekvence			vlastní frekvence s reálným objemem vody	vlastní frekvence s nekonečným objemem vody
i	m	n	f [Hz]	f [Hz]
3	1	1	60	60
1	1	2	36	36
2	1	3	39,8	39,6
5	1	4	68,1	68
10	1	5	111,7	111,5
18	1	6	168	168,3
26	1	7	241	241,1
6	2	2	77,5	77
4	2	3	63,2	63
7	2	4	79,4	79,7
11	2	5	118	118,1
21	2	6	172	172
25	2	7	244	244,2
12	3	2	125	125,9
8	3	3	98	98
9	3	4	101	100,6
14	3	5	132	131,9
22	3	6	184	184,2
27	3	7	255	254,9
19	4	2	167	167
15	4	3	136	136,2
13	4	4	130	130
16	4	5	153	153,1
24	4	6	202	202
20	5	3	173	172,8
17	5	4	162	162,1
25	5	6	223	223
23	6	4	197	196,9

*Tabulka 6 Tabulka výsledků pro různé rozměry prostředí*

Tuto úvahu by měly potvrdit výsledky z experimentálního měření, které je popsáno v následující kapitole.

## **8 Návrh experimentu pro potvrzení správnosti vypočtených výsledků metodou konečných prvků**

Pro potvrzení správnosti výsledků vypočtených v 7. kapitole byl navržen experiment, který by poskytl srovnávací data. Cílem experimentu je určení vlastních frekvencí předem definovaných vzorků. Vzorky by byly umístěny do nádrže, ve které probíhá měření bez vlivu prostředí a ve vodním prostředí. Pro vzorky by byly vytvořeny i výpočetní modely se shodnými materiálovými vlastnostmi a okrajovými podmínkami, které co nejdříve odpovídají reálnému uchycení vzorků. Pro měření byly vybrány dva vzorky. Prvním je deska, na které by mělo být měření technicky méně náročné a výsledky z tohoto měření by poskytovaly prvotní hodnoty pro porovnání s výpočtem. Druhým vzorkem je tenkostěnná válcová nádoba, která svou geometrií více odpovídá nosnému válci. Důkaz o správnosti výsledků výpočtu získaný na válcovém vzorku je více relevantní pro posouzení správnosti výsledků výpočtu frekvencí nosného válce.

## 8.1 Geometrie a materiálové vlastnosti vzorků

Navrhovaný poměr délky, šířky a tloušťky desky je 100:50:1. Malá tloušťka desky byla zvolena z důvodu lepší pozorovatelnosti vlastních tvarů kmitů díky nižší tuhosti desky. Rozměry válcové nádoby byly navrženy tak, aby v rozumném poměru odpovídaly rozměrům skutečného nosného válce, a aby bylo měření proveditelné v laboratorních podmínkách. Materiál vzorků není přesně specifikován, podmínkou je pouze znalost hustoty materiálu, modulu pružnosti a Poissonova čísla, což jsou nezbytné vstupní parametry pro výpočet.

## 8.2 Průběh měření

Na vzorek by byly připevněny akcelerometry. Pozice akcelerometrů měla být zvolena tak, aby bylo možné měřit zrychlení v místech, kde by byla předpokládána maximální výchylka při daném vlastním tvaru kmitání. Další možností by mohlo být bezdotykové měření pomocí laserové aparatury. Vzorek měl být buzen prostřednictvím budícího zařízení s nastavitelnou budící frekvencí. Díky tomu bychom mohli proměřit široké spektrum frekvencí. Po proměření frekvencí bez vlivu prostředí by byla nádrž napuštěna vodou a probíhalo by další měření vlastních frekvencí tentokrát ovlivněných tlumením prostředí. Měření ve vodním prostředí by bylo z hlediska provedení složitější, kvůli

spojení budícího zařízení se vzorkem a nutnosti zaizolovat přilepené akcelerometry.

### **8.3 Zpracování výsledků**

Naměřené hodnoty vlastních frekvencí obou vzorků v obou prostředích měly být porovnány s hodnotami získanými výpočtem metodou konečných prvků. Porovnáním výsledků bychom zjistili, zda vypočtené hodnoty odpovídají realitě, nebo by bylo nutné upravit výpočet tak, aby jeho výsledky více korespondovaly s naměřenými daty.

## 9 Závěr

Seznámení s fungováním jaderné elektrárny je podrobně rozvedeno v třetí kapitole. Jsou tu také vysvětleny základní pojmy a je také popsáno rozdělení bloku jaderné elektrárny pro lepší představu fungování těchto zařízení.

Čtvrtá kapitola popisuje specifika a výlučnosti, které má jaderný reaktor VVER 1000 a představuje jednotlivé komponenty tohoto typu reaktoru.

V páté kapitole je popsán základ metody konečných prvků, která je použita pro výpočet vlastních frekvencí. V páté kapitole je také popsán použitý výpočtový model vhodný pro simulaci odporových sil působících při kmitání ve vodním prostředí. Výpočtový model se nazývá acoustic-shell interaction a umožňuje simulovat působení akustického tlaku média na pohybující se těleso.

Další část diplomové práce se zabývá použitím prvků typu shell pro modelování nosného válce. Byly vypočteny procentuální odchylky hodnot vlastních frekvencí při použití prvků typu shell od hodnot vlastních frekvencí při použití prvků solid, které odpovídají více realitě a jsou proto brány jako referenční.

V poslední části diplomové práce byl proveden výpočet vlastních frekvencí nosného válce s uvažováním vlivu tlumení vodního prostředí. Hodnoty byly podle očekávání nižší než hodnoty bez vlivu prostředí. Do výsledků byly zahrnuty i odchylky vypočtené v páté kapitole. Byly simulovány stavy za tepla a za studena



Pro potvrzení správnosti výsledků bylo plánováno experimentální měření. Cílem měření by bylo ověřit správnost výsledků získaných výpočtem. Detaily experimentu jsou rozepsány v osmé kapitole diplomové práce. Bohužel, z důvodu četných omezení souvisejících s celosvětovou pandemií COVID-19, nebylo možné tento experiment provést.

## 10 Citovaná literatura

Abaqus, nedatováno *About shell elements*. [Online]

Available at: [abaqus-](https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-shelloverview.htm)

[docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-shelloverview.htm](https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-shelloverview.htm)

[Přístup získán 3 srpen 2020].

Abaqus, nedatováno *Three-dimensional solid element library*. [Online]

Available at: [https://abaqus-](https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-r-3delem.htm)

[docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-r-3delem.htm](https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-r-3delem.htm)

[Přístup získán 3 srpen 2020].

Adam, K., 2019. *Český statistický úřad*. [Online]

Available at: <https://www.czso.cz/csu/xb/vyroba-a-spotreba-elektricke-energie-v-jihomoravskem-kraji-v-roce-2019>

[Přístup získán 3 srpen 2020].

Comsol, nedatováno *The Acoustic-Shell Interaction, Transient Interface*.

[Online]

Available at:

[https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.aco/aco\\_ug\\_acousticstructure.07.10.html](https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.aco/aco_ug_acousticstructure.07.10.html)

[Přístup získán 3 srpen 2020].

ČEZ, 2008. *Primární část JE VVER 1000 Díl I*, Brno: autor neznámý

ČEZ, 2016. *Svět energie*. [Online]

Available at: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/typy-reaktoru>

[Přístup získán 3 srpen 2020].

Doležal, J. a další, 2011. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké technické učení v Praze.

Křenek, V., nedatováno *Teorie vlhkého vzduchu*, Plzeň: autor neznámý

Michalec, J. & a kolektiv, 1998. *Pružnost pevnost I*. Praha: Český vysoké učení technické v Praze.

Nikishov, G., 2004. *Introduction to the finite element method*. Aizu-Wakamatsu: University of Aizu.

Stejskal, V., Bauma, V. & Vampola, T., 2003. *Kmitání mechanických soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

Švrček, M., 2015. *Modelování a výpočtové zhodnocení vlivu nelineárních vazeb modelu jaderného reaktoru VVER-1000*. Husinec-Řež: Ústav jaderného výzkumu Řež a.s..

Švrček, M., 2016. *Spolehlivost reaktoru VVER 1000 s ohledem na poškození vlivem nízkocyklové únavy*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.

Švrček, M., 2018. *Hodnocení únavového poškození tlakové nádoby reaktoru a vnitřních částí reaktoru EDU a ETE*, Husinec -Řež: Ústav jaderného výzkumu Řež.

Zeman, V. & Hlaváč, Z., 2018. *Analýza vlivů vůlí a třecí charakteristiky ve vazbách per a drážek nosného válce reaktoru VVER-1000*. Husinec-Řež: autor neznámý