



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# **ANALÝZA MODÁLNÍCH VLASTNOSTÍ VERTIKÁLNÍHO SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU**

ANALYSIS OF VERTICAL SYNCHRONOUS GENERATOR MODAL PROPERTIES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. MILAN KORNHERR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. DANIEL DUŠEK, Ph.D.**

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Milan Kornherr

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Analýza modálních vlastností vertikálního synchronního generátoru**

v anglickém jazyce:

### **Analysis of vertical synchronous generator modal properties**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Synchronní generátor je stroj pro přeměnu mechanické energie na energii elektrickou. Důležitou vlastností každého stroje jsou jeho modální parametry, které významně rozhodují o namáhání a o hlučnosti stroje.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je určení vlivu jednotlivých částí vertikálního synchronního generátoru na jeho modální vlastnosti. Analyzován bude především vliv kostry generátoru, rotoru generátoru, uložení generátoru atd..

Seznam odborné literatury:

Slavík, J., Stejskal, V., Zeman, V., Základy dynamiky strojů, ČVUT Praha, Praha, 1997.

Kratochvíl, C., Slavík, J., Dynamika, VUT Brno, Brno, 1997.

ANSYS, ANSYS reference manual

Vedoucí diplomové práce: Ing. Daniel Dušek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

### **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá analýzou modálních vlastností synchronního vertikálního generátoru. Cílem práce je určení vlivu jednotlivých částí generátoru na modální vlastnosti. Analyzována je kostra generátoru, rotor a celý generátor. Další část práce se zabývá analýzou různých variant uložení generátoru a také konstrukčních úprav, které vedou ke zlepšení modálních vlastností. Výpočtové modelování bylo provedeno v programu ANSYS.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

Modální analýza, synchronní generátor, vlastní frekvence, kritické otáčky.

### **ABSTRAKT**

This Master's thesis deals with the analysis of modal characteristics of the vertical synchronous generator. The goal of this work is to determine influence of individual parts of the generator on modal characteristics. Another part of this thesis contains analysis of different variants for storing the generator and also structural modifications, which lead to the improvement of the modal properties. For modelation was used computational modeling in ANSYS.

### **KEY WORDS**

Modal analysis, synchronous generator, natural frequency, critical speed.

---



**CITACE**

KORNHERR, M. *Analýza modálních vlastností vertikálního synchronního generátoru.*

Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s.

Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Dušek, Ph.D.

---



**ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s pomocí svého vedoucího práce, literatury a dokumentů, které mi byly poskytnuty.

V Brně dne: 22.5.2012

.....

podpis

---



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji Ing. Danielu Duškovi, Ph.D za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

---



**Obsah**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÚVOD.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>1. CÍLE PRÁCE.....</b>                               | <b>11</b> |
| <b>2. TEORETICKÝ ZÁKLAD .....</b>                       | <b>11</b> |
| 2.1. VYMEZENÍ POJMŮ .....                               | 11        |
| 2.2. MKP .....  | 12        |
| 2.3. POUŽITÉ PRVKY VE VÝPOČTU .....                     | 14        |
| <b>3. MODÁLNÍ ANALÝZA.....</b>                          | <b>17</b> |
| 3.1. MODÁLNÍ ANALÝZA STATORU .....                      | 17        |
| 3.2. MODÁLNÍ ANALÝZA ROTORU GENERÁTORU .....            | 25        |
| 3.3. MODÁLNÍ ANALÝZA ROTORU A KOSTRY GENERÁTORU .....   | 32        |
| 3.4. MODÁLNÍ ANALÝZA STATORU S PODPĚRAMI.....           | 40        |
| 3.5. MODÁLNÍ ANALÝZA STATORU S ROTOREM S PODPĚRAMI..... | 47        |
| <b>4. KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY .....</b>                      | <b>55</b> |
| 4.1. MODÁLNÍ ANALÝZA UPRAVENÉHO STATORU .....           | 55        |
| 4.2. MODÁLNÍ ANALÝZA UPRAVENÉHO STATORU S ROTOREM ..... | 58        |
| <b>5. ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ .....</b>                    | <b>62</b> |
| <b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>               | <b>64</b> |

## ÚVOD

Každý stroj, než bude zařazen do provozu, musí splňovat určitá kritéria a musí projít mnoha zkouškami. Pokud v nějaké zkoušce neobstojí, musí být upraven nebo vytvořen nový, který bude vyhovovat. Tento postup je velice nákladný a časově náročný. V dnešní době, s rozvojem počítačové techniky, jsou použity softwary na bázi numerických metod, zejména metoda konečných prvků (MKP). Tato metoda usnadňuje návrh a vývoj nových a posouzení stávajících technických objektů. Důležité vlastnosti každého stroje jsou jeho modální parametry, které významně rozhodují o namáhání a o hlučnosti stroje.

V této práci bude analyzován vertikální synchronní generátor a posouzen vliv jeho částí na jeho modální vlastnosti. Výstupem analýzy modálních vlastností jsou vlastní frekvence a jejich příslušné vlastní tvary. Z těchto vlastností lze určit, která část generátoru bude nejvíce namáhána při chodu. Nejprve bude provedena analýza kostry generátoru, rotoru generátoru a následně celého generátoru. V další části budou analyzovány různé varianty uložení generátoru. V poslední části bude proveden konstrukční návrh k vylepšení modálních vlastností.

Řešení těchto problémů bude provedeno metodou konečných prvků a k tomu bude využit software ANSYS.

## 1. CÍLE PRÁCE

V této práci bude prováděna modální analýza synchronního generátoru. To znamená, že bude analyzována kostra generátoru (statoru) a rotující část generátoru (rotoru). V další části práce bude spojen stator s rotorem dohromady a bude provedena analýza této soustavy.

Při experimentálním zkoušení ve zkušebně není možné generátor ukotvit přímo za přírubu, protože z dolního ložiska vystupuje hřídel od rotoru. K dispozici jsou ocelové podpěry v počtu 4, 6 a 8 kusů, na které se generátor připevní. Modální analýza bude provedena pro samotný stator a celý generátor (stator a rotor) a budou porovnány modální vlastnosti podle počtu podpěr a jejich variant natočení.

Podmínkou pro spolehlivý chod generátoru je, aby provozní otáčky nebyly blízko kritickým a to minimálně o 10%. Tato podmínka není normou stanovena a konstruktér sám při návrhu rozhodne o bezpečné hodnotě. V praxi se nejčastěji používá hodnota 10%. Pokud podmínka nebude splněna, budou vytvořeny konstrukční úpravy generátoru a bude provedena nová modální analýza.

Všechny výpočty modálních vlastností budou realizovány pomocí softwaru ANSYS v13.

## 2. TEORETICKÝ ZÁKLAD

### 2.1. VYMEZENÍ POJMŮ

#### 2.1.1. SYNCHRONNÍ GENERÁTOR

Generátor je elektrické zařízení, které slouží k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Mechanická energie v našem případě představuje rotující rotor generátoru, který je poháněn hnacím zařízením. Pro synchronní stroje je charakteristické, že mají stejné (synchronní) otáčky rotoru a magnetického pole statoru.[1]

#### 2.1.2. POPIS FUNKCE

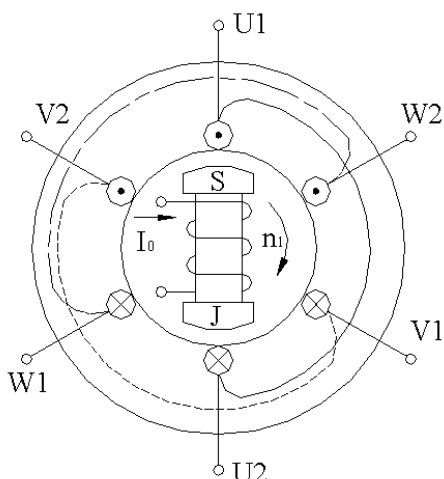
V drážkách statoru je umístěno trojfázové vinutí kotvy. Budící vinutí je uloženo na rotoru. Pro jednoduchost je v dalším výkladu popsána funkce klasického uspořádání: trojfázové vinutí kotvy a dvoupólové buzení na rotoru. Vinutí na kotvě pro každou fázi je souměrné a vzájemné posunutí cívek U, V a W je  $120^\circ$ . Magnetické pole se vytvoří ve vzduchové mezeře, pokud prochází v budící cívce stejnosměrný proud  $I_0$ . Jestliže je rotor otáčen otáčkami  $n_1$ , pak i magnetické pole je otáčeno stejnými otáčkami a v cívkách vinutí kotvy jsou indukována harmonická napětí. Obrázek 2.1 odpovídá maximálnímu napětí na cívce U. Po otočení rotoru o  $120^\circ$  bude maximální napětí na cívce V a po otočení o  $240^\circ$  bude

maximální napětí na cívce W (obr. 2.2). Mezi dvěma sousedícími póly prochází perioda indukovaného napětí. Pro více-pólový rotor bude tedy frekvence [1]:

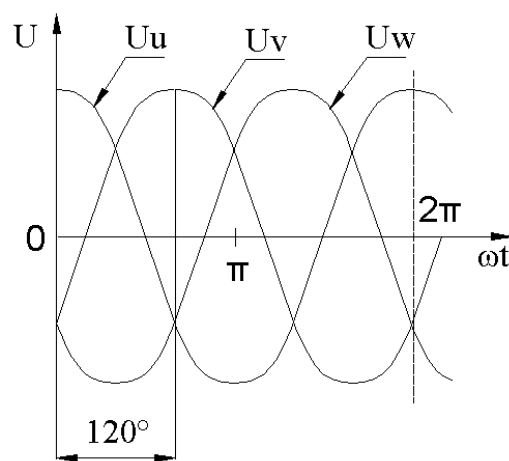
$$f = p \cdot n_1 \quad (2.1)$$

$p$  – počet pólových dvojic

$n_1$  – provozní otáčky



Obr. 2.1 Konstruktivní uspořádání generátoru s jednou pólovou dvojicí [1]



Obr. 2.2 Průběh indukovaných napětí v cívkách kotvy [1]

## 2.2. MKP

MKP je variační metoda, která se může rozdělit do 3 variant přístupů.

1. Silový (neznámé jsou složky tenzoru napětí)
2. Deformační (neznámé jsou funkce posuvů)
3. Smíšený

Jednotlivé přístupy lze mezi sebou kombinovat při řešení různých úloh. Deformační přístup a variační formulace u MKP jednoznačně převládá, proto je nazývána deformační variantou MKP. [2]

### 2.2.1. TEORIE MKP

Základní myšlenka MKP je diskretizace spojitého problému. V případě deformační varianty MKP je východiskem Lagrangeův variační princip, který je formulován následovně: „Mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udělají celkové potenciální energii  $\Pi$  stacionární hodnotu.“ [2]

Stacionární hodnota představuje minimum celkové potenciální energie  $\Pi$

$$\Pi = W - P \quad (2.2)$$

Kde  $W$  je energie napjatosti tělesa  $\Omega$

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma^T \cdot \varepsilon \cdot dV \quad (2.3)$$

a  $P$  je potenciál vnějšího zatížení.

$$P = \int_{\Omega} u^T \cdot o \cdot dV + \int_{\Gamma_p} u^T \cdot p \cdot dS \quad (2.4)$$

V uvedených vztazích vystupují sloupcové matice:

$$\text{posuvů:} \quad u^T = [u, v, w] \quad (2.5)$$

$$\text{přetvoření:} \quad \varepsilon^T = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}] \quad (2.6)$$

$$\text{napětí:} \quad \sigma^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}] \quad (2.7)$$

$$\text{objemové zatížení:} \quad o^T = [o_x, o_y, o_z] \quad (2.8)$$

$$\text{plošné zatížení:} \quad p^T = [p_x, p_y, p_z] \quad (2.9)$$

Celková potenciální energie je obecně závislá na funkcích  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , které jsou spojité. Každá funkce má v řešené oblasti nekonečně mnoho hodnot v nekonečně mnoha bodech. Při numerickém řešení musíme každou funkci vyjádřit v závislosti na parametrech o konečném počtu. V MKP se aproximační funkce posuvů vyjadřují přibližně jako součet předem daných známých funkcí  $\tilde{u}_i$ ,  $\tilde{v}_j$ ,  $\tilde{w}_k$ , označovaných jako bázové funkce. Bázová funkce má jednotkovou hodnotu v bodu, ke kterému se vztahuje a ve všech ostatních má hodnotu 0. Bázové funkce jsou násobeny neznámými koeficienty [2] :

$$u = \sum_{i=1}^l a_i \cdot \tilde{u}_i ; v = \sum_{j=1}^l b_j \cdot \tilde{v}_j ; w = \sum_{k=1}^l c_k \cdot \tilde{w}_k \quad (2.10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \Pi}{\partial a_1} = 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial \Pi}{\partial c_n} = 0 \end{array} \right\} \rightarrow a_1, a_2, \dots, c_n \quad (2.11)$$

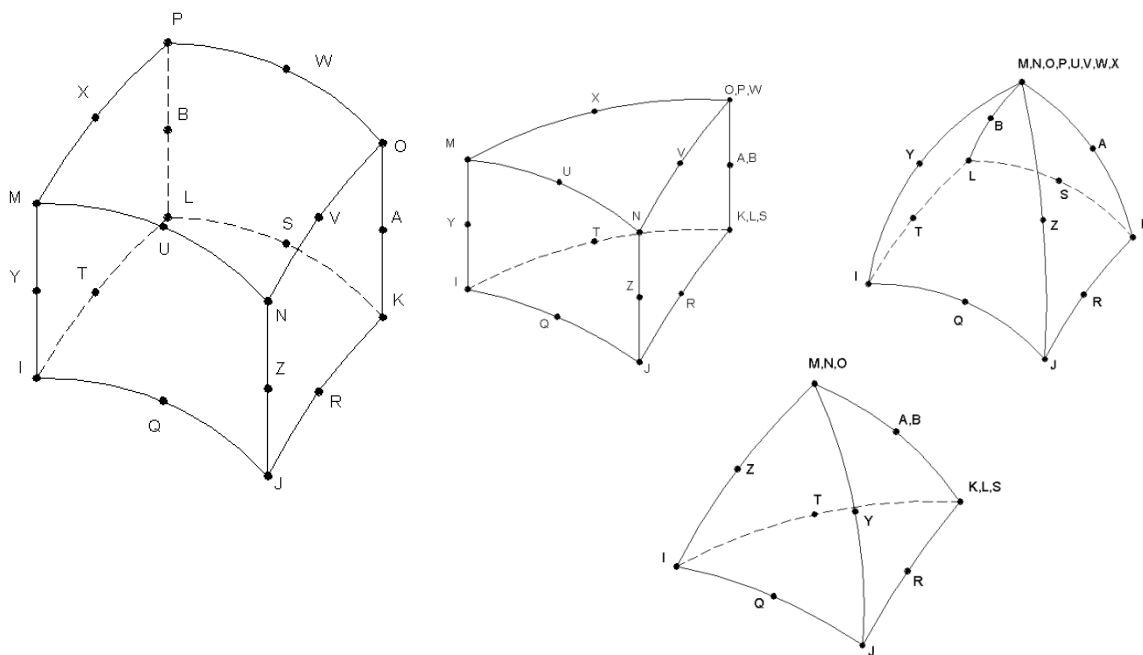
V programech, umožňujících MKP analýzu, je vytvořen nový model geometrie nebo je vložen z jiných CAD systémů. Model geometrie se diskretizuje na určitý počet prvků, které ho vyplňují. Prvky mají různou velikost a různý počet uzlů (vše je uvedeno v kapitole 2.3).

### 2.3. POUŽITÉ PRVKY VE VÝPOČTU

Ve výpočtovém programu ANSYS jsou použity při diskretizaci prvky SOLID 186, SHELL 281, COMBI 214. SOLID 186 je pro objemy prvky, SHELL 281 pro skořepiny a prvek COMBI 214 simuluje uložení hřídele v ložiscích.

### 2.3.1. SOLID 186

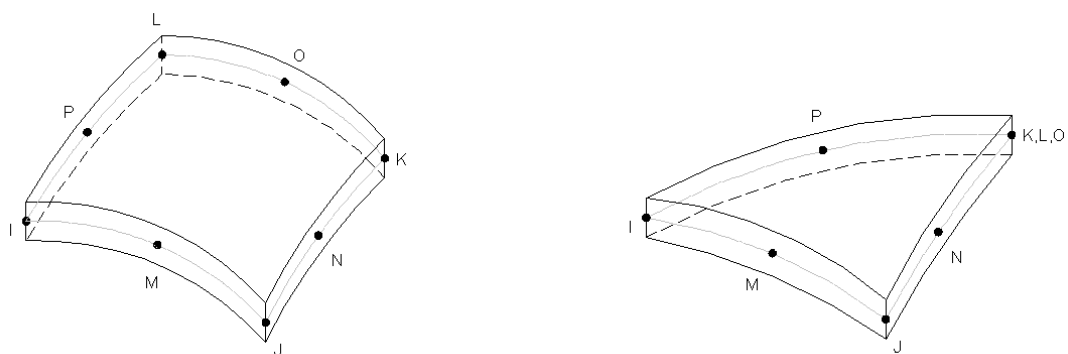
SOLID 186 je kvadratický objemový prvek s dvaceti uzly (I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, A, B). V každém uzlu jsou tři stupně volnosti (posuvy ve směru os  $x, y, z$ ). Pod stejným označením jsou rovněž zahrnuty i degenerované tvary dle obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Kvadratický objemový prvek SOLID 186 a jeho degenerované varianty [3]

### 2.3.2. SHELL 281

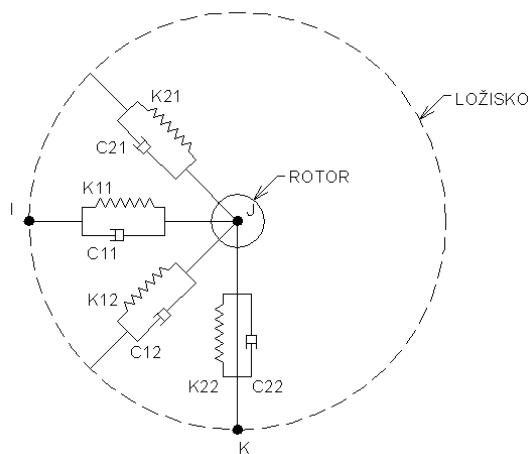
SHELL 281 je skořepinový prvek s osmi uzly (I, J, K, L, M, N, O, P), který má v každém uzlu šest stupňů volnosti (posuvy ve směru os  $x, y, z$  a rotace kolem os  $x, y, z$ ). V případě potřeby se může základní čtyřúhelník modifikovat na trojúhelník (obr. 2.4). Každému prvku SHELL 281 je nutné předepsat tloušťku.



Obr. 2.4 Kvadratický skořepinový prvek SOLID 184 a jeho degenerovaná varianta [3]

### 2.3.3. COMBI 214

COMBI 214 je rovinný prvek, který je zadán dvěma nebo třemi uzly. Třetí uzel (K) se používá pouze při řešení nelineární úlohy. Na obrázku 2.5 je znázorněno zadávání uzlů. Funkcí prvku COMBI 214 je simulace uložení hřídele v ložiscích. Je charakterizován pomocí koeficientů tuhosti a tlumení, které jsou uvedeny v tabulce 2.1. Každé ložisko je jinak velké, proto jsou koeficienty rozdílné. Všechny hodnoty koeficientů byly poskytnuty vedoucím práce.[3]



Obr. 2.5 Schéma prvku COMBI 214 [3]

|             | Dolní ložisko | Horní ložisko |
|-------------|---------------|---------------|
| K11 [N/mm]  | 511878000     | 149710000     |
| K22 [N/mm]  | 1663668000    | 352012000     |
| K12 [N/mm]  | 56553000      | -10710000     |
| K21 [N/mm]  | 1222052000    | 312508000     |
| C11 [Ns/mm] | 8354000       | 2974000       |
| C22 [Ns/mm] | 48097000      | 12408000      |
| C12 [Ns/mm] | 12947000      | 3788000       |
| C21 [Ns/mm] | 13010000      | 3777000       |

Tab. 2.1 Hodnoty koeficientů tuhosti a tlumení pro obě ložiska

### 3. MODÁLNÍ ANALÝZA

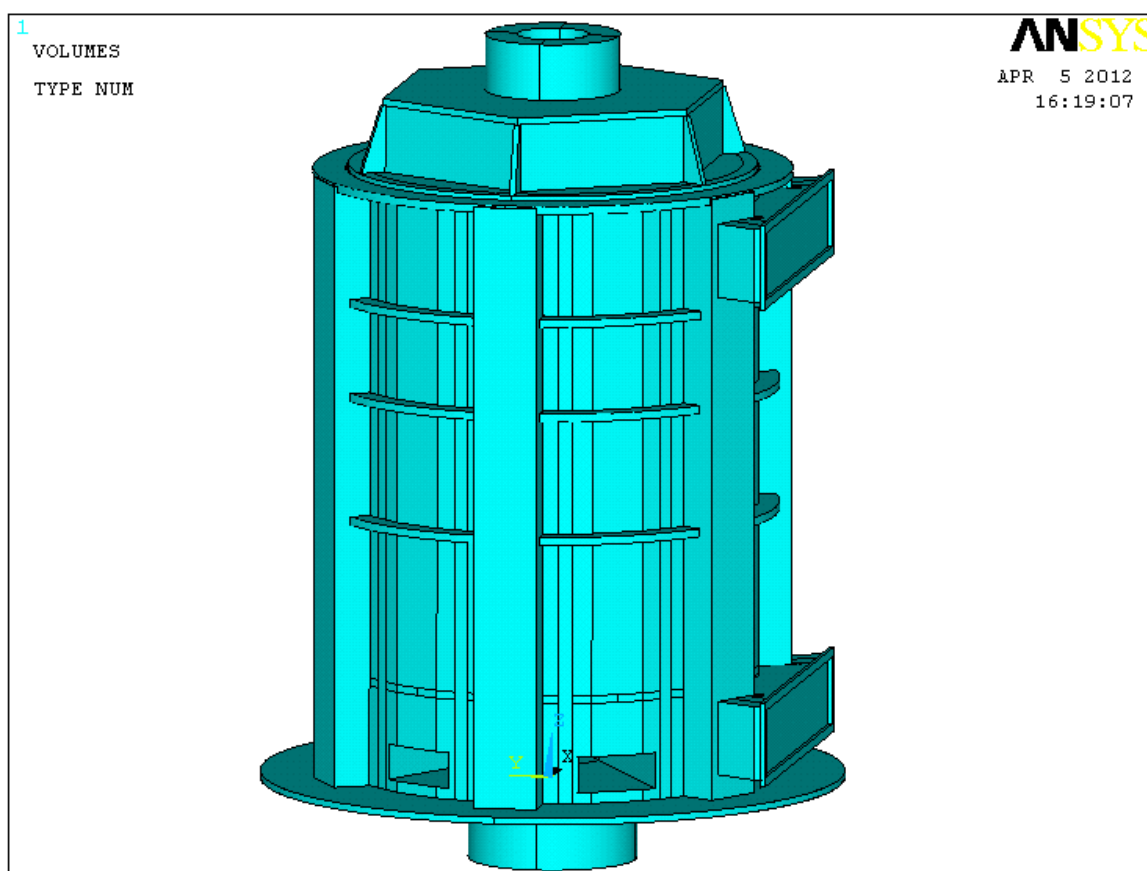
Výstupy z modální analýzy jsou vlastní tvary a vlastní frekvence. Tyto charakteristiky jsou důležité k předejití rezonance a kritickým otáčkám soustavy za provozu. Soustava je v tomto případě tvořena kostrou generátoru (stator) a rotoru. U elektrických strojů platí, že otáčková frekvence a její  $n$ -násobek jsou budící frekvence, kde  $n$  je počet pólů. Analyzovaný synchronní generátor je 14 - pólový s provozními otáčkami 429 ot/min a budící frekvence jsou 7,15 Hz a 100 Hz.

#### 3.1. MODÁLNÍ ANALÝZA STATORU

##### 3.1.1. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

###### 3.1.1.1. MODEL GEOMETRIE

Model geometrie je vytvořen na základě poskytnuté výkresové dokumentace. Ložiska jsou nahrazena válcem, jehož průřezem je mezikružší. Jsou potřebná pouze k přidání hmotnosti do soustavy, proto není důležité, aby byla detailně modelována (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Model geometrie statoru generátoru

### 3.1.1.2. MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Předpokládáno je homogenní, izotropní a lineárně pružné chování materiálu. Generátor a ložiska jsou vyrobeny z oceli. Vinutí je z mědi. Z důvodu zjednodušené geometrie modelu ložisek neodpovídá hmotnost reálného ložiska modelu. Do programu ANSYS je zadána pouze hustota materiálu. Sám si dopočítá hmotnost ze zadané geometrie modelu. Přepočítání hmotnosti reálného ložiska na hustotu modelu ložiska je provedeno následovně:

horní ložisko:

hmotnost na díle:  $m_D = 950 \text{ kg}$

objem modelu:  $V_M = 0,0506 \text{ m}^3$

hustota modelu:

$$\rho = \frac{m_D}{V_M} = \frac{950}{0,0506} = 18\,782 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Stejným způsobem se vypočítá dolní ložisko:

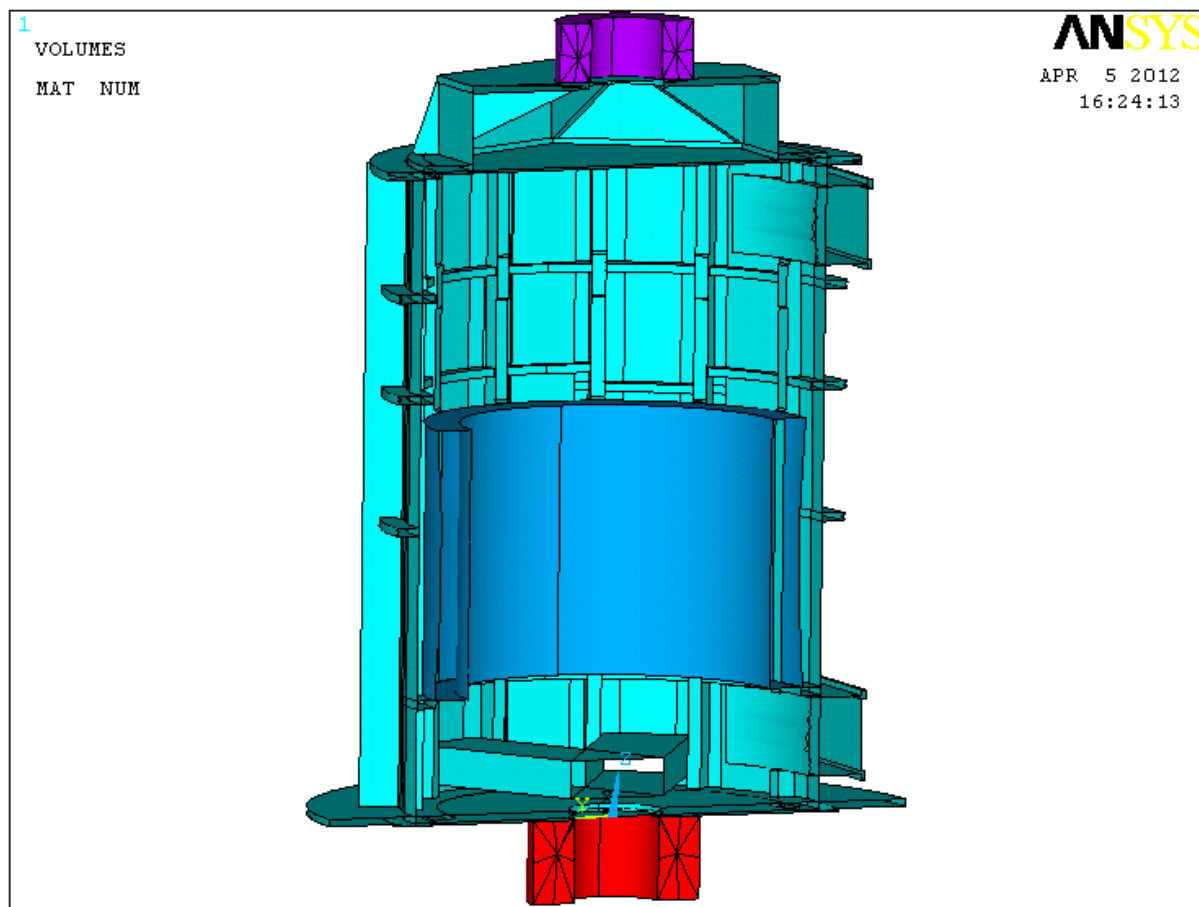
dolní ložisko:

hustota modelu:

$$\rho = 10\,441 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

|                | $\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ | $E \text{ [MPa]}$ | $\mu$ |
|----------------|--|-------------------|-------|
| Horní ložisko  | 18 782   | 160 000           | 0.33  |
| Dolní ložisko  | 10 441   | 210 000           | 0.33  |
| Vinutí statoru | 7500   | 210 000           | 0.33  |

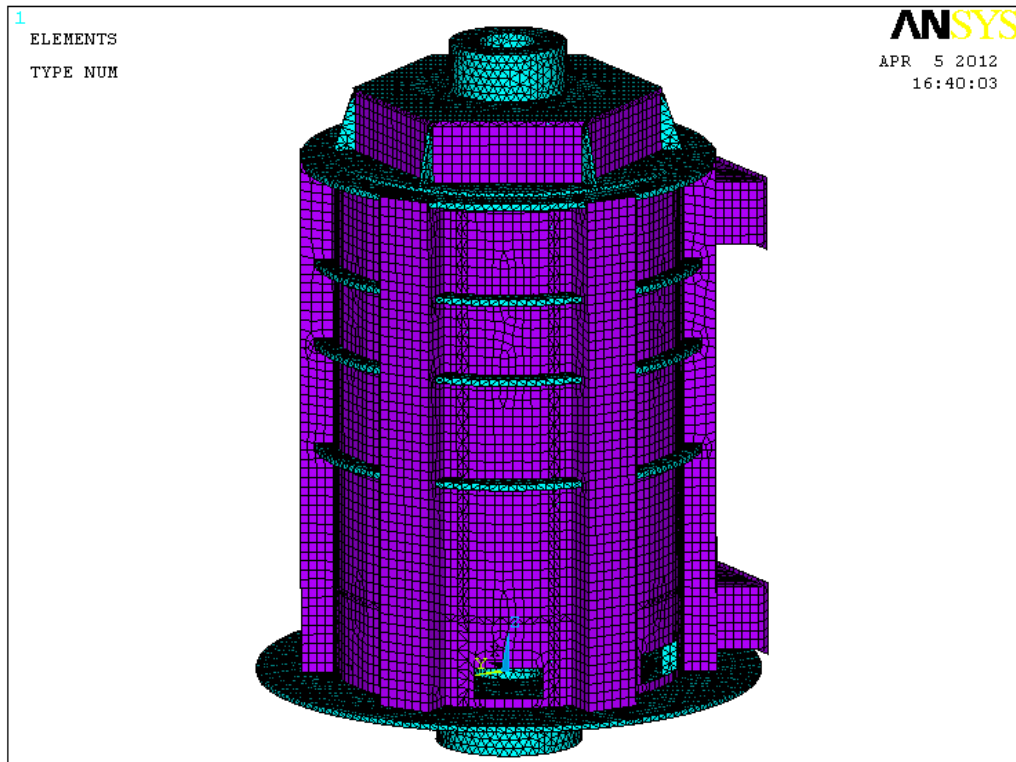
Tab. 3.1 Materiálové vlastnosti částí statoru



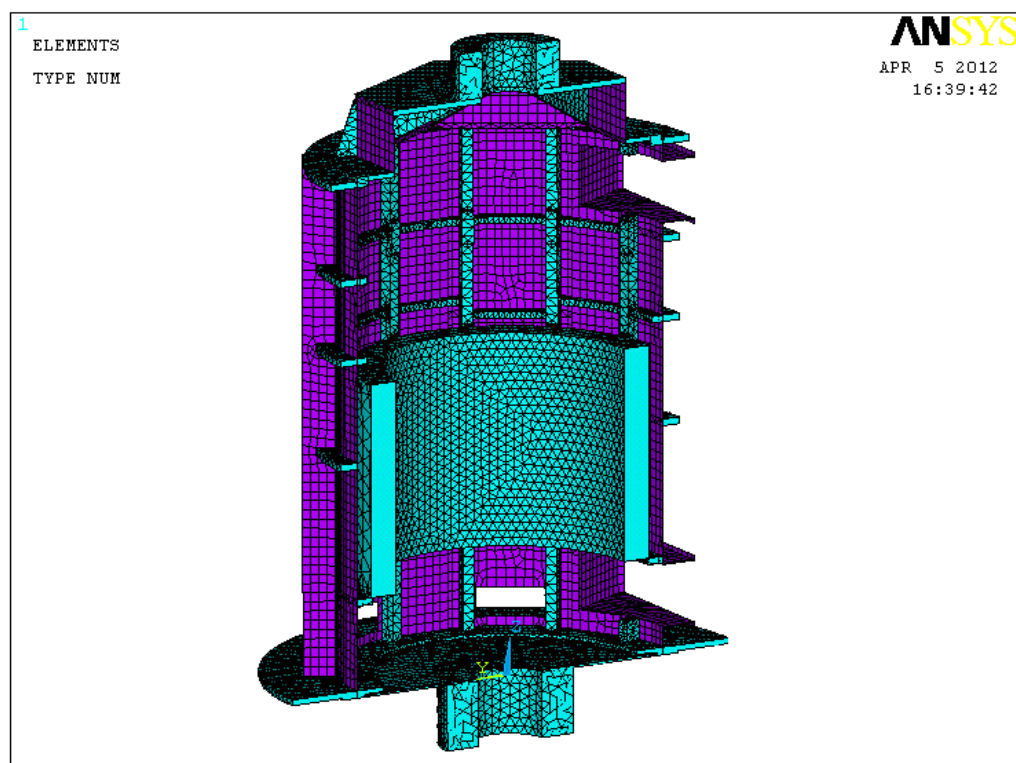
Obr. 3.2 Řez modelem satoru s barevně rozlišenými částmi o jiných materiálových vlastnostech. Červená – spodní ložisko, fialová – horní ložisko, modrá – satorové vinutí

### 3.1.1.3. VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ

Pro objemy s tloušťkou menší než 20 mm jsou použity prvky SHELL 281. U ostatních objemů je použit prvek SOLID 186 (obr. 3.3 a 3.4). Důležitá je stejná hustota sítě u částí generátoru, které chceme analyzovat. Například u ložisek lze použít hrubší síť, protože jejich modální vlastnosti nejsou podstatné.



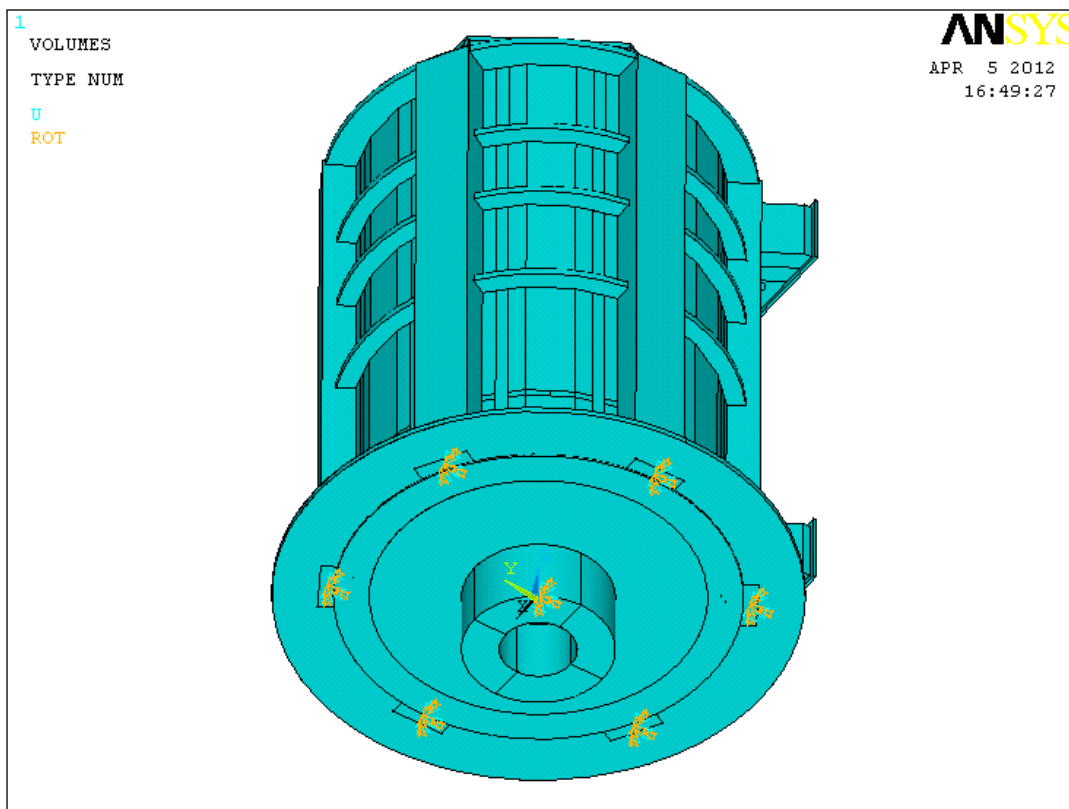
Obr. 3.3 Diskretizovaný model statoru. Fialová – SHEL 281, tyrkysová – SOLID 186



Obr. 3.4 Řez diskretizovaným modelem statoru. Fialová – SHEL 281, tyrkysová – SOLID 186

### 3.1.1.4. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Celý stator je vetknut za přírubu dle obrázku 3.5. V místě vetknutí jsou zamezeny posuvy a natočení ve všech osách.



Obr. 3.5 Model statoru s vyznačeným místem vetknutí

### 3.1.1.5. NASTAVENÍ PARAMETRŮ MODÁLNÍ ANALÝZY

Metoda řešení: Block Lanczos

Počet vlastních tvarů: 12

Frekvenční rozsah: neomezeno

Počáteční frekvence: 1 Hz

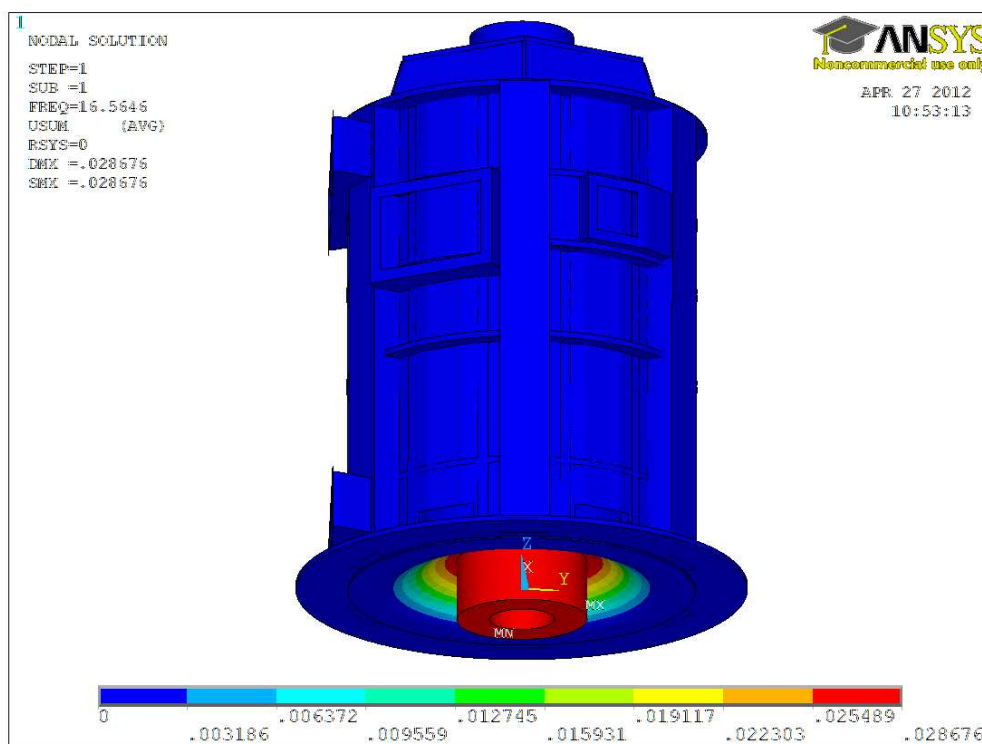
### 3.1.2. VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY STATORU

Výsledné vlastní frekvence statoru jsou zaznamenány v tabulce 3.2 a na obrázcích 3.6 až 3.10 jsou zobrazeny jejich příslušné vlastní tvary.

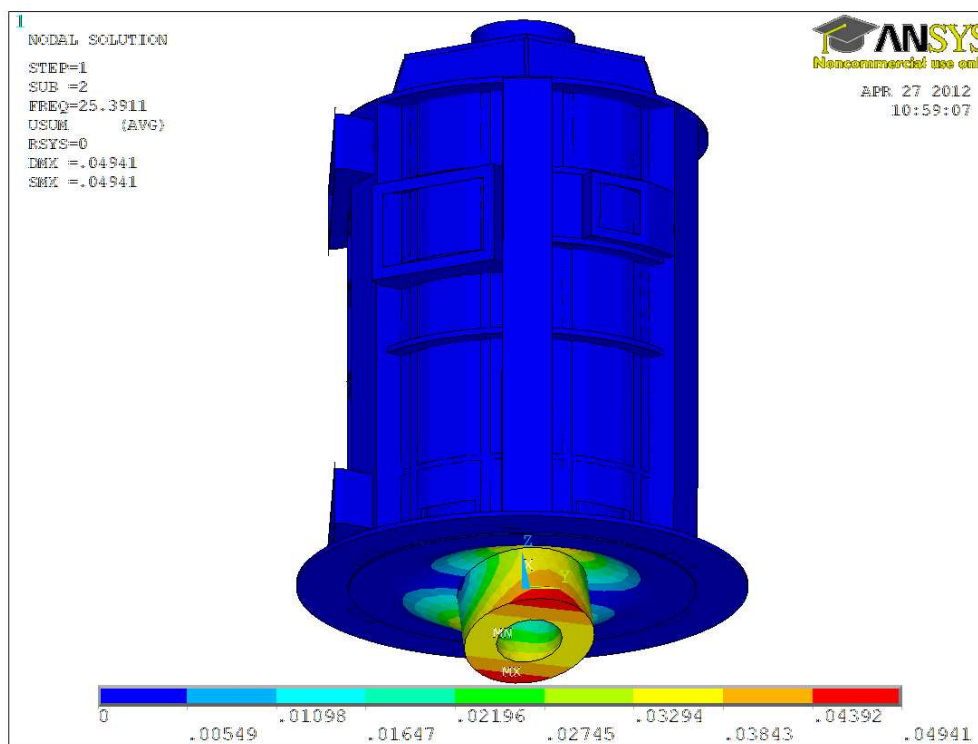
|                 | Vlastní frekvence [Hz] |
|-----------------|------------------------|
| 1. Vlastní tvar | 17                     |
| 2. Vlastní tvar | 25                     |
| 3. Vlastní tvar | 26                     |
| 4. Vlastní tvar | 65                     |
| 5. Vlastní tvar | 66                     |
| 6. Vlastní tvar | 110                    |
| 7. Vlastní tvar | 140                    |

Tab. 3.2 Hodnoty vlastních frekvencí

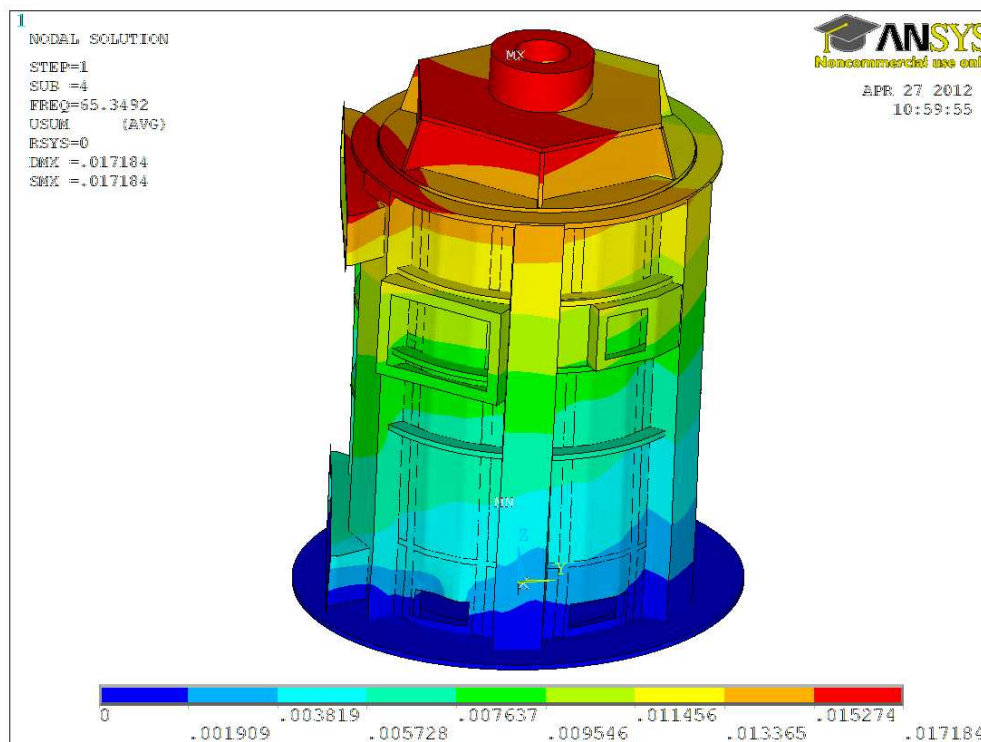
V prvních třech vlastních tvarech kmitá pouze ložisko v přírubě (obr. 3.6 a 3.7). Tyto kmity budou vždy vystupovat z modálních analýz, kde figuruje stator. Ve čtvrtém vlastním tvaru kmitá celý stator příčně v ose y (obr. 3.8). V pátém vlastním tvaru kmitá celý stator v ose x. V šestém vlastním tvaru kmitá stator příčně v ose y a zároveň kmitá torzně v ose z (obr. 3.9). V posledním vykresleném vlastním tvaru (obr. 3.10) kmitají pouze plechy od ventilačního otvoru.



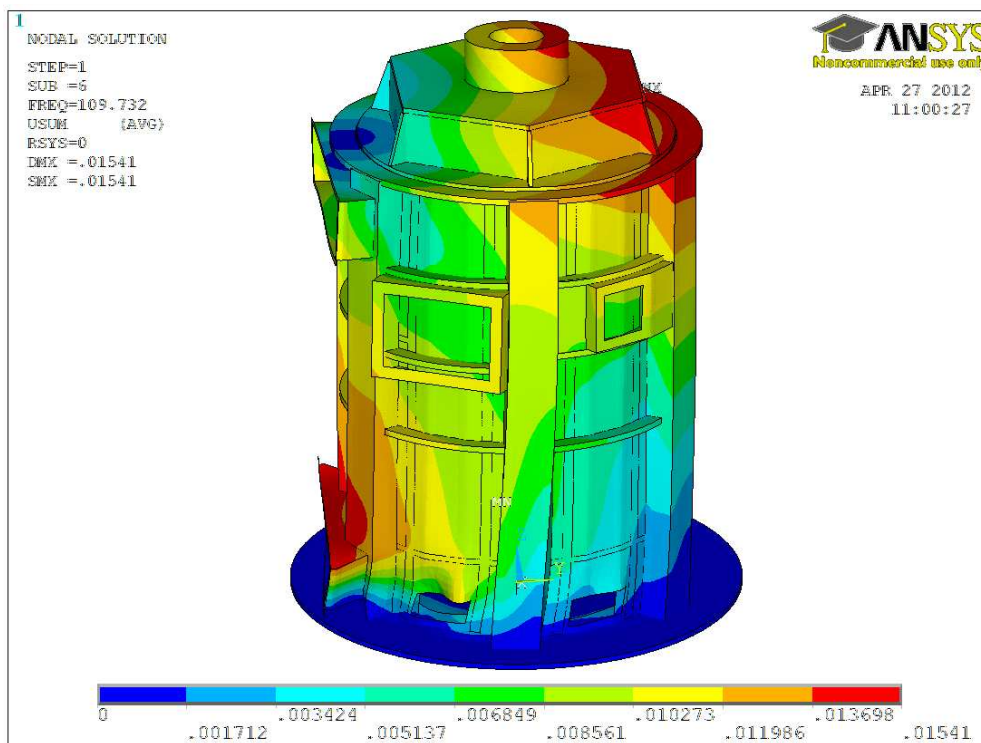
Obr. 3.6 První vlastní tvar kmitání statoru



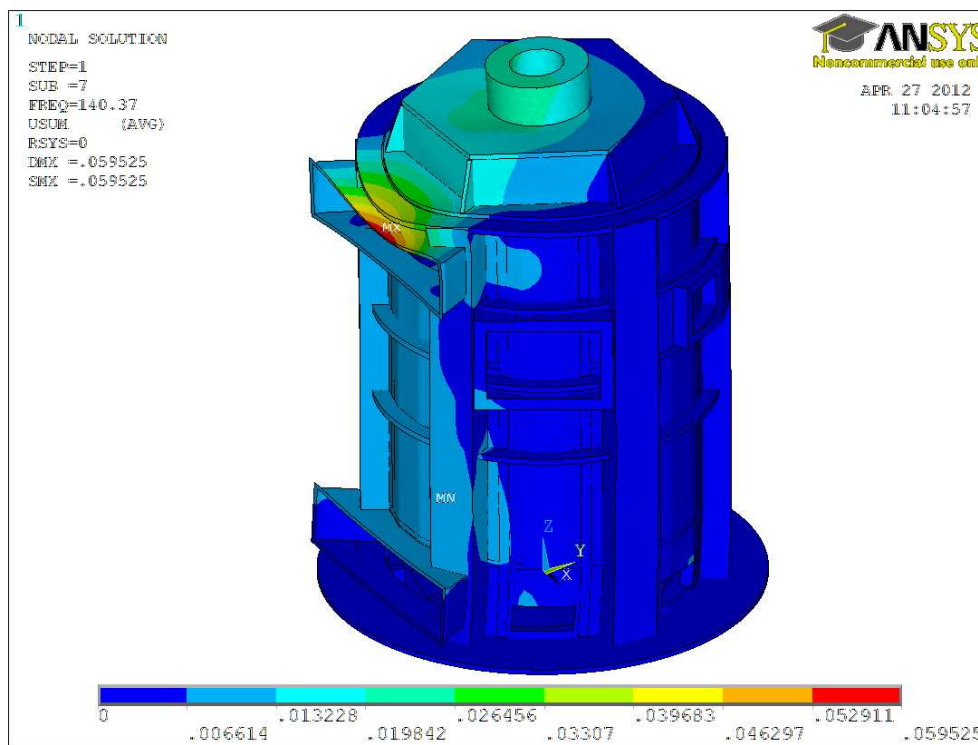
Obr. 3.7 Druhý vlastní tvar kmitání statoru (třetí vlastní tvar je stejný, pouze o 90° pootočen okolo osy z)



Obr. 3.8 Čtvrtý vlastní tvar kmitání statoru (pátý vlastní tvar je stejný, pouze o 90° pootočen okolo osy z)



Obr. 3.9 Šestý vlastní tvar kmitání satoru



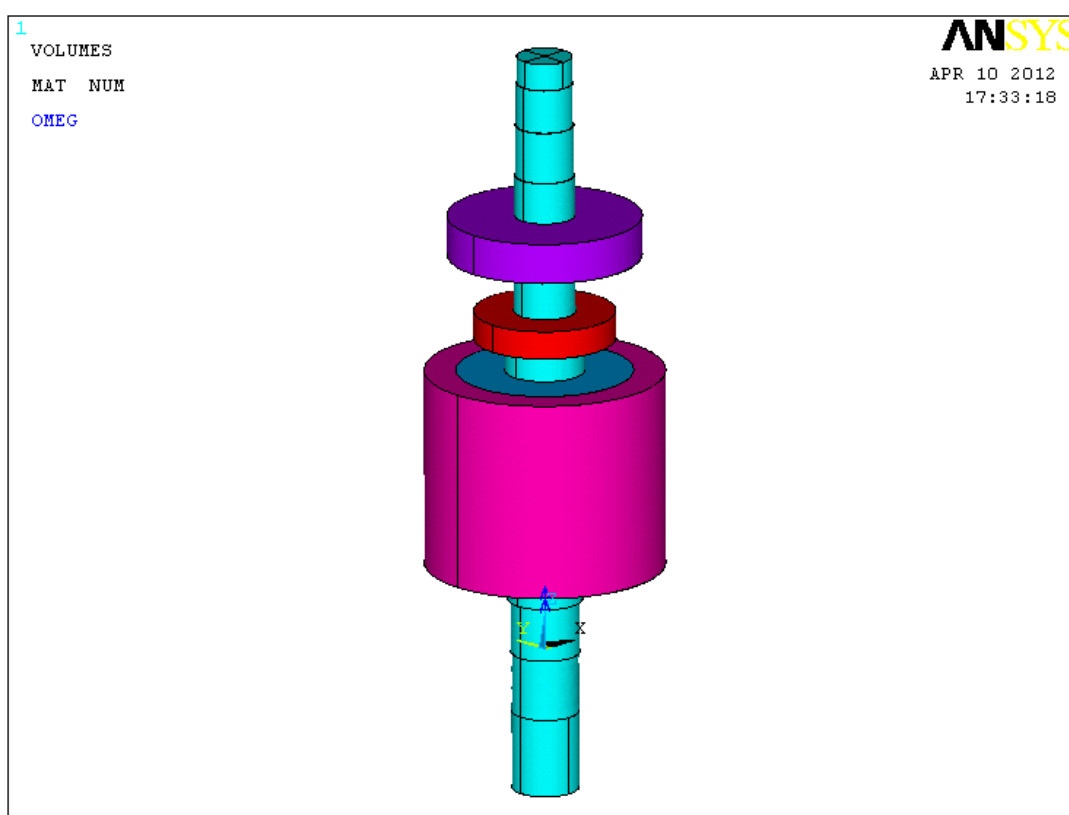
Obr. 3.10 Sedmý vlastní tvar kmitání satoru

## 3.2. MODÁLNÍ ANALÝZA ROTORU GENERÁTORU

### 3.2.1. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

#### 3.2.1.1. MODEL GEOMETRIE

Model geometrie je vytvořen na základě poskytnuté výkresové dokumentace. Rotor generátoru je složen z hřídele, na které jsou umístěny rotorové plechy, rotorové vinutí, budič a ventilátor. Při modelování prvků upevněných na hřídeli je jejich geometrie zjednodušena na válce s průřezem ve tvaru mezikruží (obr. 3.11), protože v programu ANSYS musí být rotační těleso axisymetrické.



Obr. 3.11 Model geometrie rotoru s barevně odlišenými částmi o různých materiálových vlastnostech. Fialová – ventilátor, červená – budič, růžová – rotorové vinutí, modrá – rotorové plechy, tyrkysová – hřídel.

#### 3.2.1.2. MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

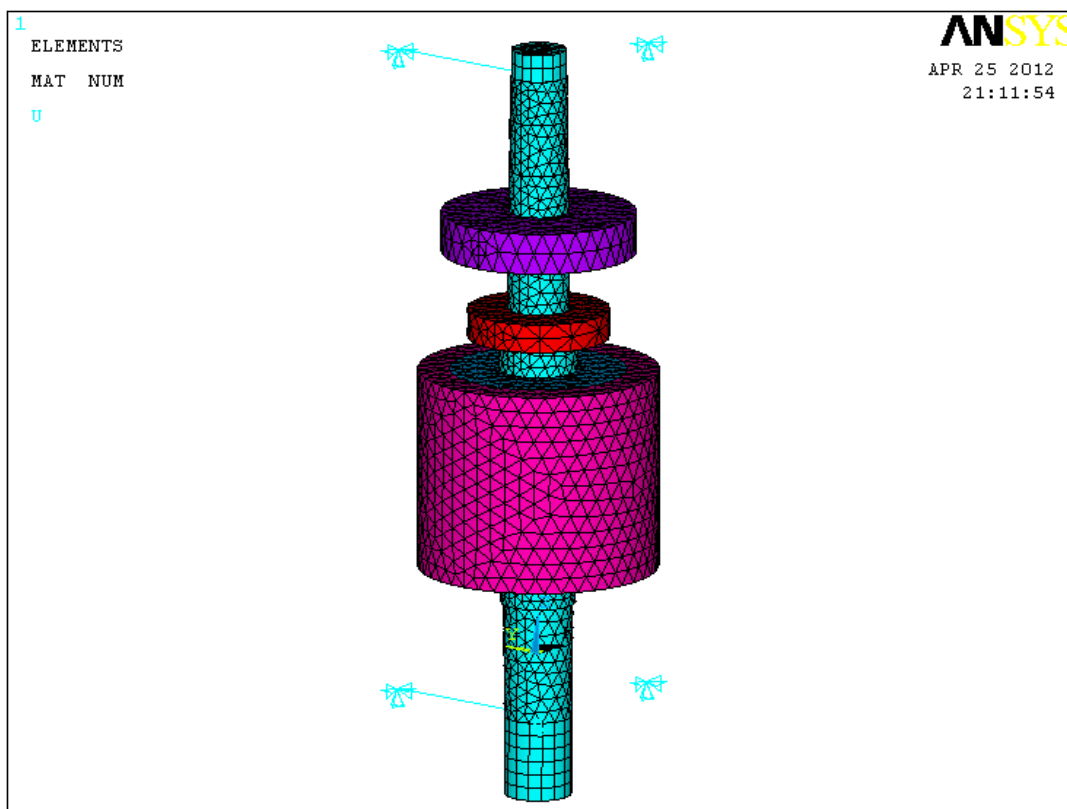
Předpokládáno je homogenní, izotropní a lineárně pružné chování materiálu. Materiálové vlastnosti hřídele a prvků, na ni upevněných, jsou uvedeny v tabulce 3.3. Hustoty prvků jsou převzaty z podobného rotoru, který mi byl poskytnut. Vše je zobrazeno na obrázku 3.11.

|                 | $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ | $E [MPa]$ | $\mu$ |
|-----------------|--------------------------------------|-----------|-------|
| Hřídel          | 7850                                 | 210 000   | 0.33  |
| Ventilátor      | 950                                  | 210 000   | 0.33  |
| Budič           | 8650                                 | 210 000   | 0.33  |
| Rotorové plechy | 1050                                 | 250 00    | 0.33  |
| Rotorové vinutí | 6900                                 | 160 000   | 0.33  |

Tab. 3.3 Materiálové vlastnosti komponent na hřídeli

### 3.2.1.3. VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ

Při diskretizaci je použit objemový prvek SOLID 186 a také prvek COMBI 214, který simuluje uložení hřídele v ložiscích. Oba prvky jsou zobrazeny v obrázku 3.12.



Obr. 3.12 Diskretizovaný model rotoru

### 3.2.1.4. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Ve čtyřech uzlech, kde prvek COMBI 214 simuluje upevnění k ložiskům (obr. 3.12), jsou zabráněny posuvy ve všech třech osách. V místě horního ložiska je vybrán uzel, který má zamezený posuv v ose z.

### 3.2.1.5. NASTAVENÍ PARAMETRŮ MODÁLNÍ ANALÝZY

Metoda řešení: Damp

Počet vlastních tvarů: 12

Frekvenční rozsah: neomezeno

Počáteční frekvence: 1 Hz

### 3.2.2. VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY ROTORU

Výsledné vlastní frekvence rotoru jsou zaznamenány v tabulce 3.5 a na obrázcích 3.13 až 3.18 jsou zobrazeny jejich příslušné vlastní tvary.

|                 | Vlastní frekvence [Hz] |
|-----------------|------------------------|
| 1. Vlastní tvar | 5                      |
| 2. Vlastní tvar | 5,5                    |
| 3. Vlastní tvar | 33                     |
| 4. Vlastní tvar | 35                     |
| 5. Vlastní tvar | 117                    |
| 6. Vlastní tvar | 130                    |

Tab. 3.5 Vlastní frekvence kmitání rotoru

V prvním vlastním tvaru rotor kmitá příčně v ose y, v místě horního ložiska jsou největší výchylky (obr. 3.13).

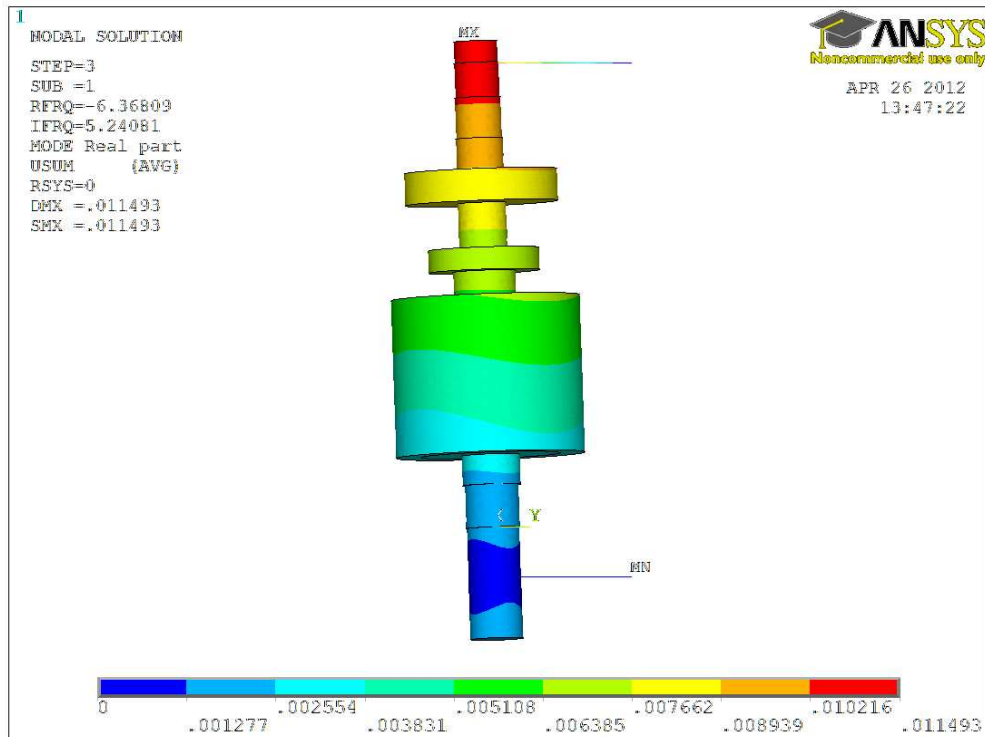
U druhého vlastního tvaru je to naopak, rotor příčně kmitá, ale největší výchylky jsou v místě spodního ložiska (obr. 3.14).

Ve třetím vlastním tvaru v místě ložisek rotor nekmitá. Největší výchylky jsou v prostřední části rotoru v ose x (obr. 3.15).

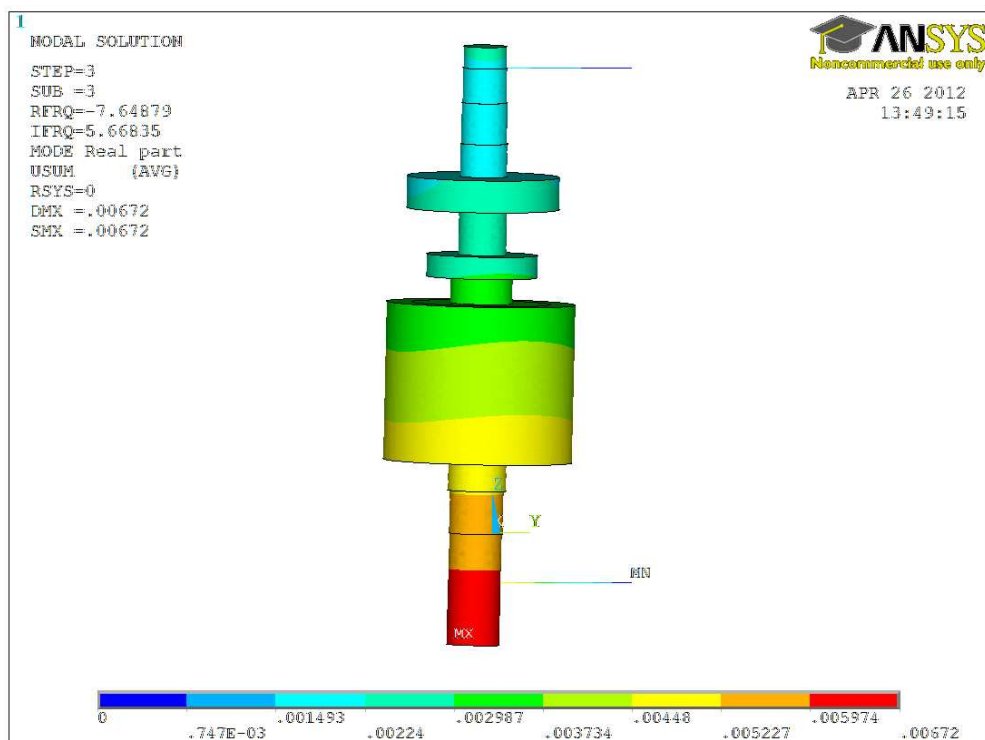
Čtvrtý vlastní tvar kmitání rotoru je stejný jako třetí vlastní tvar, pouze střední část rotoru nekmitá příčně v ose x ale v ose y (obr. 3.16).

Pátý vlastní tvar kmitá podélně v ose z (obr. 3.17).

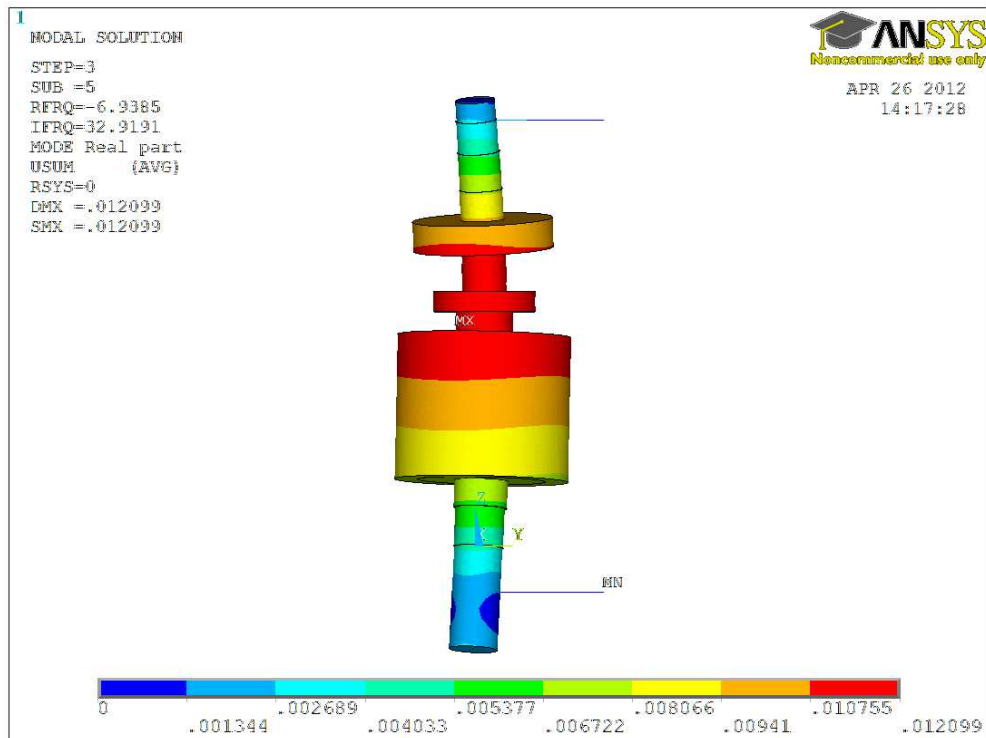
V šestém vlastním tvaru rotor kmitá příčně v ose y. Tvar kmitu odpovídá jedné sinusové vlně se třemi uzlovými body (obr. 3.18).



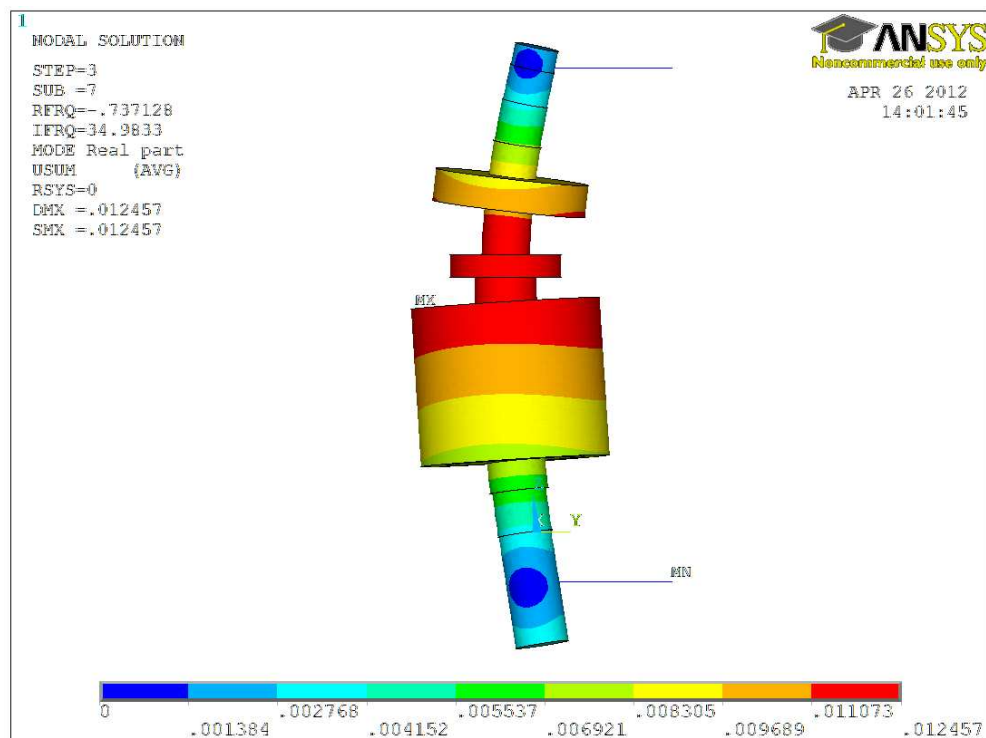
Obr. 3.13 První vlastní tvar kmitání rotoru



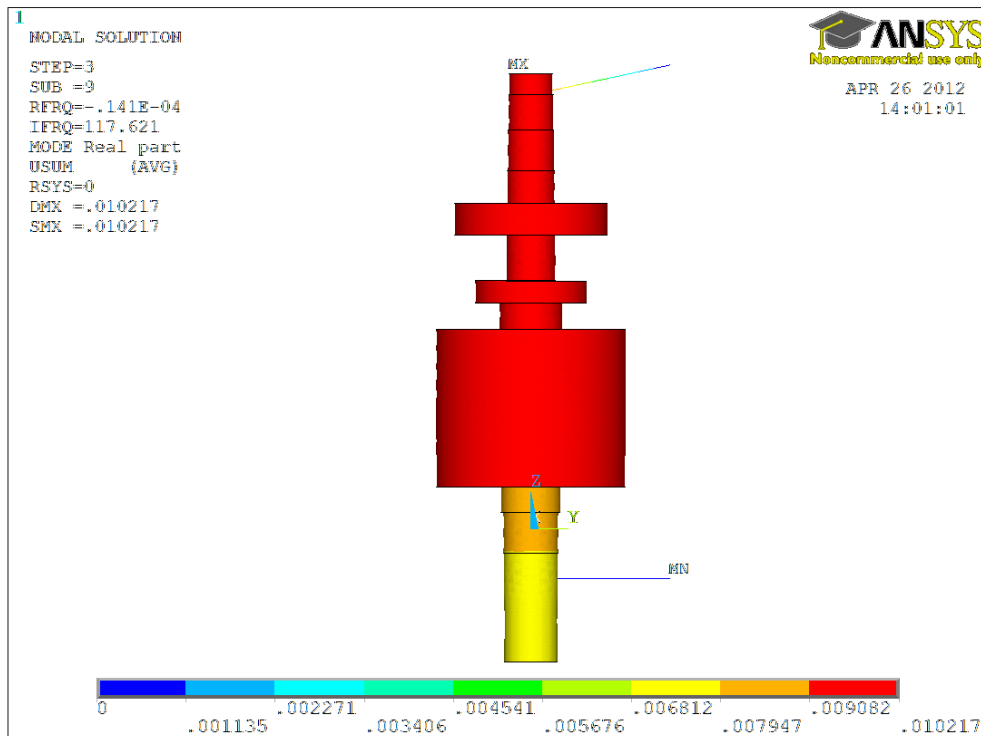
Obr. 3.14 Druhý vlastní tvar kmitání rotoru



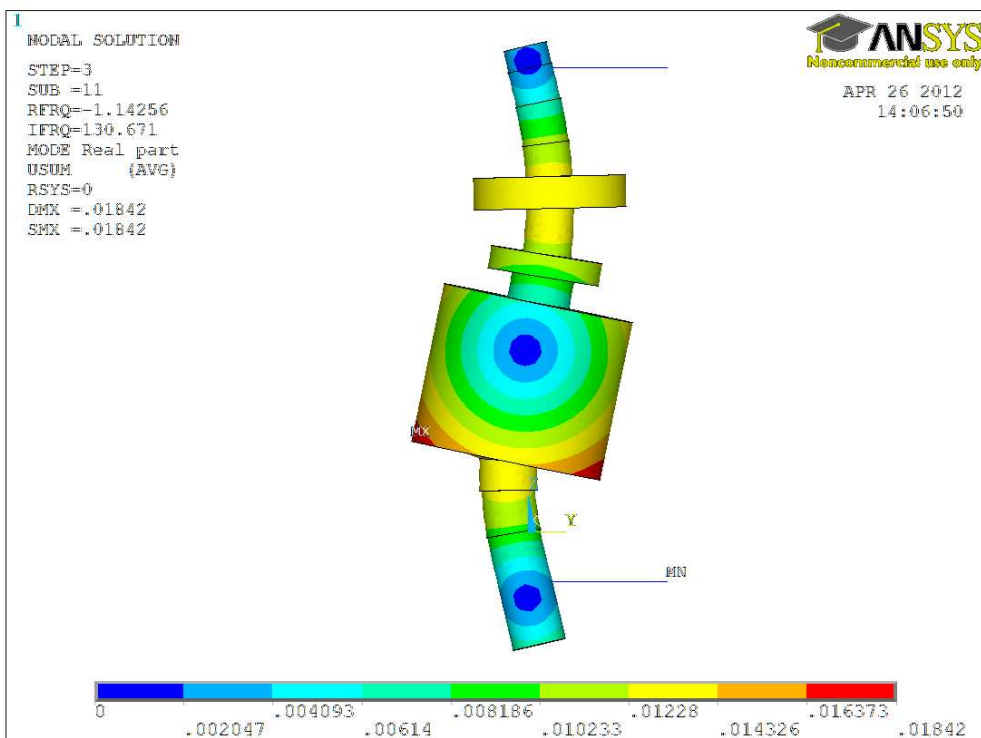
Obr. 3.15 Třetí vlastní tvar kmitání rotoru



Obr. 3.16 Čtvrtý vlastní tvar kmitání rotoru



Obr. 3.17 Pátý vlastní tvar kmitání rotoru



Obr. 3.18 Šestý vlastní tvar kmitání rotoru

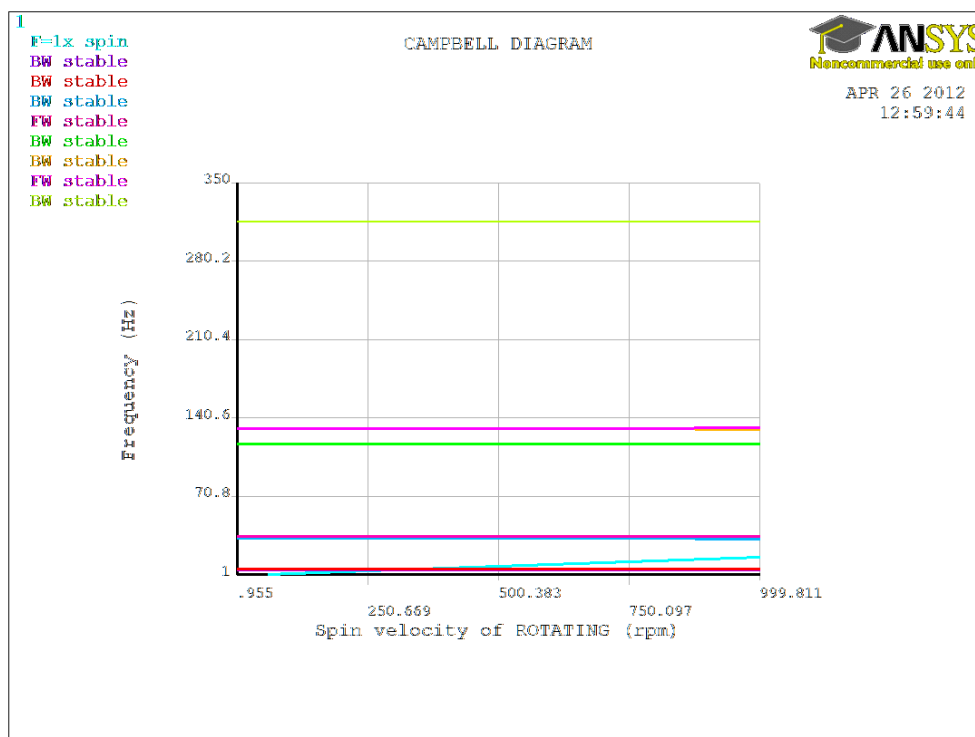
## Campbellovy diagramy

Kritické otáčky jsou důležitou charakteristikou u rotorových soustav. Určení těchto charakteristik je realizováno pomocí Campbellových diagramů. Budící frekvence u analyzovaného generátoru jsou 7,15 Hz a 100 Hz. Obě frekvence a kritické otáčky jsou zobrazeny v obrázcích 3.19 a 3.20 a vypsány v tabulce 3.6.

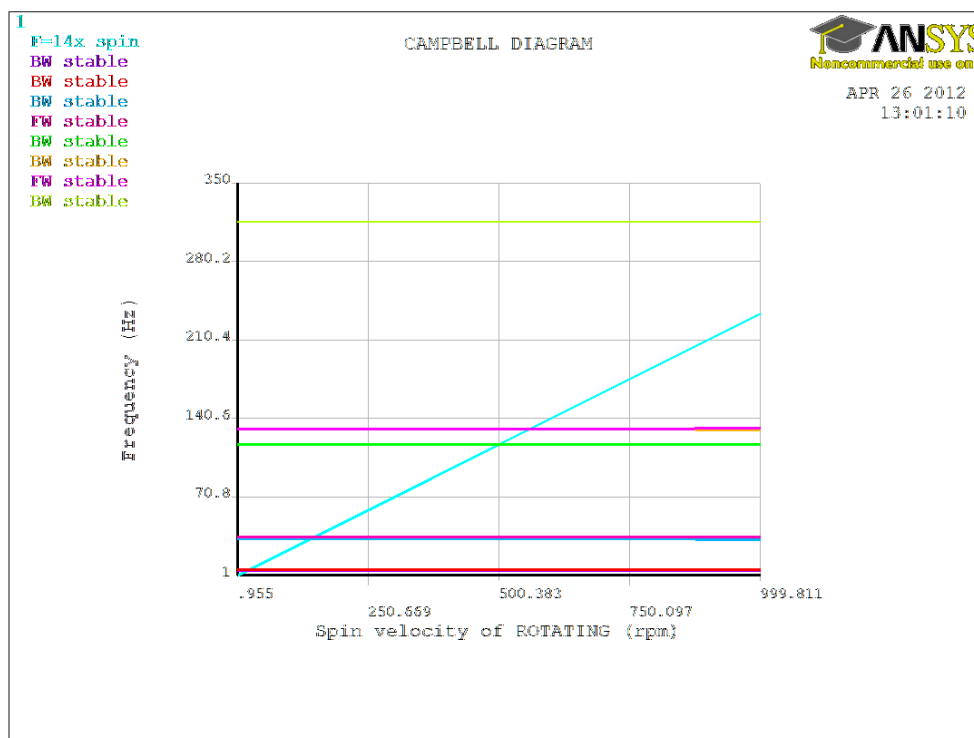
| Budící frekvence [Hz] | Kritické otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ] |     |     |     |     |
|-----------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                       |                                       |     |     |     |     |
| 7,15                  | 315                                   | 340 | -   | -   | -   |
| 100                   | 22                                    | 24  | 141 | 149 | 504 |

Tab. 3.6 Kritické otáčky rotoru

Podmínkou je, aby provozní otáčky byly o 10% nižší nebo vyšší než kritické. Provozní otáčky generátoru jsou  $429 \text{ min}^{-1}$ . Nejbližší kritické otáčky provozním otáčkám vyšly z Campbellova diagramu  $504 \text{ min}^{-1}$ . Provozní otáčky jsou tedy nižší o 17%.



Obr. 3.19 Campbellův diagram pro budící frekvenci 7,15 Hz



Obr. 3.20 Campbellův diagram pro budící frekvenci 100 Hz

### 3.3. MODÁLNÍ ANALÝZA ROTORU A KOSTRY GENERÁTORU

Výpočet rotujícího a stacionárního modelu dohromady lze realizovat v programu ANSYS dvěma variantami:

1) Nejdříve jsou vypočítány modální vlastnosti pouze stacionární části. Jsou vybrány uzly z prvků, kterými je stacionární část diskretizována, a které jsou v místě spojení s rotující částí. U vybraných uzlů jsou vypsány výsledky (ANSYS je nazývá „Superelement“). Tyto výsledky jsou použity jako okrajové podmínky při výpočtu modálních vlastností rotující části. Hlavním cílem výpočtu se superelementy je značné zredukování výpočetního času. Jsou použity u výpočtových modelů, které mají velké množství stupňů volnosti.

2) Při výpočtu modálních vlastností je počítána rotující a stacionární část dohromady. Důležité je, aby pouze rotujícím prvkům byla přiřazena úhlová rychlost.

Na jednoduchém příkladu byly vyzkoušeny obě varianty. Výsledky z obou variant se shodovaly. Následující výpočet je proveden variantou dvě.

### 3.3.1. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

#### 3.3.1.1. MODEL GEOMETRIE

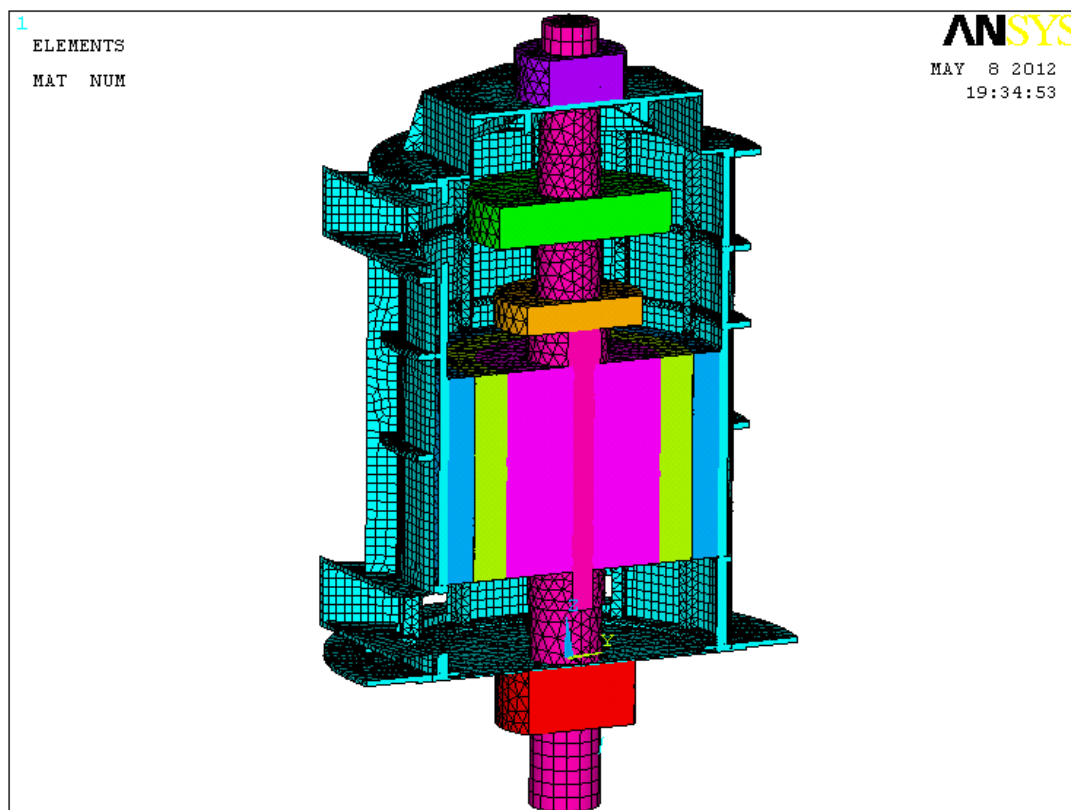
Stator z kapitoly 3.1.1.1 a rotor z kapitoly 3.2.1.1 jsou spojeny dohromady dle obrázku 3.21.

#### 3.3.1.2. MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Všechny materiálové vlastnosti jsou shodné s materiálovými vlastnostmi rotoru z kapitoly 3.2.1.2 a statoru z kapitoly 3.1.1.2.

#### 3.3.1.3. VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ

Konečnoprvková síť statoru je shodná se sítí z kapitoly 3.1.1.3 a síť rotoru je shodná se sítí z kapitoly 3.2.1.3. Při tvorbě konečnoprvkové sítě je důležité, aby se uzly sítě statoru a uzly sítě rotoru neshodovaly. Prvek COMBI 214 spojuje rotor generátoru se státorem. Z kapitoly 2.3.3 je zřejmé, že ke správné funkci prvku COMBI 214 je potřeba vybrat tři uzly. Jeden uzel musí být na ose rotace z a zbylé dva musí být na nerotující části (na ložiscích). Vše je zobrazeno na obrázku 3.21.



Obr. 3.21 Diskretizovaný model generátoru

### 3.3.1.4. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Model okrajových podmínek je shodný s modelem z kapitoly 3.1.1.4

### 3.3.1.5. NASTAVENÍ PARAMETRŮ MODÁLNÍ ANALÝZY

Metoda řešení: Damp

Počet vlastních tvarů: 25

Frekvenční rozsah: neomezeno

Počáteční frekvence: 1 Hz

### 3.3.2. VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY GENERÁTORU

Výsledné vlastní frekvence rotoru jsou zaznamenány v tabulce 3.7 a na obrázcích 3.26 až 3.30 jsou zobrazeny jejich příslušné vlastní tvary.

|                  | Vlastní frekvence [Hz] |
|------------------|------------------------|
| 1. Vlastní tvar  | 5                      |
| 2. Vlastní tvar  | 5,5                    |
| 3. Vlastní tvar  | 10                     |
| 4. Vlastní tvar  | 10,3                   |
| 5. Vlastní tvar  | 17                     |
| 6. Vlastní tvar  | 42                     |
| 7. Vlastní tvar  | 42                     |
| 8. Vlastní tvar  | 70                     |
| 9. Vlastní tvar  | 72                     |
| 10. Vlastní tvar | 108                    |
| 11. Vlastní tvar | 134                    |

Tab. 3.7 Vlastní frekvence generátoru

V prvních dvou vlastních tvarech kmitá pouze rotor. Tyto vlastní tvary jsou stejné jako první dva tvary kmitání samotného rotoru v kapitole 3.2.2. Ve třetích až pátých vlastních tvarech kmitá pouze ložisko v přírubě statoru. Opět jsou tyto vlastní tvary shodné s prvními třemi vlastními tvary samotného rotoru z kapitoly 3.1.2. Z těchto důvodů již prvních pět vlastních tvarů kmitání statoru s rotorem není zobrazeno.

V šestém vlastním tvaru kmitá dolní ložisko v přírubě a zároveň příčně kmitá rotor v ose y s jedním uzlovým bodem ve spodní části rotorového vinutí (obr. 3.26).

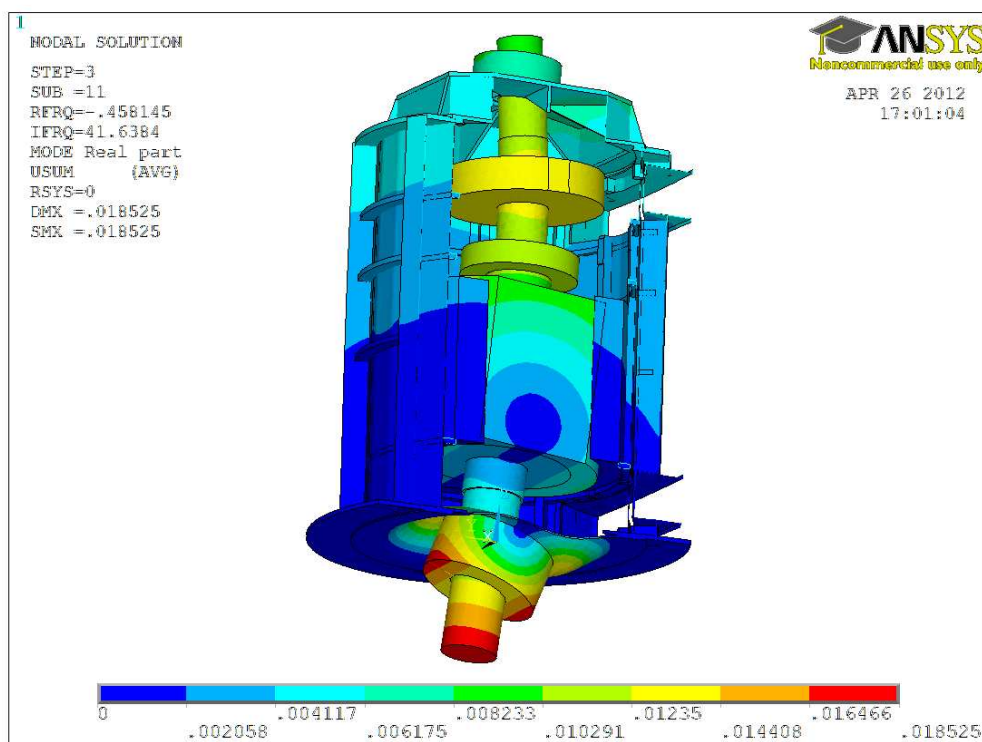
Sedmý vlastní tvar je stejný jako šestý, pouze příčně nekmitá v ose y ale v ose x (obr. 3.27).

V osmém vlastním tvaru kmitá stator příčně v ose y a rotor v ose x. U rotoru jsou největší výchylky na obou koncích a nejmenší uprostřed (obr. 3.28).

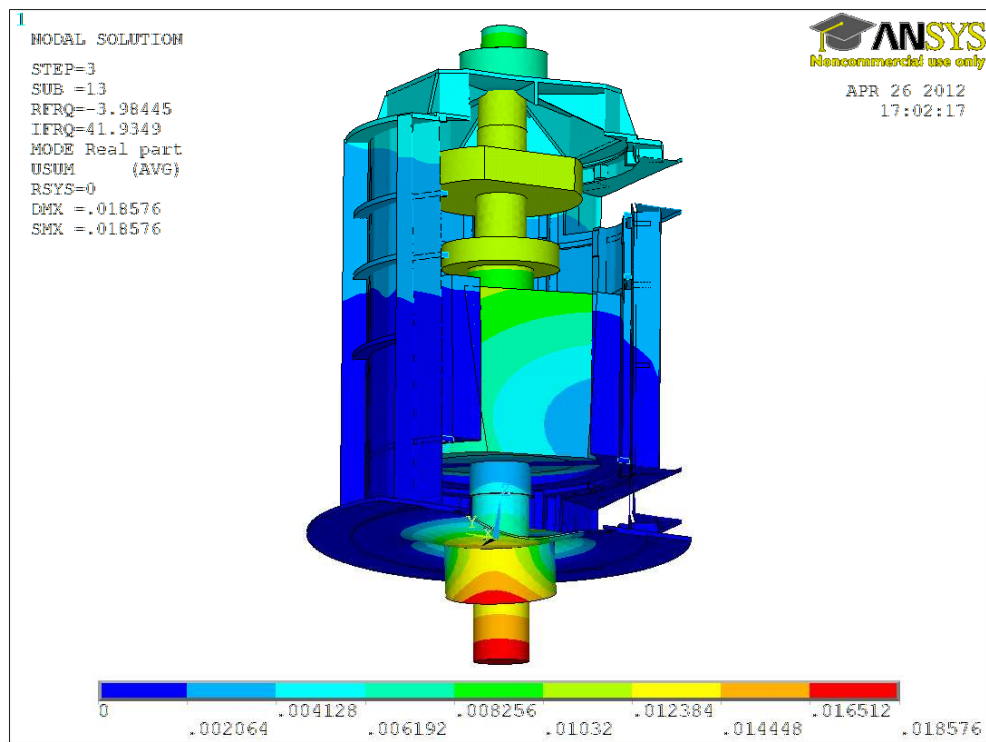
V devátém vlastním tvaru kmitá stator a rotor příčně v ose y. U rotoru jsou největší výchylky na obou koncích a nejmenší uprostřed (obr. 3.29).

V desátém vlastním tvaru kmitá stator příčně v ose y a torzně v ose z. Rotor kmitá příčně v ose x, největší výchylky jsou na obou koncích (obr. 3.30).

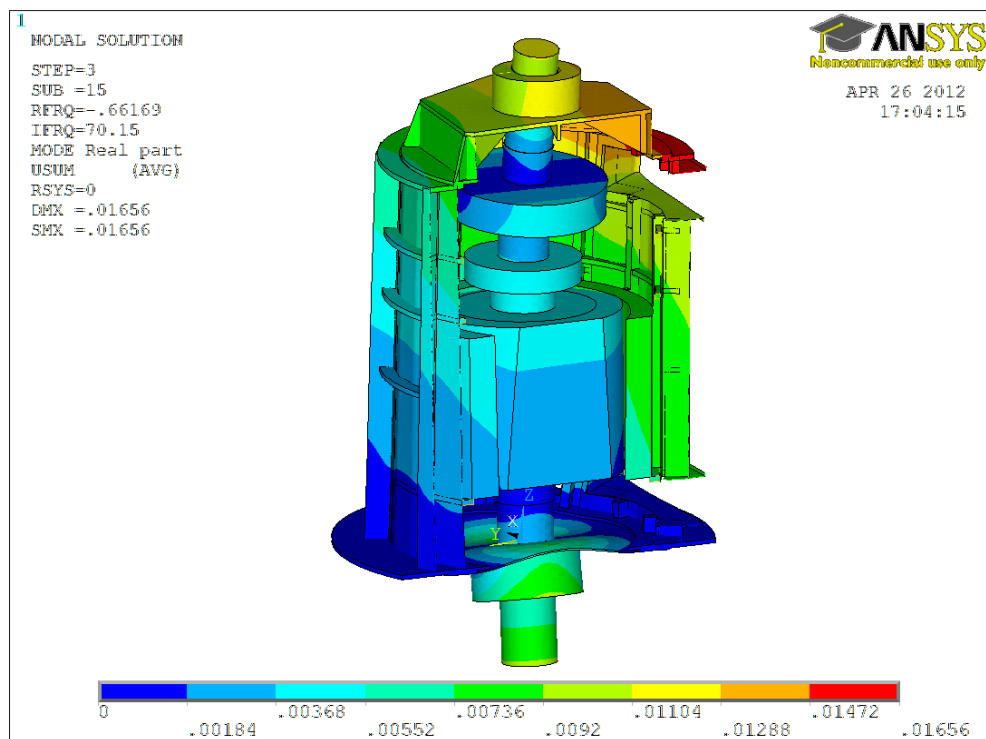
V jedenáctém vlastním tvaru kmitají plechy u ventilačního otvoru (obr. 3.31).



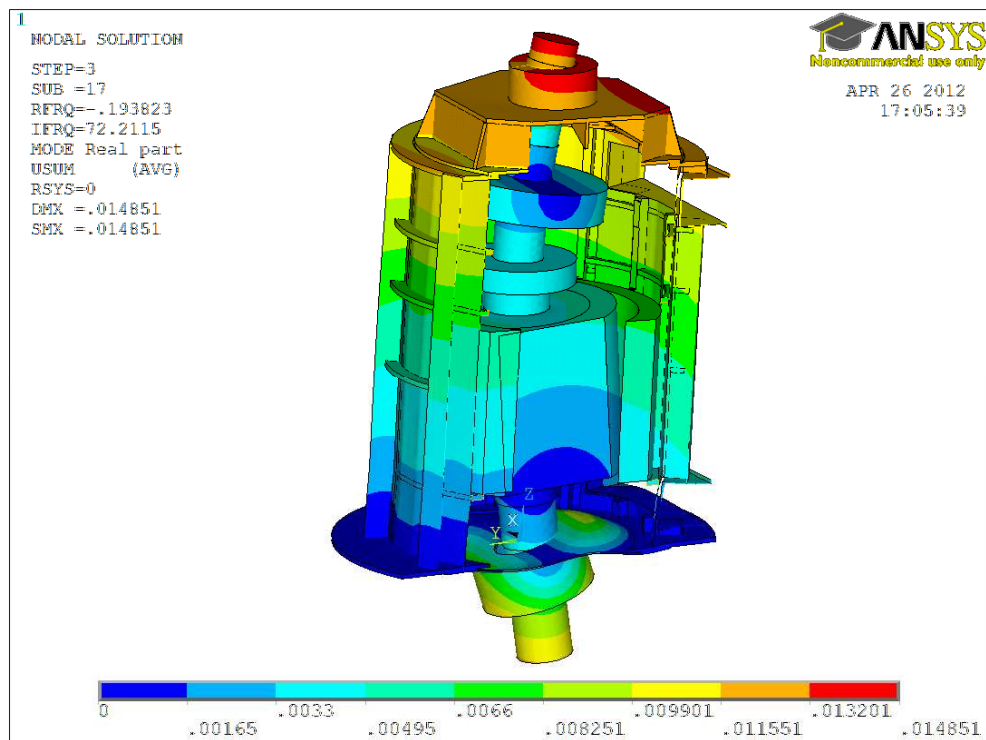
Obr. 3.26 Šestý vlastní tvar kmitání generátoru



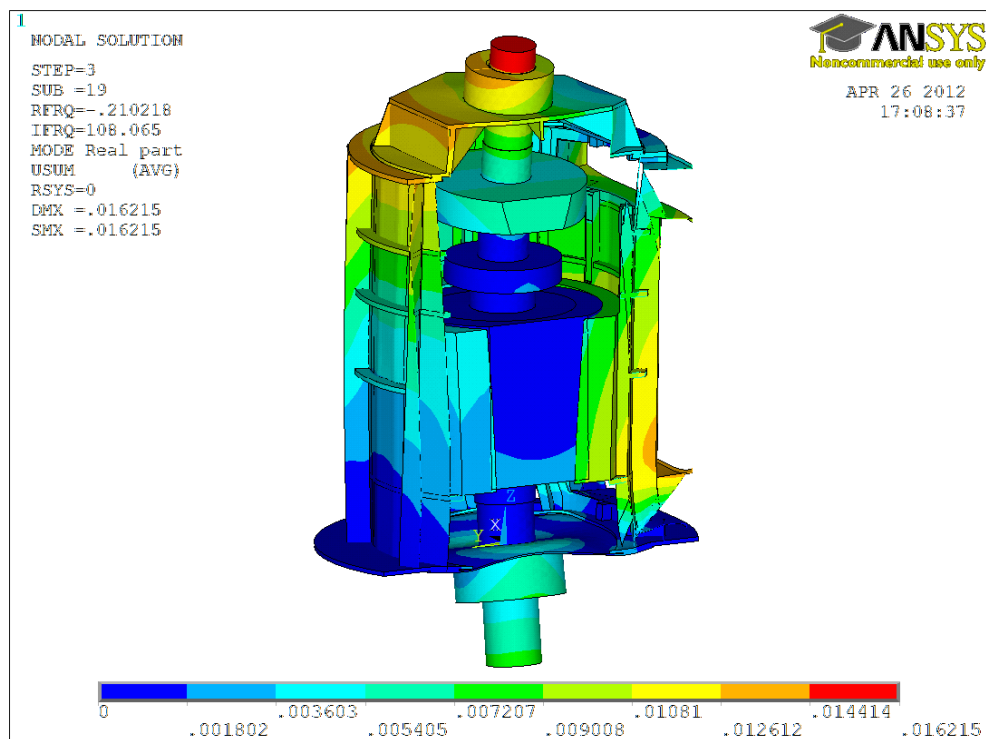
Obr. 3.27 Sedmý vlastní tvar kmitání generátoru



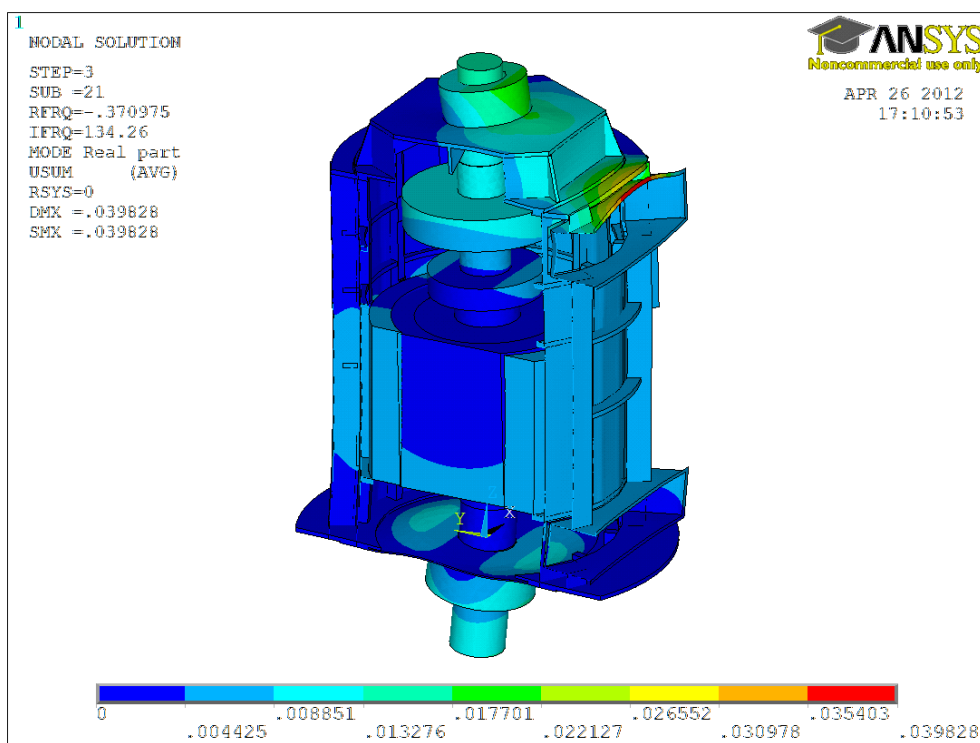
Obr. 3.28 Osmý vlastní tvar kmitání generátoru



Obr. 3.29 Devátý vlastní tvar kmitání generátoru



Obr. 3.30 Desátý vlastní tvar kmitání generátoru



Obr. 3.31 Jedenáctý vlastní tvar kmitání generátoru

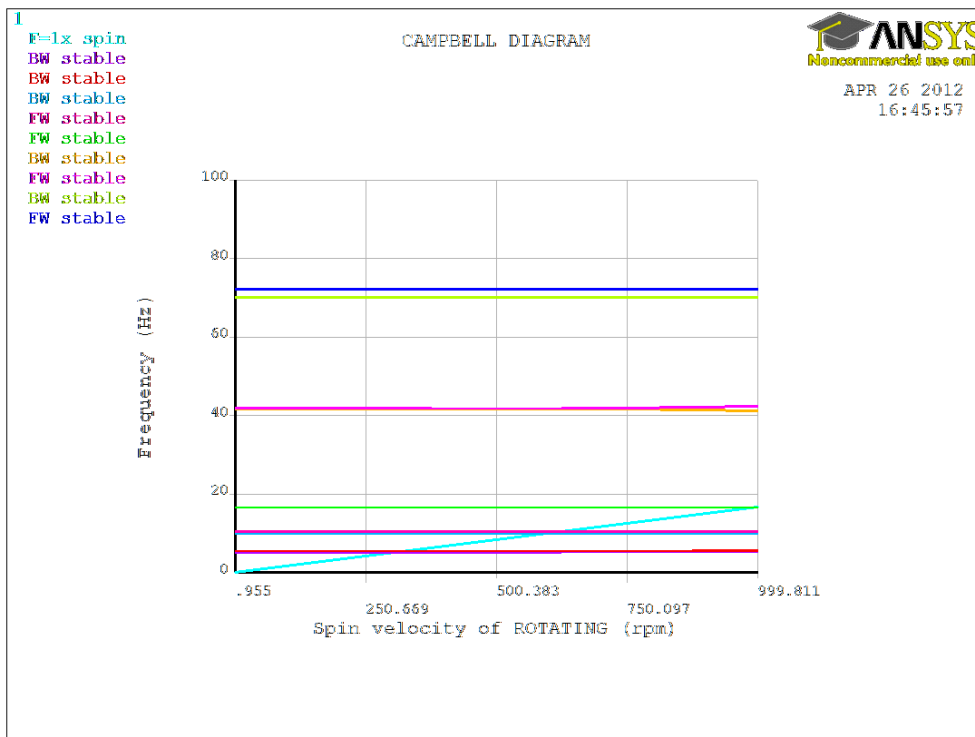
### Campbellovy diagramy

Kritické otáčky pro budící frekvence 7,15 Hz a 100 Hz jsou zapsány v tabulce 3.8 a vykresleny v Campbellových diagramech (obr. 3.32 a 3.33).

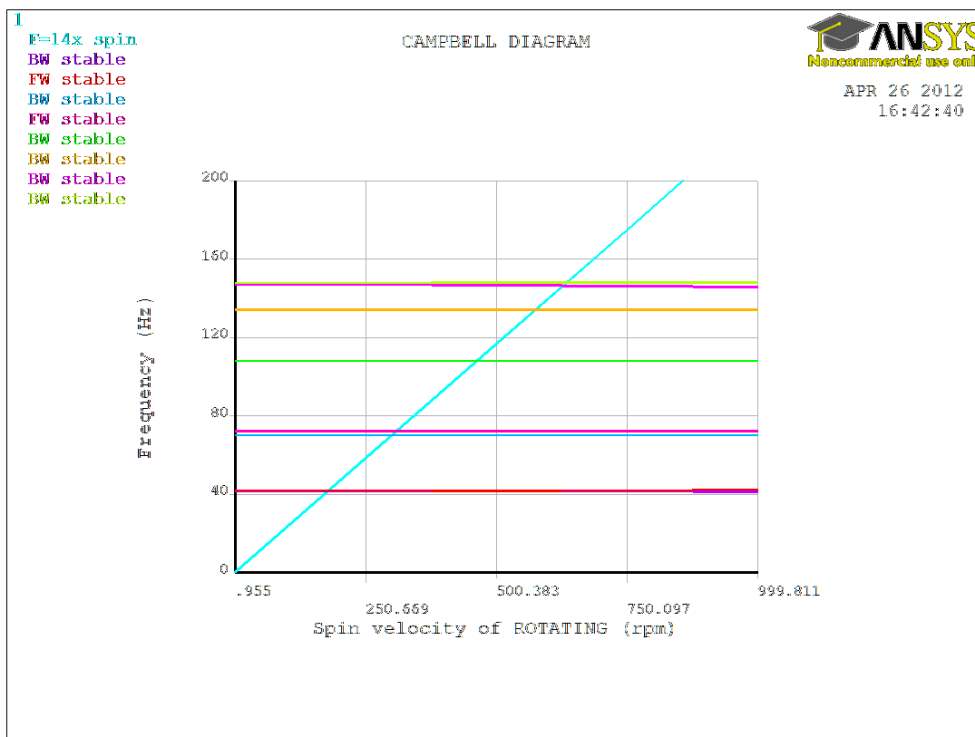
| Budící frekvence [Hz] | Kritické otáčky [min <sup>-1</sup> ] |     |     |     |     |     |
|-----------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                       | 7,15                                 | 311 | 330 | 597 | -   | -   |
| 100                   | 178                                  | 180 | 301 | 310 | 463 | 629 |

Tab. 3.8 Kritické otáčky generátoru

Podmínkou je, aby provozní otáčky byly o 10% nižší nebo vyšší než kritické. Provozní otáčky generátoru jsou 429 min<sup>-1</sup>. Nejbližší kritické otáčky provozním otáčkám vyšly z Campbellova diagramu 463 min<sup>-1</sup>. Provozní otáčky jsou tedy nižší o 8%. Tato hodnota nevyhovuje podmínce.



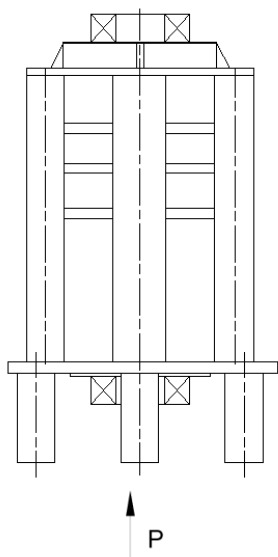
Obr. 3.32 Campbellův diagram pro budící frekvenci 7,15 Hz



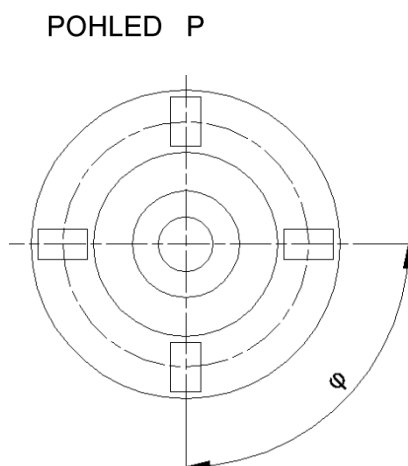
Obr. 3.33 Campbellův diagram pro budící frekvenci 100 Hz

### 3.4. MODÁLNÍ ANALÝZA STATORU S PODPĚRAMI

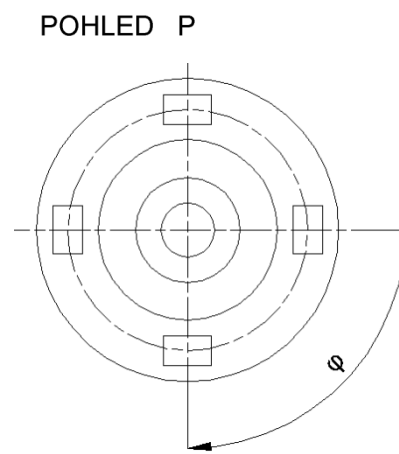
Model geometrie a rozměry podpěry jsou na obrázku 3.37. Je k dispozici 4 ( $\varphi = 90^\circ$ ), 6 ( $\varphi = 60^\circ$ ) a 8 ( $\varphi = 45^\circ$ ) podpěr a dvě varianty natočení (obr. 3.35 a 3.36). Pro každou variantu s určitým počtem podpěr byla provedena analýza modálních vlastností.



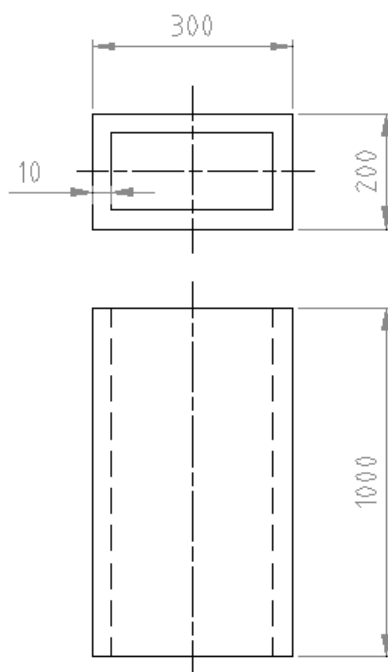
Obr. 3.34 Kostra generátoru s podpěrami



Obr. 3.35 Varianta I natočení podpěr



Obr. 3.36 Varianta II natočení podpěr



Obr. 3.37 Podpěra

### 3.4.1. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

#### 3.4.1.1. MODEL GEOMETRIE

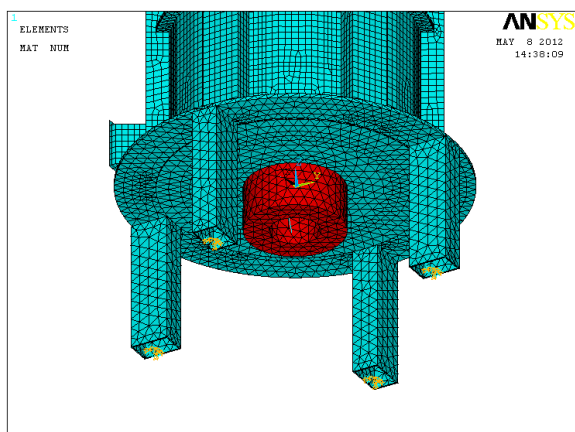
Model geometrie je shodný s modelem geometrie samotného statoru z kapitoly 3.1.1.1, pouze je doplněn o podpěry dle obrázků 3.38 až 3.40.

#### 3.4.1.2. MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

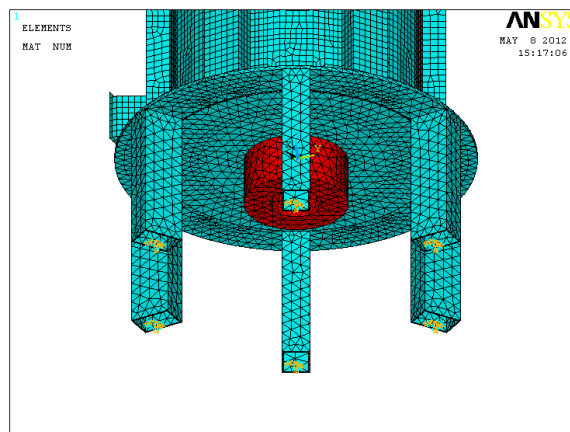
Všechny materiálové vlastnosti jsou shodné s materiálovými vlastnostmi statoru z kapitoly 3.1.1.2.

#### 3.4.1.3. VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ

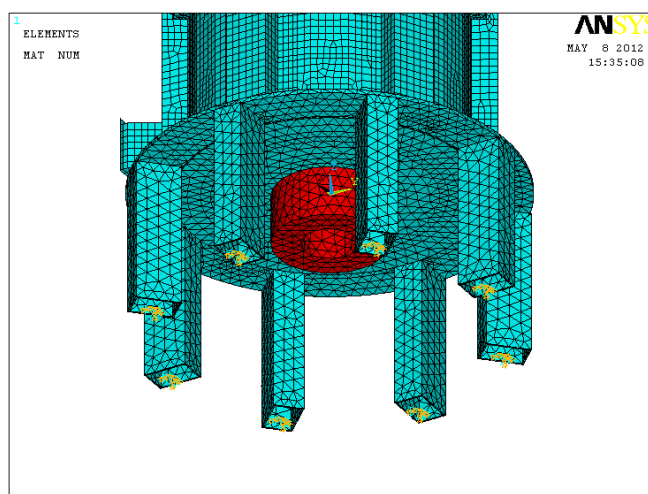
Konečnoprvková síť a použité elementy jsou shodné s kapitolou 3.1.1.3. Pouze je vytvořena konečnoprvková síť pro podpěry dle obrázků 3.38 až 3.40. Pro podpěry je použit prvek SOLID 186.



Obr. 3.38 Varianta I se čtyřmi podpěrami



Obr. 3.39 Varianta I se šesti podpěrami



Obr. 3.40 Varianta I s osmi podpěrami

#### **3.4.1.4. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK**

Nulové posuvy a nulové natočení ve všech osách jsou předepsány na spodní ploše všech podpěr dle obrázků 3.38 až 3.40.

#### **3.4.1.5. NASTAVENÍ PARAMETRŮ MODÁLNÍ ANALÝZY**

Metoda řešení: Block Lanczos

Počet vlastních tvarů: 20

Frekvenční rozsah: neomezeno

Počáteční frekvence: 1 Hz

### **3.4.2. VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY STATORU SE ČTYŘMI PODPĚRAMI**

Vlastní tvary statoru se čtyřmi podpěrami a variantou natočení I jsou vykresleny na obrázcích 3.41 až 3.45. Vlastní tvary, u kterých kmitá pouze ložisko, nebo plechy u ventilačních otvorů, jsou stejné jako v kapitole 3.1.2, proto nejsou zobrazeny.

V prvním vlastním tvaru kmitá celý stator s podpěrami podélně v ose z (obr. 3.41).

Ve druhém až pátém vlastním tvaru kmitá pouze ložisko v přírubě.

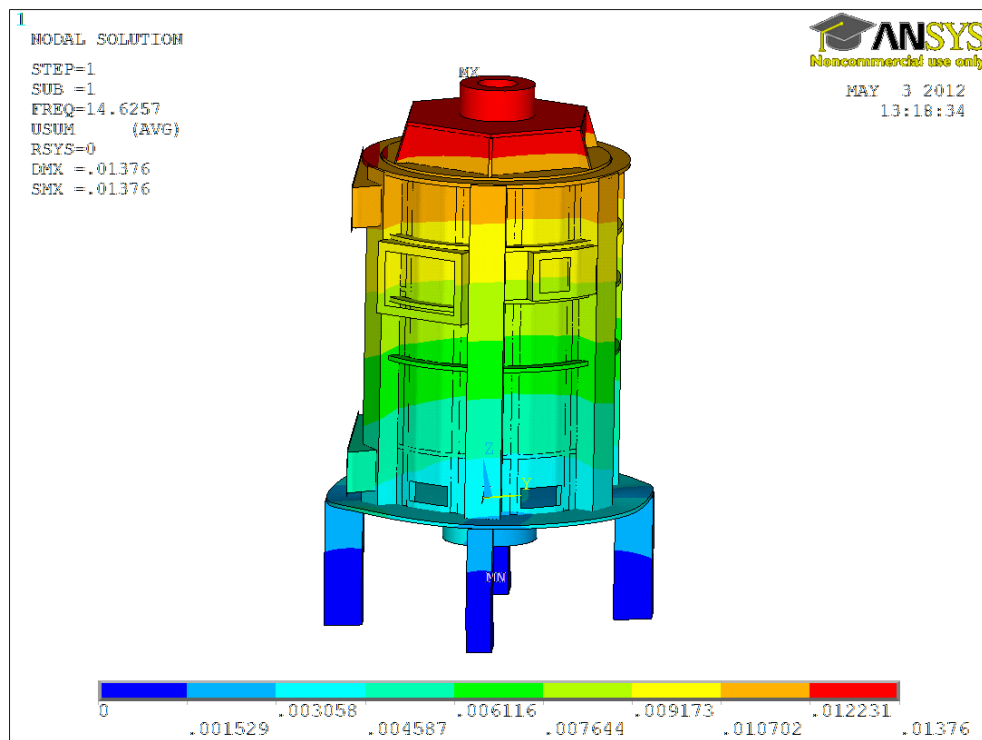
V šestém vlastním tvaru kmitá celý stator s podpěrami torzně v ose z (obr. 3.42).

V sedmém vlastním tvaru kmitá celý stator s podpěrami příčně v ose y. Stator a podpěry mají opačnou fázi kmitání (obr. 3.43).

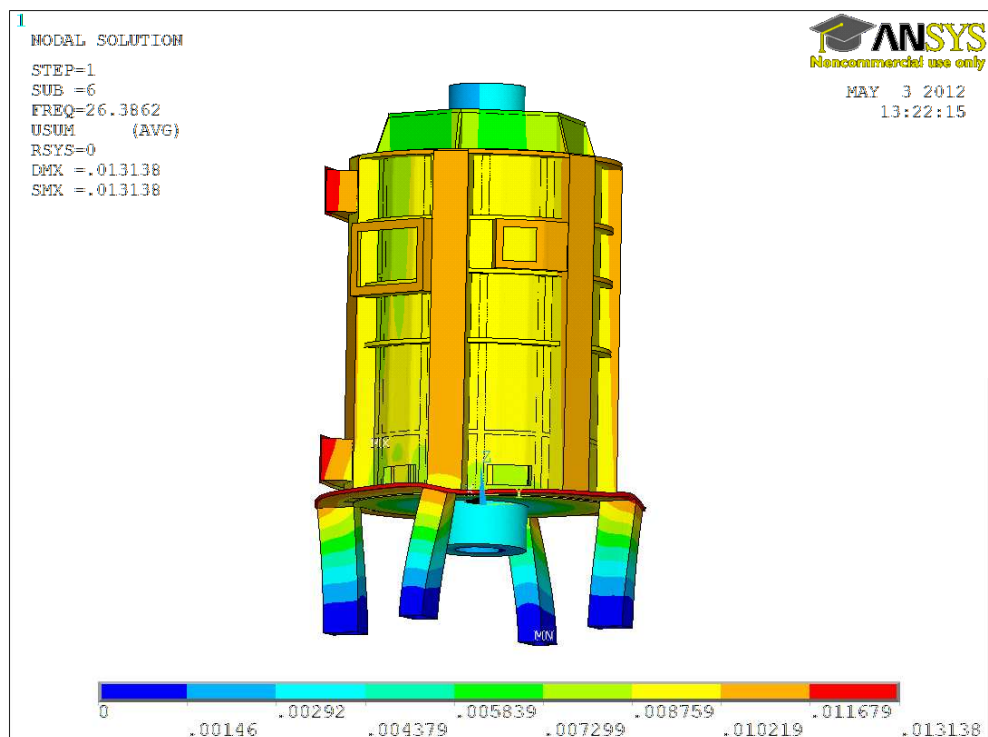
V osmém vlastním tvaru kmitá celý stator s podpěrami příčně v ose x. Stator a podpěry mají opačnou fázi kmitání (obr. 3.44).

V devátém vlastním tvaru kmitá stator torzně v ose z a podpěry mají minimální výchylky (obr. 3.45).

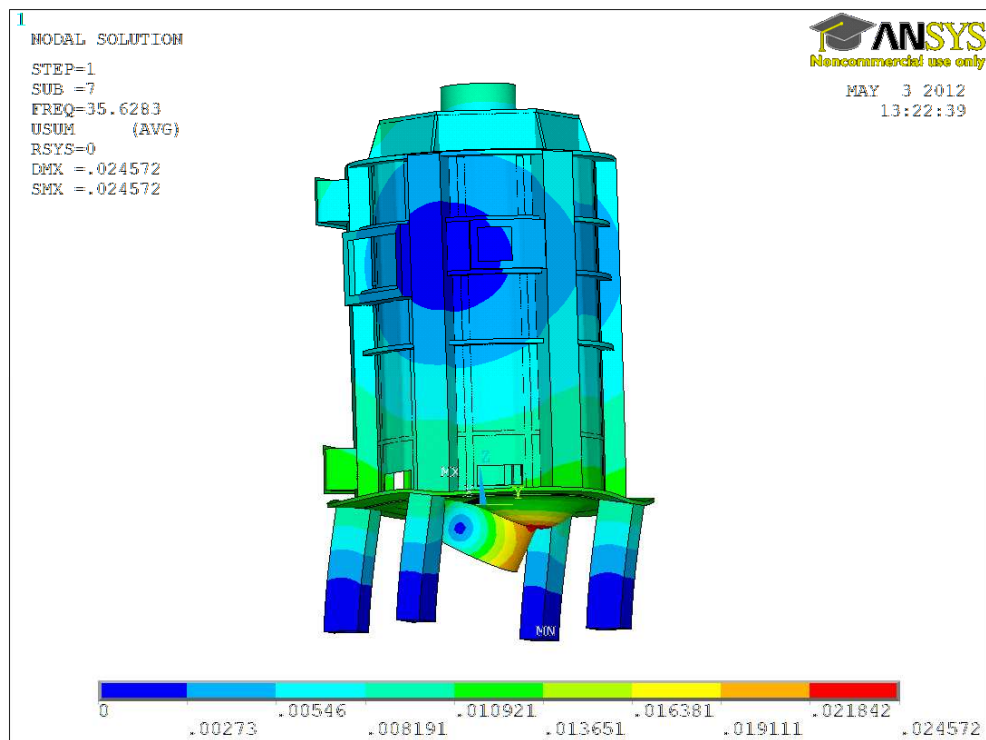
V desátém vlastním tvaru kmitají plechy od ventilačního otvoru.



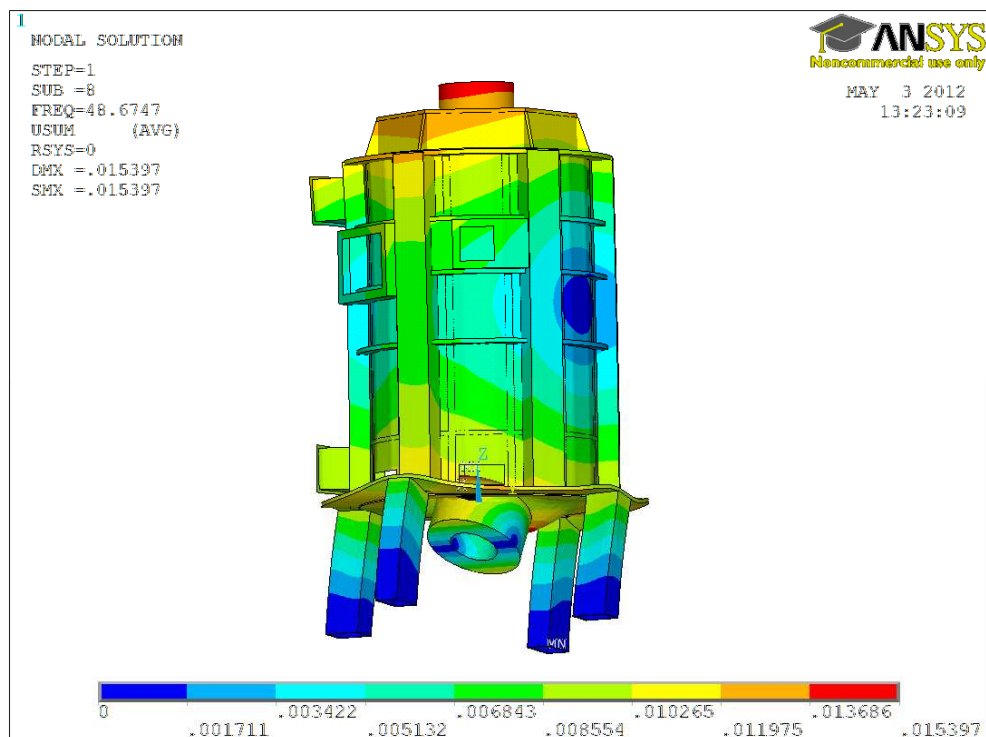
Obr. 3.41 První vlastní tvar kmitání statoru se čtyřmi podpěrami



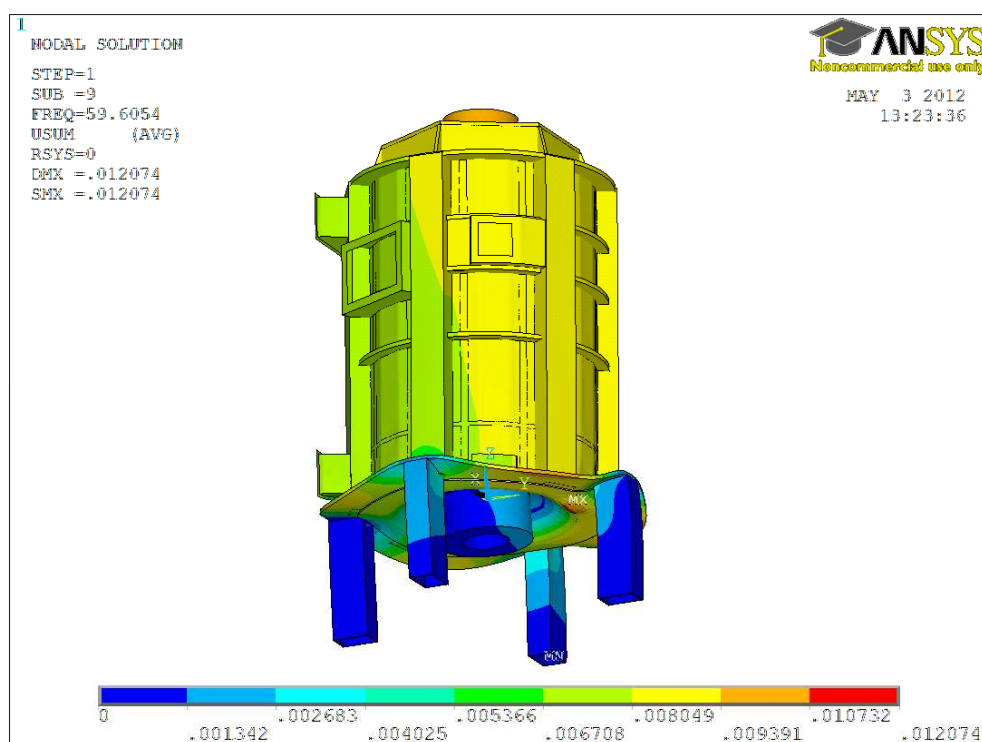
Obr. 3.42 Šestý vlastní tvar kmitání statoru se čtyřmi podpěrami



Obr. 3.43 Sedmý vlastní tvar kmitání statoru se čtyřmi podpěrami



Obr. 3.44 Osmý vlastní tvar kmitání statoru se čtyřmi podpěrami



Obr. 3.45 Devátý vlastní tvar kmitání statoru se čtyřmi podpěrami

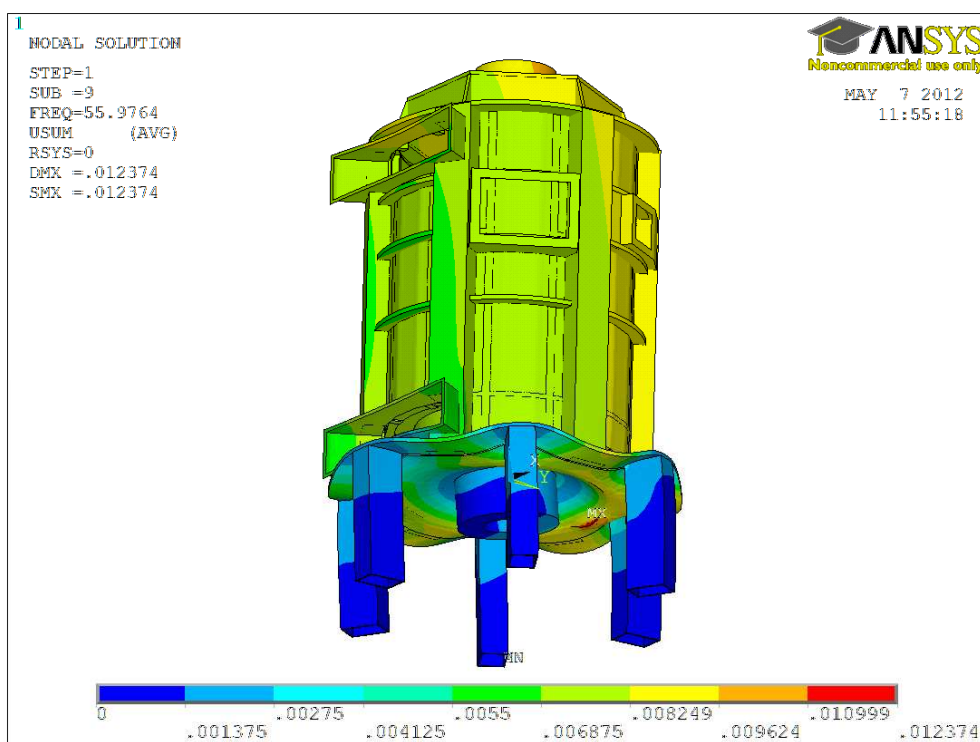
Vlastní tvary ostatních variant jsou velmi podobné vlastním tvarům z obrázků 3.41 až 3.45. Pouze je změna ve vlastních frekvencích, které jsou vypsány v tabulce 4.9.

|              | 1. VARIANTA            |             |             | 2. VARIANTA  |             |             | STATOR<br>BEZ<br>PODPĚŘ |
|--------------|------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------------------|
|              | 4<br>podpěry           | 6<br>podpěr | 8<br>podpěr | 4<br>podpěry | 6<br>podpěr | 8<br>podpěr |                         |
|              | Vlastní frekvence [Hz] |             |             |              |             |             |                         |
| 1. Vl. tvar  | 15                     | 16          | 16          | 14           | 16          | 16          | 16                      |
| 2. Vl. tvar  | 16                     | 18          | 24          | 16           | 17          | 22          | 25                      |
| 3. Vl. tvar  | 18                     | 19          | 24          | 19           | 18          | 24          | 26                      |
| 4. Vl. tvar  | 24                     | 24          | 26          | 24           | 24          | 25          | 65                      |
| 5. Vl. tvar  | 25                     | 25          | 29          | 25           | 25          | 27          | 66                      |
| 6. Vl. tvar  | 26                     | 31          | 37          | 34           | 38          | 45          | 109                     |
| 7. Vl. tvar  | 35                     | 42          | 58          | 39           | 43          | 57          | 140                     |
| 8. Vl. tvar  | 48                     | 42,5        | 61          | 52           | 44          | 62          |                         |
| 9. Vl. tvar  | 59                     | 55          | 92          | 64           | 56          | 86          |                         |
| 10. Vl. tvar | 159                    | 160         | 162         | 159          | 160         | 161         |                         |

Tab. 3.9 Vlastní frekvence pro všechny varianty

Z tabulky 3.9 vidíme, že stator s podpěrami je poddajnější, než stator bez nich, proto většina vlastních frekvencí klesla k menší hodnotě. Díky podpěrám vznikly i nové vlastní tvary. Pro správný chod generátoru je podmínka, aby vlastní frekvence nebyla v pásmu  $f_{\text{budící}} \pm 10\%$ , kde  $f_{\text{budící}}$  je budící frekvence. Nejpodstatnější je devátý vlastní tvar, u kterého je vlastní frekvence nejbližší budící. Pro stator se čtyřmi a šesti podpěrami klesla vlastní frekvence devátého vlastního tvaru na přípustnou hodnotu. Statoru s osmi podpěrami klesla vlastní frekvence ve variantě I pouze na hodnotu 92 Hz a ve variantě II na hodnotu 86 Hz. Nevyhovuje předešlé podmínce pouze varianta I pro osm podpěr, jejíž vlastní frekvence je nižší o 8 % proti budící.

Pro ukázkou je vykreslen devátý vlastní tvar pro variantu I se šesti podpěrami (obr. 3.47). V porovnání s obrázkem 3.45 se vlastní tvar vůbec nezměnil, pouze je rozdíl ve vlastní frekvenci.



Obr. 3.47 Devátý vlastní tvar kmitání statoru se šesti podpěrami

## **3.5. MODÁLNÍ ANALÝZA STATORU S ROTOREM S PODPĚRAMI**

### **3.5.1. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU**

#### **3.5.1.1. MODEL GEOMETRIE**

Model geometrie je shodný s modelem geometrie z kapitoly 3.3.1.1, pouze je doplněn o podpěry jako v kapitole 3.4.1.1.

#### **3.5.1.2. MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ**

Všechny materiálové vlastnosti jsou shodné s materiálovými vlastnostmi statoru z kapitoly 3.1.1.2. a rotoru z kapitoly 3.2.1.2.

#### **3.5.1.3. VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ**

Konečnoprvková síť a použité elementy jsou shodné se sítí statoru z kapitoly 3.4.1.3 a rotoru z kapitoly 3.2.1.3

#### **3.5.1.4. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK**

Nulové posuvy a nulové natočení ve všech osách jsou předepsány na spodní ploše všech podpěr jako v kapitole 3.4.1.3.

#### **3.5.1.5. NASTAVENÍ PARAMETRŮ MODÁLNÍ ANALÝZY**

Metoda řešení: Damp

Počet vlastních tvarů: 35

Frekvenční rozsah: neomezeno

Počáteční frekvence: 1 Hz

### 3.5.2. VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY PRO PRVNÍ VARIANTU SE ČTYMI PODPĚRAMI

Vlastní tvary statoru s rotorem se čtyřmi podpěrami a variantou natočení I jsou vykresleny na obrázcích 3.54 až 3.61. Vlastní tvary, kde kmitají pouze ložiska v přírubě, nejsou zobrazeny v této kapitole, jsou vykresleny na obrázcích v kapitole 3.1.2. Nejsou zobrazeny ani první dva vlastní kmity rotoru, které jsou shodné s kapitolou 3.2.2.

V sedmém vlastním tvaru kmitá stator a rotor příčně v ose x (obr. 3.54).

V osmém vlastním tvaru kmitá stator torzně v ose z a rotor téměř nekmitá (obr. 3.55).

V devátém vlastním tvaru kmitá stator příčně v ose y a torzně v ose z. Rotor kmitá příčně v ose y a největší výchylky jsou na obou koncích hřídele (obr. 3.56).

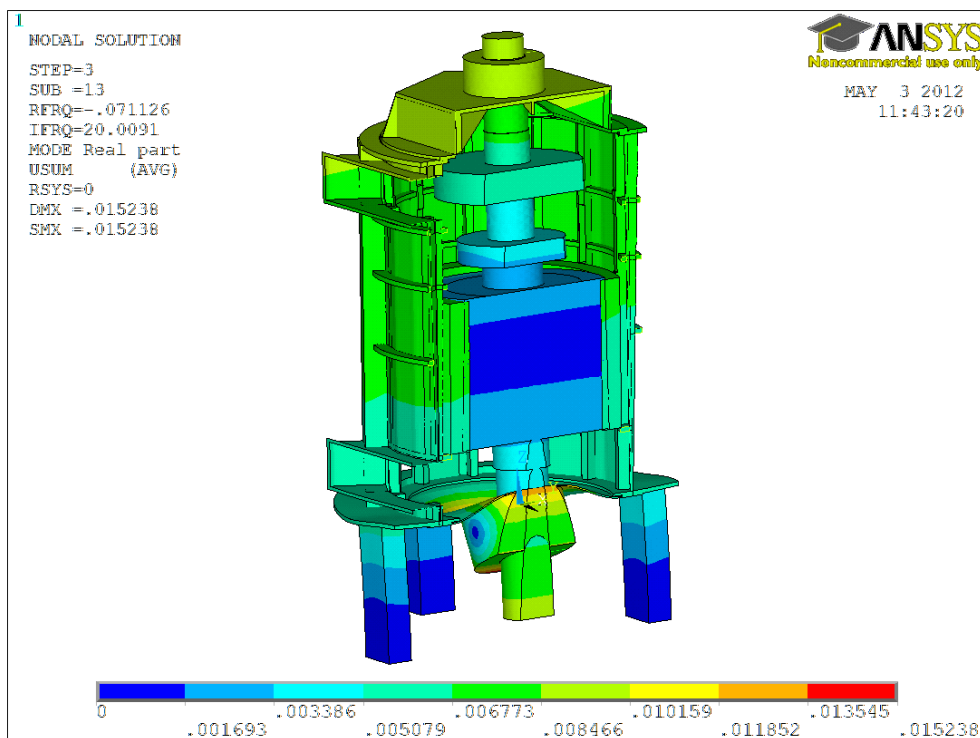
V desátém vlastním tvaru kmitá stator příčně v ose x (obr. 3.57).

V jedenáctém vlastním tvaru kmitá stator příčně v ose y, pouze dolní ložisko kmitá v opačné fázi (obr. 3.58).

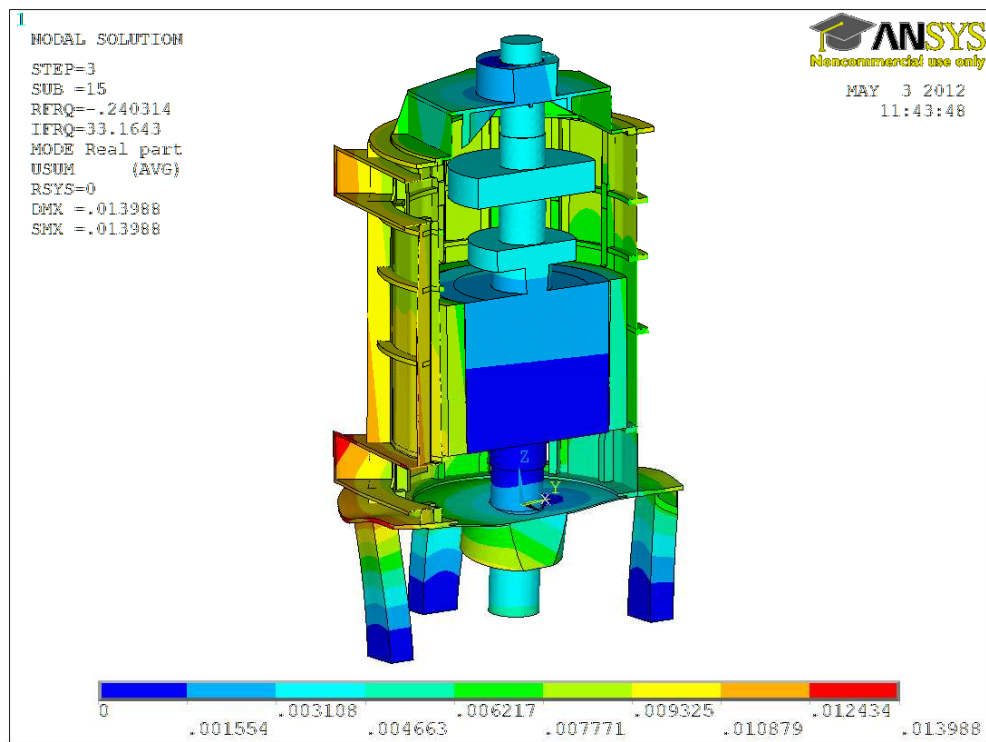
Ve dvanáctém vlastním tvaru kmitá stator a rotor příčně v ose y (obr. 3.59).

Ve třináctém vlastním tvaru stator a rotor kmitá minimálně, pouze ložisko kmitá příčně ve směru osy x (obr. 3.60).

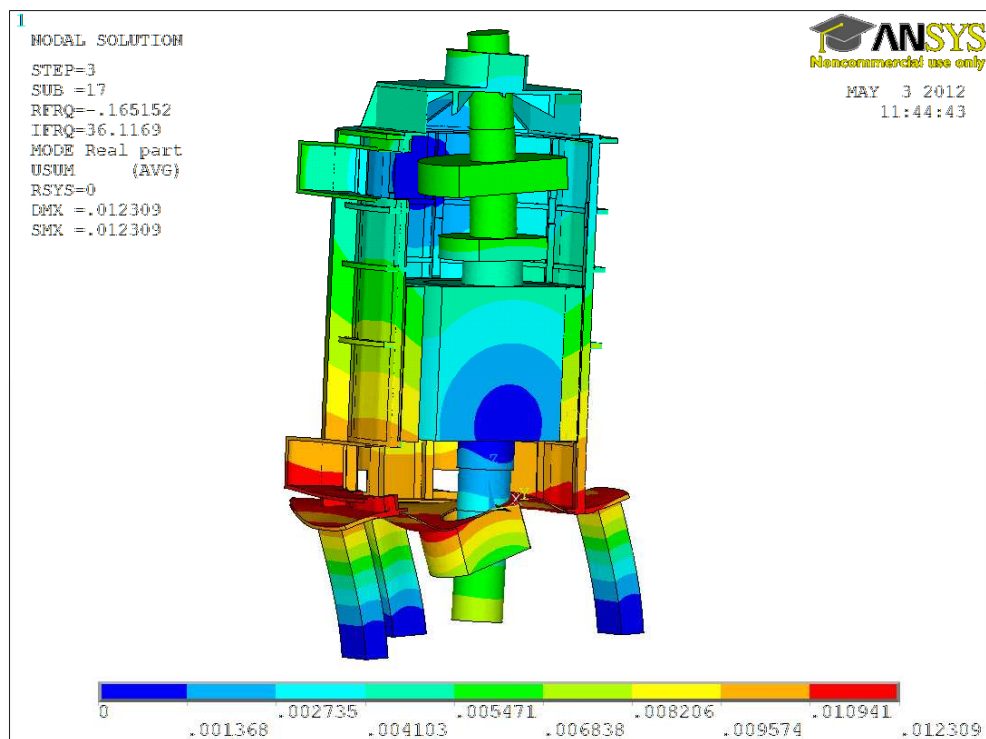
Ve čtrnáctém vlastním tvaru kmitají pouze plechy od ventilačního otvoru. Rotor kmitá příčně v ose y a má tři uzlové body (obr. 3.61).



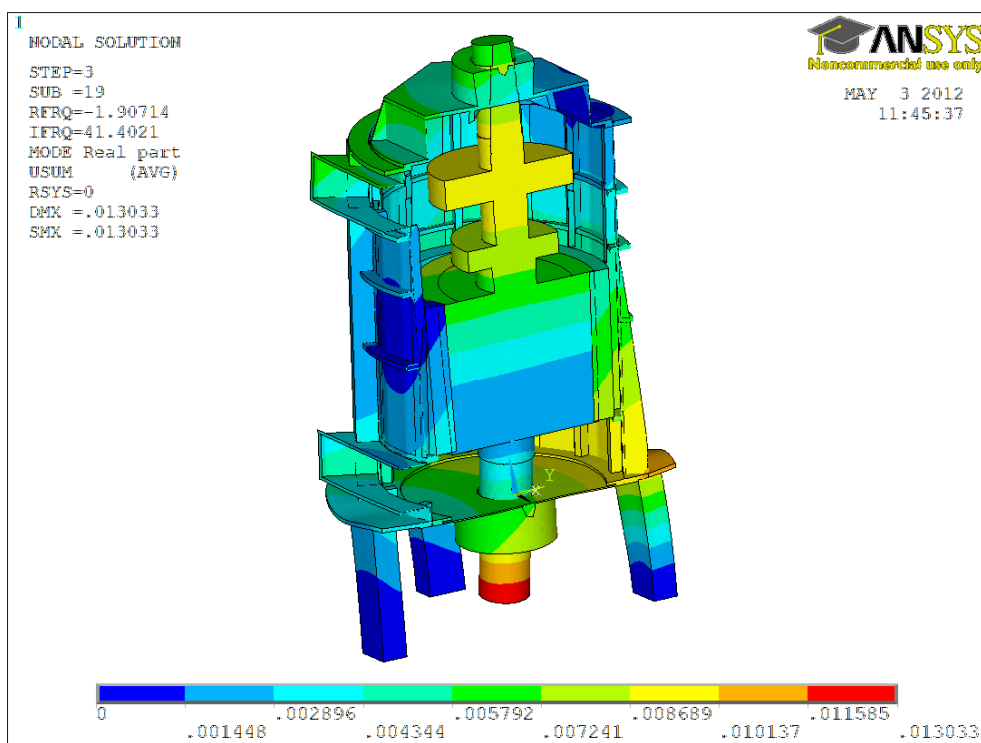
Obr. 3.54 Sedmý vlastní tvar kmitání generátoru



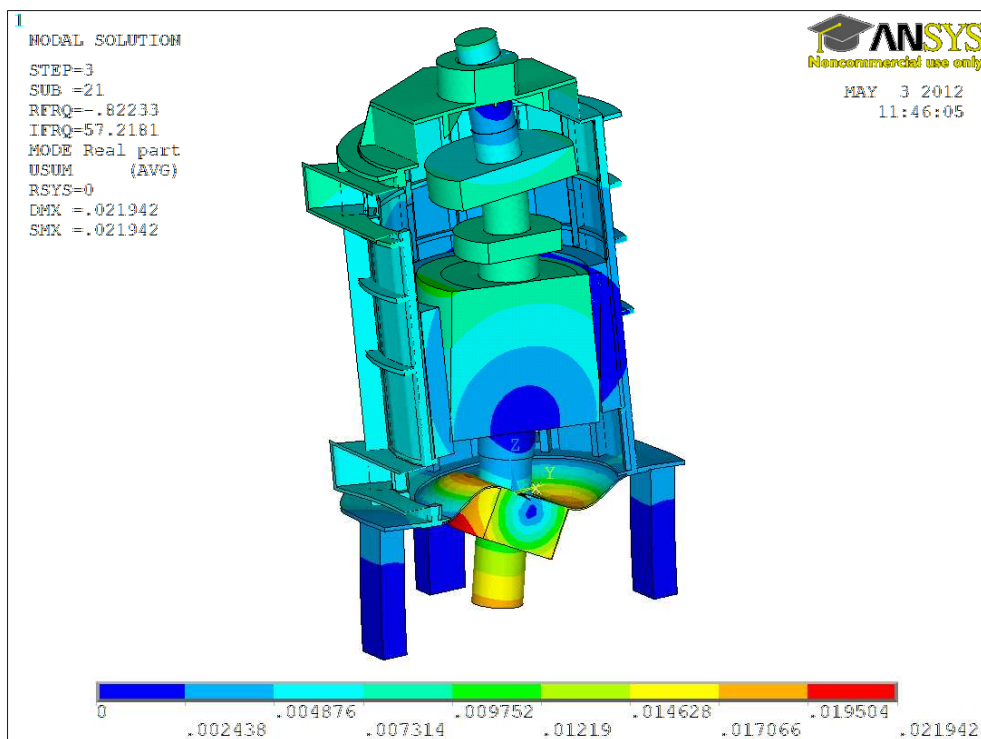
Obr. 3.55 Osmý vlastní tvar kmitání generátoru



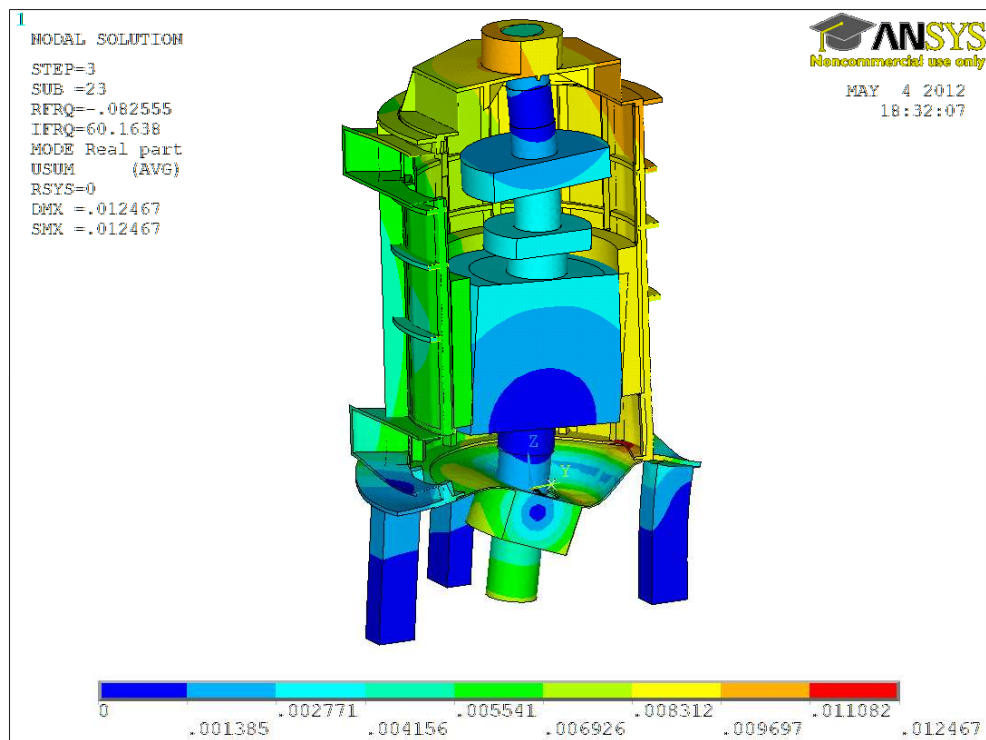
Obr. 3.56 Devátý vlastní tvar kmitání generátoru



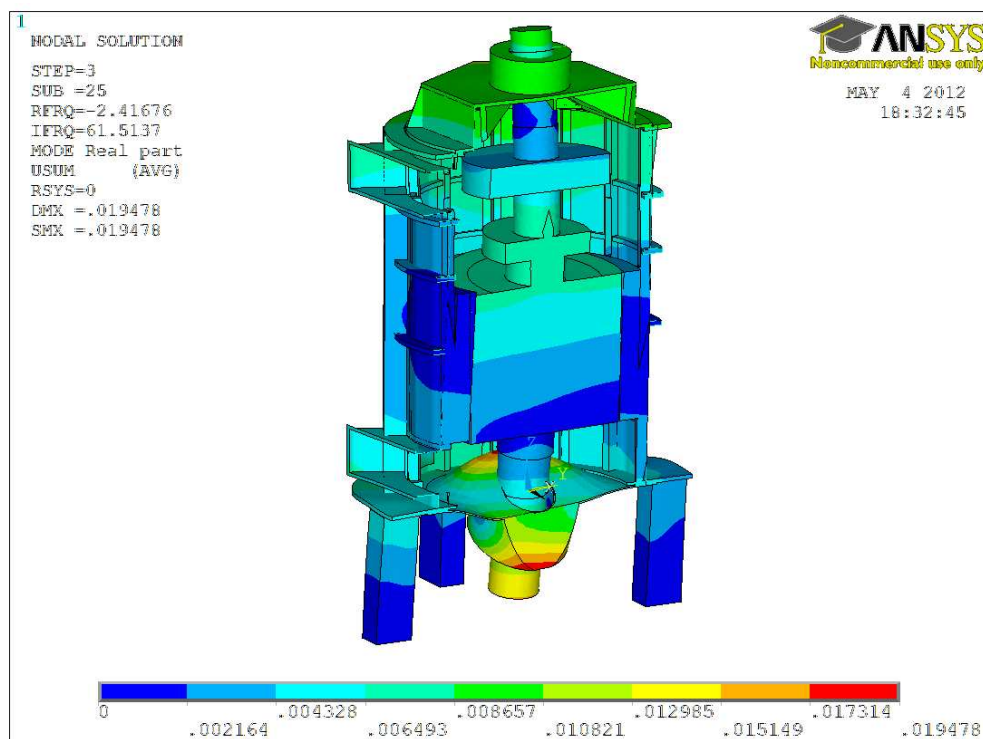
Obr. 3.57 Desátý vlastní tvar kmitání generátoru



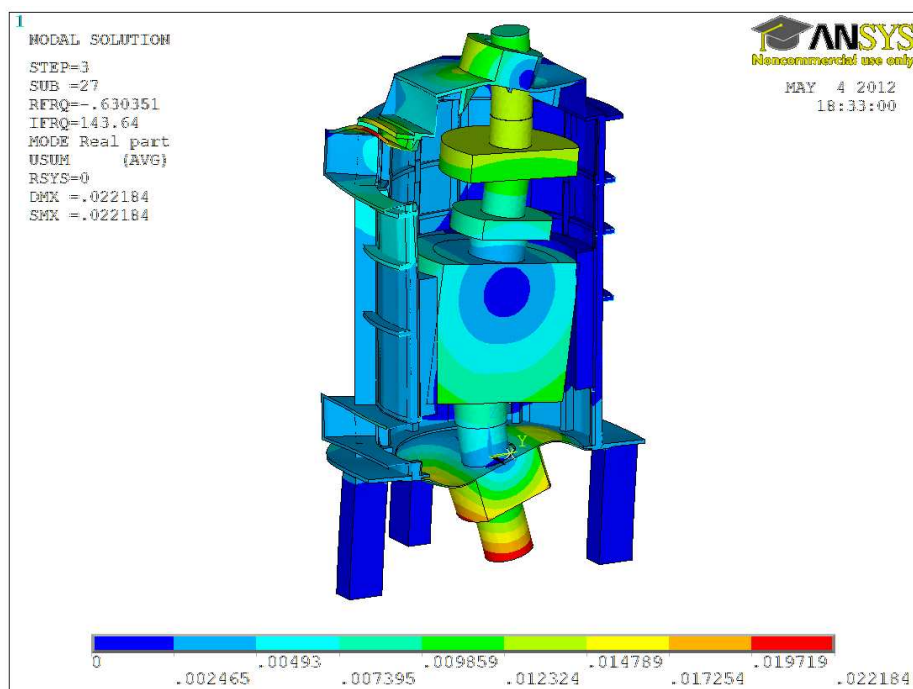
Obr. 3.58 Jedenáctý vlastní tvar kmitání generátoru



Obr. 3.59 Dvanáctý vlastní tvar kmitání generátoru



Obr. 3.60 Třináctý vlastní tvar kmitání generátoru



Obr. 3.61 Čtrnáctý vlastní tvar kmitání generátoru

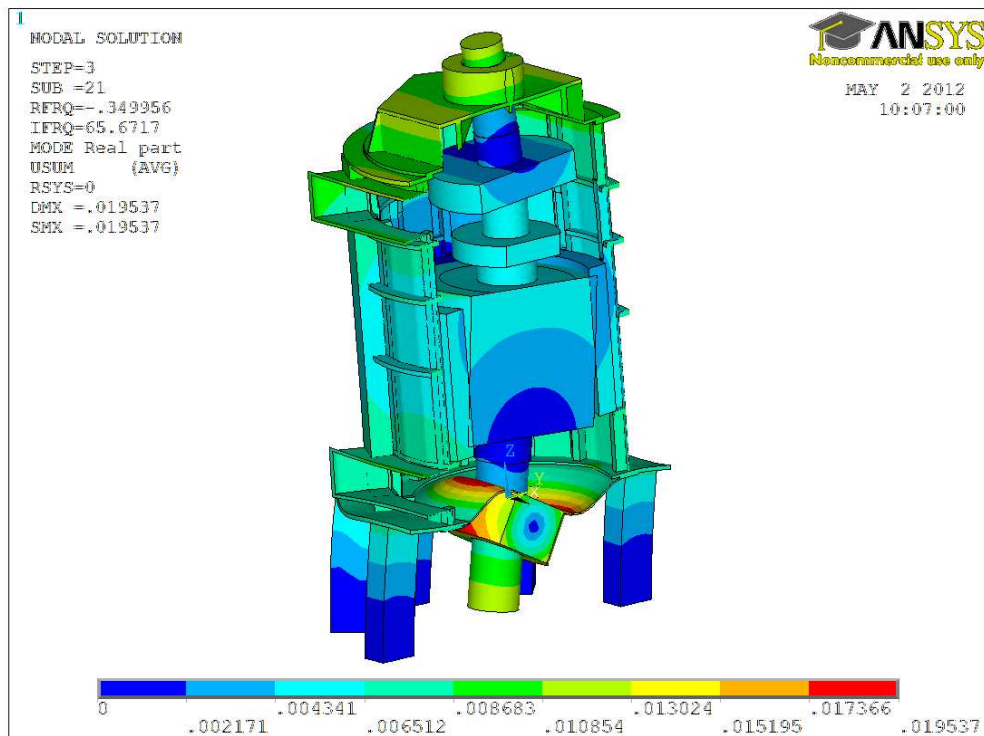
Vlastní tvary ostatních variant jsou velmi podobné vlastním tvarům z obrázků 3.54 až 3.61. Liší se pouze vlastní frekvence, které jsou vypsány v tabulce 4.10.

|              | 1. VARIANTA            |             |             | 2. VARIANTA  |             |             | GENERÁTOR<br>BEZ PODPĚR |
|--------------|------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------------------|
|              | 4<br>podpěry           | 6<br>podpěr | 8<br>podpěr | 4<br>podpěry | 6<br>podpěr | 8<br>podpěr |                         |
|              | Vlastní frekvence [Hz] |             |             |              |             |             |                         |
| 1. Vl. tvar  | 5                      | 5           | 5           | 5            | 5           | 5           | 5                       |
| 2. Vl. tvar  | 5,5                    | 5,5         | 5,5         | 5,5          | 5,5         | 5,5         | 5,5                     |
| 3. Vl. tvar  | 9                      | 9           | 10          | 9            | 9           | 10          | 10                      |
| 4. Vl. tvar  | 9                      | 10          | 10          | 9            | 10          | 10          | 10                      |
| 5. Vl. tvar  | 14                     | 16          | 16          | 14           | 16          | 16          | 16                      |
| 6. Vl. tvar  | 16                     | 17          | 23          | 16           | 16          | 21          | 42                      |
| 7. Vl. tvar  | 19                     | 18          | 27          | 20           | 17          | 25          | 70                      |
| 8. Vl. tvar  | 26                     | 31          | 36          | 33           | 37          | 42          | 72                      |
| 9. Vl. tvar  | 32                     | 38          | 46          | 36           | 39          | 45          | 108                     |
| 10. Vl. tvar | 39                     | 39          | 46          | 41           | 41          | 49          | 134                     |
| 11. Vl. tvar | 56                     | 55          | 66          | 57           | 50          | 64          | 147                     |
| 12. Vl. tvar | 60                     | 58          | 71          | 64           | 59          | 69          |                         |
| 13. Vl. tvar | 62                     | 59          | 91          | 64,5         | 59          | 86          |                         |
| 14. Vl. tvar | 144                    | 144         | 145         | 144          | 144         | 145         |                         |

Tab. 4.10 Vlastní frekvence pro všechny řešené varianty

Z tabulky 4.10 je patrné, že vlastní frekvence při použití odlišného počtu podpěr jsou různé. Čím méně podpěr použijeme, tím se soustava stane poddajnější, jako u samotného statoru s podpěrami v kapitole 3.4.2. Přibudou nové vlastní frekvence a k nim odpovídající nové vlastní tvary. Generátoru s osmi podpěrami klesla vlastní frekvence ve variantě I na hodnotu 91 Hz a ve variantě II na hodnotu 86 Hz. Hodnota 91 Hz pro variantu I s osmi podpěrami je nižší o 9% než budící. Tedy nevyhovuje podmínce, aby vlastní frekvence nebyla v pásmu  $f_{\text{budící}} \pm 10\%$ , kde  $f_{\text{budící}}$  je budící frekvence.

Pro ukázkou je vykreslen jedenáctý vlastní tvar pro variantu I s osmi podpěrami (obr. 3.62). V porovnání s obrázkem 3.58 je vlastní tvar zcela totožný, pouze je rozdíl ve vlastní frekvenci.



Obr. 3.62 Jedenáctý vlastní tvar kmitání generátoru s 8 podpěrami

### Campbellovy diagramy

Kritické otáčky pro všechny varianty a budící frekvence 7,15 Hz a 100 Hz jsou zapsány v tabulce 4.11.

|             |           | Budící frekvence | Kritické otáčky [min <sup>-1</sup> ] |     |     |     |     |     |
|-------------|-----------|------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| I VARIANTA  | 4 podpěry | 7,15             | 310                                  | 329 | 536 | -   | -   | -   |
|             |           | 100              | 137                                  | 168 | 241 | 258 | 264 | 615 |
|             | 6 podpěr  | 7,15             | 311                                  | 329 | 558 | -   | -   | -   |
|             |           | 100              | 164                                  | 165 | 236 | 250 | 253 | 616 |
|             | 8 podpěr  | 7,15             | 311                                  | 329 | 586 | -   | -   | -   |
|             |           | 100              | 195                                  | 196 | 281 | 301 | 386 | 619 |
| II VARIANTA | 4 podpěry | 7,15             | 311                                  | 328 | 530 | -   | -   | -   |
|             |           | 100              | 155                                  | 177 | 245 | 273 | 276 | 615 |
|             | 6 podpěr  | 7,15             | 310                                  | 328 | 553 | -   | -   | -   |
|             |           | 100              | 167                                  | 176 | 216 | 250 | 255 | 616 |
|             | 8podpěr   | 7,15             | 311                                  | 329 | 570 | -   | -   | -   |
|             |           | 100              | 193                                  | 209 | 276 | 293 | 369 | 619 |

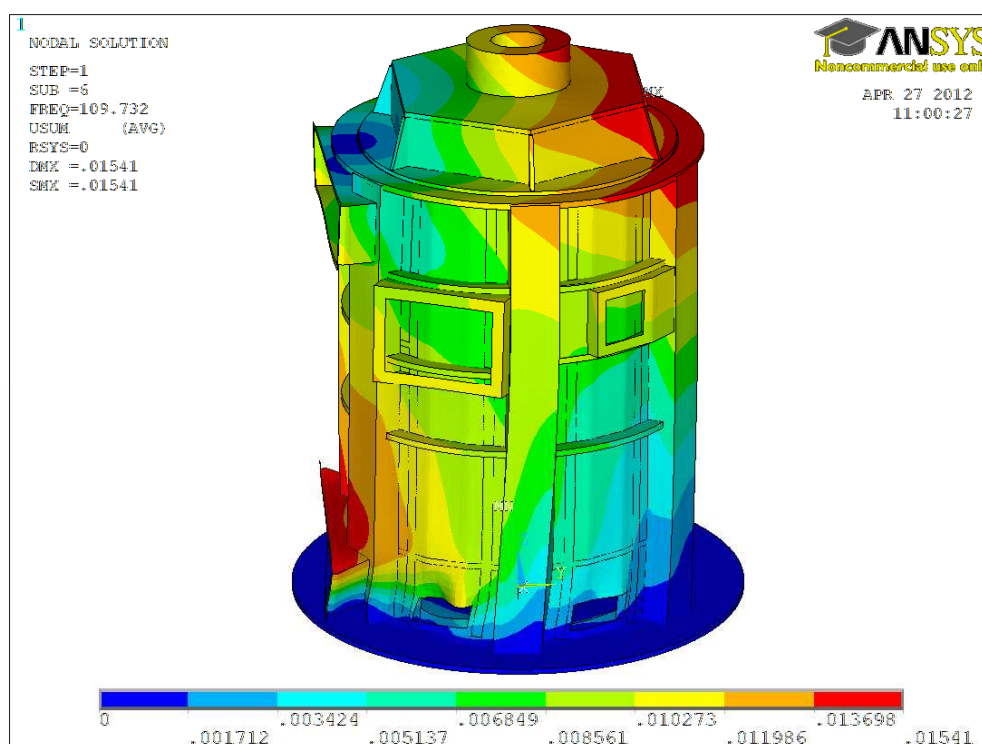
Tab. 4.11 Kritické otáčky pro všechny řešené varianty

Podmínka je, aby provozní otáčky byly o 10% nižší nebo vyšší než kritické. Provozní otáčky generátoru jsou 429 min<sup>-1</sup>. Nejbližší kritické otáčky provozním otáčkám vyšly z Campbellova diagramu 386 min<sup>-1</sup> pro variantu I o 8 podpěrách. Provozní otáčky jsou tedy vyšší o 9%. Tato hodnota nevyhovuje podmínce.

## 4. KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY

Podmínka pro generátor je, aby se provozní otáčky neshodovaly s kritickými otáčkami a byly alespoň o 10% vyšší nebo nižší. Tuto podmínku generátor nesplňuje, pokud nestojí na podpěrách.

Nyní je potřeba zvýšit vlastní frekvenci šestého vlastního tvaru. Z obrázku 4.1 je patrné, že generátor příčně kmitá v ose y a torzně kmitá v ose z. Ve spodní části statoru dochází k největšímu natočení, proto zde byla konstrukce vyztužena. Spodní plechy byly vyztuženy na 20 mm z původních 5 mm a bylo přidáno šest žeber po obvodu dle obrázku 4.2.



Obr. 4.1 Šestý vlastní tvar kmitání statoru

### 4.1. MODÁLNÍ ANALÝZA UPRAVENÉHO STATORU

#### 4.1.1. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

##### 4.1.1.1. MODEL GEOMETRIE

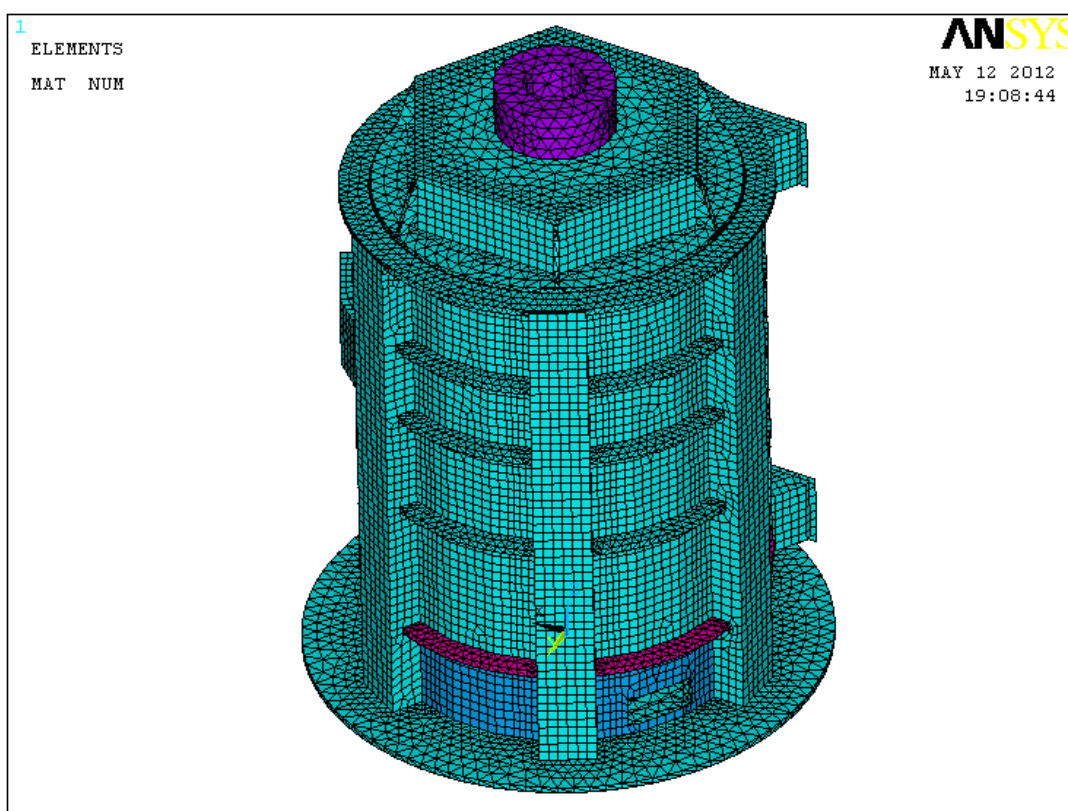
Model geometrie je shodný s modelem geometrie z kapitoly 3.1.1.1, pouze je doplněn o vyztužené plechy a přidaná žebra dle obrázku 4.2.

#### 4.1.1.2. MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Všechny materiálové vlastnosti jsou shodné s materiálovými vlastnostmi statoru z kapitoly 3.1.1.2.

#### 4.1.1.3. VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ

Konečnoprvková síť a použité elementy jsou shodné s kapitolou 3.1.1.3. Pouze je vygenerována přídatná síť pro nová žebra dle obrázku 4.3.



Obr. 4.3 Diskretizovaný model upraveného statoru. Modrá – vyztužené plechy, červená – přídatná žebra.

#### 4.1.1.4. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Model okrajových podmínek je stejný jako v kapitole 3.1.1.4.

#### 4.1.1.5. NASTAVENÍ PARAMETRŮ MODÁLNÍ ANALÝZY

Metoda řešení: Block Lanczos

Počet vlastních tvarů: 12

Frekvenční rozsah: neomezeno

Počáteční frekvence: 1 Hz

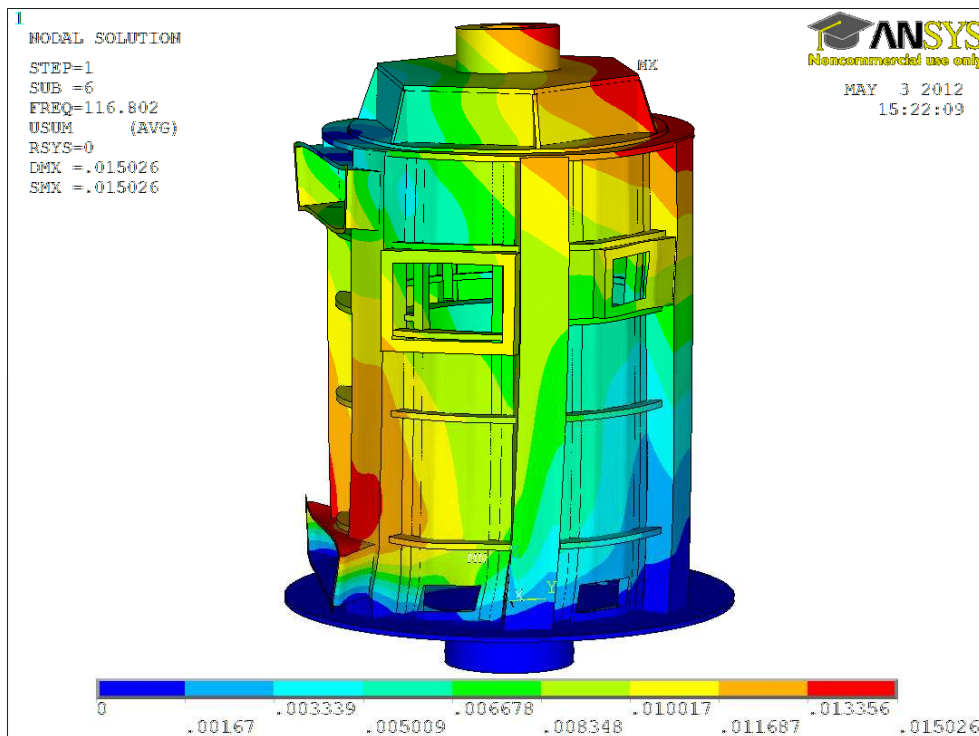
#### 4.1.2. VÝSLEDKY

Vlastní frekvence upraveného a původního statoru jsou uvedeny v tabulce 4.1.

|                 | Vlastní frekvence [Hz] |                 |
|-----------------|------------------------|-----------------|
|                 | stator                 | Upravený stator |
| 1. Vlastní tvar | 16                     | 16              |
| 2. Vlastní tvar | 25                     | 25              |
| 3. Vlastní tvar | 26                     | 26              |
| 4. Vlastní tvar | 65                     | 69              |
| 5. Vlastní tvar | 66                     | 70              |
| 6. Vlastní tvar | 109                    | 117             |
| 7. Vlastní tvar | 140                    | 146             |

Tab. 4.1 Vlastní frekvence původního a upraveného statoru

Z tabulky je patrné, že vlastní frekvence šestého vlastního tvaru stoupla ze 109 Hz na přijatelnou hodnotu 117 Hz. Šestý vlastní tvar je vykreslen na obrázku 4.4.



Obr. 4.4 Šestý vlastní tvar kmitání upraveného statoru

## **4.2. MODÁLNÍ ANALÝZA UPRAVENÉHO STATORU S ROTOREM**

### **4.2.1. TVORBA MODELU**

#### **4.2.1.1. MODEL GEOMETRIE**

Model geometrie je shodný s modelem geometrie statoru z kapitoly 4.1.1.1 a modelem geometrie rotoru z kapitoly 3.2.1.1.

#### **4.2.1.2. MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ**

Všechny materiálové vlastnosti jsou shodné s materiálovými vlastnostmi rotoru kapitoly 3.2.1.2 a statoru z kapitoly 3.1.1.2.

#### **4.2.1.3. VYTVOŘENÍ KONEČNOPRVKOVÉ SÍTĚ**

Konečnoprvková síť a použité elementy jsou shodné s kapitolou 4.1.1.3 a kapitolou 3.2.1.3.

#### **4.2.1.4. MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK**

Model okrajových podmínek je shodný s modelem z kapitoly 3.3.1.4.

#### **4.2.1.5. NASTAVENÍ PARAMETRŮ MODÁLNÍ ANALÝZY**

Metoda řešení: Damp

Počet vlastních tvarů: 25

Frekvenční rozsah: neomezeno

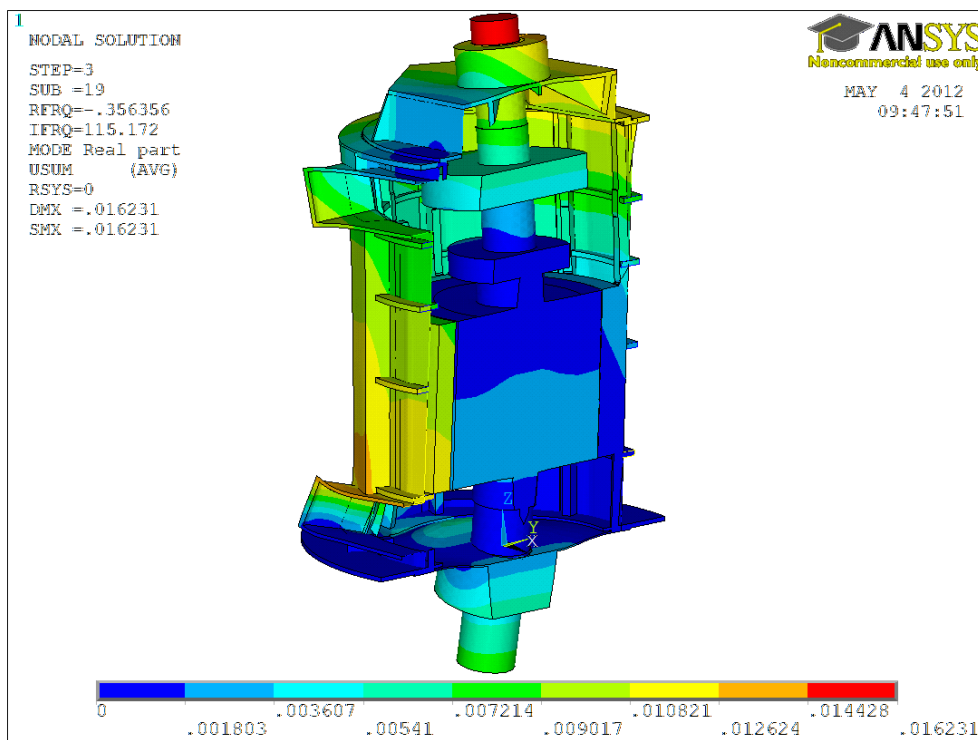
#### 4.2.2. VÝSLEDKY

Vlastní frekvence upraveného a původního generátoru jsou uvedeny v tabulce 4.2.

|                  | Vlastní frekvence [Hz] |                    |
|------------------|------------------------|--------------------|
|                  | Původní generátor      | Upravený generátor |
| 1. Vlastní tvar  | 5                      | 5                  |
| 2. Vlastní tvar  | 5,5                    | 5,5                |
| 3. Vlastní tvar  | 10                     | 10                 |
| 4. Vlastní tvar  | 10,3                   | 10,3               |
| 5. Vlastní tvar  | 17                     | 17                 |
| 6. Vlastní tvar  | 42                     | 42                 |
| 7. Vlastní tvar  | 42                     | 43                 |
| 8. Vlastní tvar  | 70                     | 74                 |
| 9. Vlastní tvar  | 72                     | 75                 |
| 10. Vlastní tvar | 108                    | 115                |
| 11. Vlastní tvar | 134                    | 138                |

Tab. 4.2 Hodnoty vlastních frekvencí

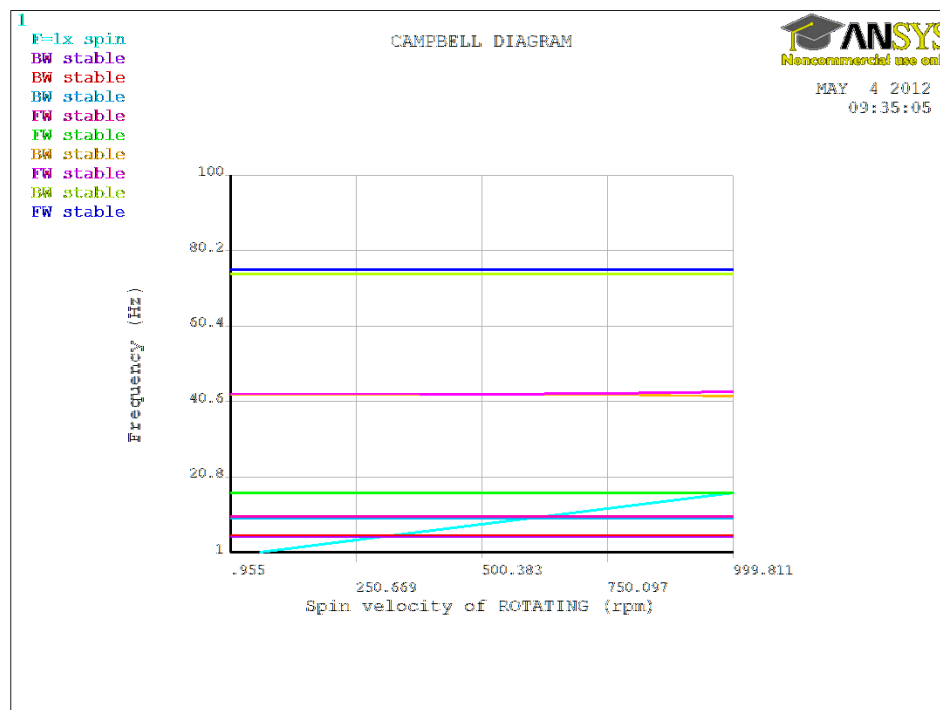
Z tabulky 4.2 je vidět, že vyztužení generátoru se projevilo až v osmém vlastním tvaru. Zvednutí vlastní frekvence desátého vlastního tvaru již splňuje požadovanou podmínku.



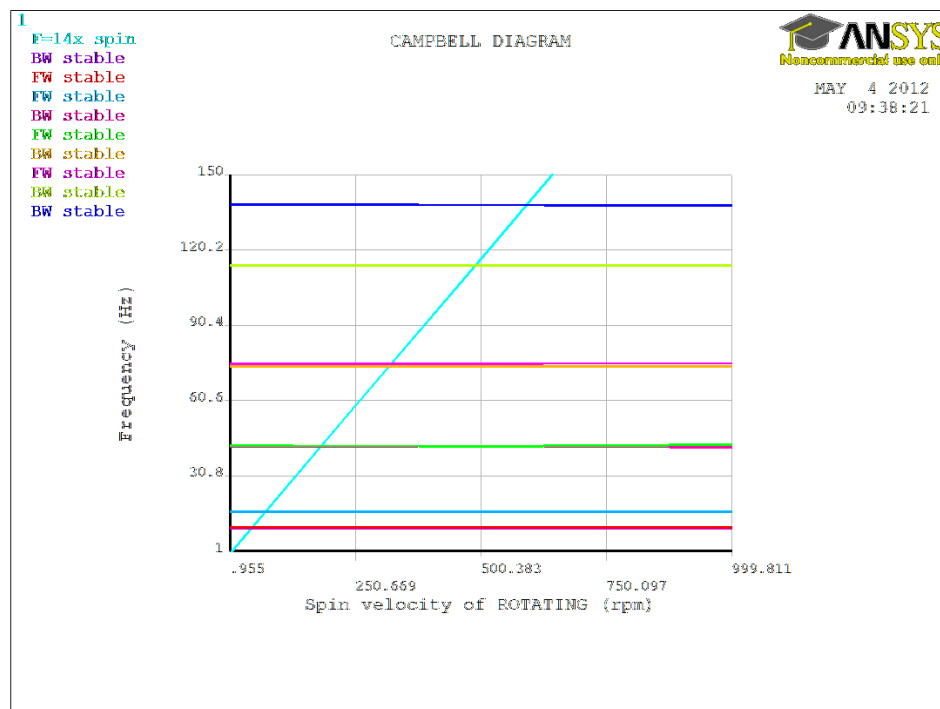
Obr. 4.5 Desátý vlastní tvar kmitání upraveného generátoru

## Campbellovy diagramy

Kritické otáčky pro budící frekvence 7,15 Hz a 100 Hz jsou vykresleny v Campbellových diagramech (obr. 4.6 a 4.7).



Obr. 4.6 Campbellův diagram pro budící frekvenci 7,15 Hz



Obr. 4.7 Campbellův diagram pro budící frekvenci 100 Hz

Kritické otáčky pro budící frekvenci 7,15 Hz a 100 Hz jsou zapsány v tabulce 4.3.

| Budící<br>frekvence [Hz] | Kritické otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ] |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                          | 7,15                                  | 311 | 330 | 598 | -   | -   | -   |
| 100                      | 71                                    | 182 | 183 | 318 | 322 | 493 | 592 |

Tab. 4.3 Hodnoty kritických otáček

Podmínka je, aby provozní otáčky byly o 10% nižší nebo vyšší než kritické. Provozní otáčky generátoru jsou  $429 \text{ min}^{-1}$ . Nejbližší kritické otáčky provozním otáčkám vyšly z Campellova diagramu  $493 \text{ min}^{-1}$ . Provozní otáčky jsou tedy nižší o 15%.

## 5. ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

### ZÁVĚR Z MODÁLNÍ ANALÝZY STATORU

Na statoru, vymodelovaného v programu ANSYS dle zadané geometrie, byla provedena modální analýza. Podmínkou pro vypočítané vlastní frekvence je, že musí být vyšší nebo nižší než budící alespoň o 10%. Výsledné vlastní frekvence pro všechny vlastní tvary splňovaly podmínku. Pouze v šestém vlastním tvaru kmitání statoru byla vlastní frekvence vyšší o 9%. Tedy šestý vlastní tvar a jeho příslušná vlastní frekvence nesplňuje podmínku.

### ZÁVĚR Z MODÁLNÍ ANALÝZY ROTORU

Rotor byl vymodelován v programu ANSYS dle zadané geometrie. Z Campbellových diagramů vyšly kritické otáčky nižší o 17% než provozní. Povolená hodnota je maximálně 10%. Při rozběhu a doběhu se přejíždějí dvoje kritické otáčky.

### ZÁVĚR Z MODÁLNÍ ANALÝZY STATORU S ROTOREM

Stator a rotor byl spojen dohromady a byla provedena modální analýza. Kritické otáčky z Campbellových diagramů jsou menší o 8%, než jsou provozní. Při rozběhu a doběhu se přejíždějí dvoje kritické otáčky. Z výsledků, které byly vypočítány softwarem ANSYS vyplývá, že generátor usazený za přírubu nevyhovuje podmínkám optimálního chodu v provozu.

### ZÁVĚR Z MODÁLNÍ ANALÝZY STATORU S PODPĚRAMI

Počet podpěr značně měnil vlastní frekvence a vznikly i nové vlastní tvary. Čím méně bylo použito podpěr, tím se stávala soustava poddajnější. Vlastní tvary a jejich příslušné vlastní frekvence s různou variantou natočení podpěr se měnily minimálně, vzhledem k použití různého počtu podpěr. Při použití čtyř nebo šesti podpěr byly všechny vlastní frekvence varianty II vyšší než u varianty I pro stejné vlastní tvary. Vlastní frekvence byla odlišná od budící minimálně o hodnotu 40 %. Usazení statoru na osmi podpěrách byly vlastní frekvence u devátého vlastního tvaru pro variantu I nižší o 8% a u varianty II nižší o 14%. Pouze devátá vlastní frekvence varianty II pro osm podpěr nesplňuje podmínku.

### ZÁVĚR Z MODÁLNÍ ANALÝZY STATORU A ROTORU S PODPĚRAMI

Přidáním rotoru do statoru s podpěrami se opět vlastní frekvence snížily oproti ukotvenému generátoru za celou plochu příruby. Všechny vlastní frekvence u variant I a II se mezi sebou lišily o hodnotu 1 až 6 Hz. Ale z výsledků nelze určit, která varianta je tužší a která poddajnější, protože některé hodnoty vlastních frekvencí pro určité vlastní tvary jsou vyšší ve variantě I než ve variantě II a u jiných vlastních tvarů zase naopak. Kritické otáčky usazeného generátoru na čtyřech a šesti podpěrách splňují podmínku. Při použití osmi podpěr

ve variantě I vyšly kritické otáčky nižší o 8% a ve variantě II nižší o 14% než provozní. Pouze modifikace s osmi podpěrami ve variantě I nesplňuje podmínku.

### **ZÁVĚR Z MODÁLNÍ ANALÝZY UPRAVENÉHO STATORU**

Vyztužení statoru bylo provedeno ve dvou krocích. Tloušťka plechu ve spodní části statoru byla zvýšena z 5mm na 20mm a bylo přidáno šest přidavných žeber po obvodu generátoru. Toto vyztužení zvedlo vlastní frekvenci šestého vlastního tvaru z hodnoty 109 Hz na hodnotu 117 Hz, která je vyšší než budící frekvence o 17 %.

### **ZÁVĚR Z MODÁLNÍ ANALÝZY UPRAVENÉHO STATORU S ROTOREM**

Rotor byl přidán do upraveného statoru a byla provedena modální analýza. Díky vyztužení byla vlastní frekvence desátého vlastního tvaru posunuta k vyšším hodnotám a tím byly i zvednuty kritické otáčky z původní hodnoty  $463 \text{ min}^{-1}$  na hodnotu  $493 \text{ min}^{-1}$ . Kritické otáčky jsou vyšší než provozní o 15%.

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Smejkal, J.: ELEKTROTECHNIKA, Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUT Brno, 1991, ISBN 80-214-0388-8
- [2] Petruška, J.: MKP v inženýrských výpočtech, výuková opora
- [3] ANSYS reference manual, ANSYS, Inc., 2010
- [4] Kocman, S.: Synchronní stroje, Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB – TU Ostrava, 2004, fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\_FS/prednasky/sylab\_synchronni%20stroje\_bc%20FS.pdf
- [5] Kratochvíl, C., Slavík, J.: Mechanika těles – Dynamika, Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství CERM, 2002, ISBN 80-214-2260-2
- [6] Petruška, J.: Nelineární úlohy v MKP, výuková opora
- [7] Janíček, P.: Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky - hledání souvislostí, Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2007, ISBN 978-80-7204-554-9

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| $f$                                     | frekvence                            |
| $p$                                     | počet pólových dvojic                |
| $n_1$                                   | otáčky rotoru                        |
| $\Pi$                                   | celková potencionální energie        |
| $W$                                     | energie napjatosti                   |
| $P$                                     | potenciál vnějšího zatížení          |
| $\tilde{u}_i, \tilde{v}_j, \tilde{w}_k$ | funkce posuvů                        |
| $u^T$                                   | sloupcová matice posuvů              |
| $\varepsilon^T$                         | sloupcová matice přetvoření          |
| $\sigma^T$                              | sloupcová matice napětí              |
| $o^T$                                   | sloupcová matice objemových zatížení |
| $p^T$                                   | sloupcová matice plošných zatížení   |
| $f_{\text{budící}}$                     | budící frekvence                     |