



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

# POSOUZENÍ VLIVU TUHOSTI LOŽISKOVÝCH ŠTÍTŮ A KVALITY VYVÁŽENÍ NA VIBRACE SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

EFFECT OF THE BEARING SHIELDS STIFFNESS AND BALANCE QUALITY ON SYNCHRONOUS  
GENERATOR VIBRATION

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Čepica

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Lošák, Ph.D.

BRNO 2016



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Bc. Vojtěch Čepica</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Lošák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

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:

## **Posouzení vlivu tuhosti ložiskových štítů a kvality vyvážení na vibrace synchronního generátoru**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Vibrace rotačních strojů jsou vždy nežádoucím jevem. Kromě zvýšené úrovně hluku mohou vést až poškození stroje. Proto je nutné věnovat zvýšenou pozornost predikci rezonančních stavů a pokusit se je drobnými konstrukčními změnami eliminovat. Tato diplomová práce si klade za cíl provést studii vlivu tuhosti ložiskových štítů synchronního generátoru na vibrace stroje. V úvahu bude vzata i kvalita vyvážení rotoru.

### **Cíle diplomové práce:**

- 1) Na základě konstrukční dokumentace vytvořit konečnoprvkový model celého stroje v prostředí ANSYS.
- 2) Provést modální analýzu a stanovit vlastní frekvence stroje.
- 3) Stanovit velikost maximální hodnoty nevyvážku dle ISO 1940.
- 4) Stanovit harmonickou analýzu chvění stroje v definovaných bodech pro rozsah otáček (0-2160 ot./min). Chvění vyjádřit v efektivních hodnotách výchylky, rychlosti a zrychlení.
- 5) Variovat tuhost štítů (tloušťkou základní desky, případně žeber) a stanovit závislost chvění na tuhosti při nominálních otáčkách.
- 6) Optimalizovat tuhost štítů z hlediska nákladů při splnění limitů vibrací dle IEC 60034-14

### **Seznam literatury:**

- Rao J.S., (1991): Rotor Dynamics, Wiley Eastern Limited, New Delhi, India
- Ewins D., Rao S S., (2002): Encyklopedia of Vibration, Academic Press

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Hlavním cílem této diplomové práce je posouzení vlivu tuhosti ložiskových štítů synchronního generátoru na vibrace stroje. Motivací pro vypracování této práce je problémová situace, která je charakterizována velkými vibracemi synchronního generátoru. Cílem práce je variovat tuhost štítů a stanovit závislost chvění na tuhosti při nominálních otáčkách. K řešení problému byl použit program ANSYS založený na metodě konečných prvků.

## **ABSTRACT**

The main focus of my master thesis is the assessment of effects of the bearing shields stiffness and balance quality on synchronous generator vibration. The incentive of writing the thesis is the problematic situation, which is characterized by synchronous generator vibration. The aim of my thesis is to variate shields stiffness and to find out the dependence of vibration on stiffness during nominal speed. I have used the program ANSYS based on finite element method to solve this problem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Synchronní generátor, modální analýza, harmonická analýza, MKP

## **KEYWORDS**

Synchronous generator, modal analysis, harmonic analysis, MKP



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČEPICA, V. *Posouzení vlivu tuhosti ložiskových štítů a kvality vyvážení na vibrace synchronního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Lošák, Ph.D..





## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Posouzení vlivu tuhosti ložiskových štítů a kvality vyvážení na vibrace synchronního generátoru“ tvořil samostatně po konzultacích a s využitím odborné literatury.

V Brně dne 27. 5. 2016

.....

Vojtěch Čepica



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Lošákovi, Ph.D. a panu Ing. Karlu Fučíkovi za jejich ochotu, rady, cenné připomínky a poskytnutou pomoc při zpracování této práce. Také bych rád poděkoval své rodině, která mi byla po celou dobu studia velkou oporou.



# OBSAH

<b>1.</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>16</b>
<b>2.</b>	<b>FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.</b>	<b>Cíle řešení.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.</b>	<b>Systém podstatných veličin.....</b>	<b>17</b>
2.2.1.	Veličiny popisující prvky okolí objektu (S0) .....	17
2.2.2.	Veličiny komplexně popisující objekt (S1).....	18
2.2.3.	Vazbové a interakční veličiny objektu s okolím (S2).....	18
2.2.4.	Aktivační veličiny objektu s okolím (S3) .....	18
2.2.5.	Veličiny ovlivňující objekt a na něm probíhající procesy (S4).....	18
2.2.6.	Strukturně-vlastnostní veličiny objektu (S5).....	18
2.2.7.	Veličiny popisující procesy a stavy objektu (S6) .....	22
2.2.8.	Veličiny vyjadřující projevy objektu (S7).....	22
2.2.9.	Veličiny popisující důsledky projevů objektu (S8) .....	22
2.2.10.	Problém přímý či nepřímý? .....	22
<b>3.</b>	<b>POPIS ELEKTRICKÉHO GENERÁTORU .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.</b>	<b>Rotor .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.</b>	<b>Stator.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.</b>	<b>Ložiskové štíty.....</b>	<b>24</b>
<b>3.4.</b>	<b>Ventilace.....</b>	<b>24</b>
<b>4.</b>	<b>MODÁLNÍ ANALÝZA SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.</b>	<b>Model materiálových vlastností.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.</b>	<b>Model geometrie .....</b>	<b>25</b>
4.2.1.	Varianta II.....	26
4.2.2.	Varianta III .....	26
4.2.3.	Varianta IV .....	26
4.2.4.	Varianta V .....	26
4.2.5.	Varianta VI .....	26
4.2.6.	Varianta VII.....	26
4.2.7.	Tvorba konečnoprvkové sítě .....	27
<b>4.3.</b>	<b>Model okrajových podmínek.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4.</b>	<b>Použitý výpočtový hardware a software .....</b>	<b>32</b>
<b>4.5.</b>	<b>Nastavení parametrů modální analýzy .....</b>	<b>32</b>
<b>4.6.</b>	<b>Výsledky modální analýzy .....</b>	<b>33</b>

4.6.1.	Varianta I.....	33
4.6.2.	Varianta II.....	35
4.6.3.	Varianta III.....	35
4.6.4.	Varianta IV.....	35
4.6.5.	Varianta V.....	36
4.6.6.	Varianta VI.....	36
4.6.7.	Varianta VII.....	36
<b>5.</b>	<b>HARMONICKÁ ANALÝZA SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU....</b>	<b>37</b>
<b>5.1.</b>	<b>Model materiálových vlastností.....</b>	<b>37</b>
<b>5.2.</b>	<b>Model geometrie .....</b>	<b>37</b>
5.2.1.	Tvorba konečnoprvkové sítě .....	37
<b>5.3.</b>	<b>Model okrajových podmínek.....</b>	<b>37</b>
5.3.1.	Výpočet dovolené zbytkové nevývahy .....	37
<b>5.4.</b>	<b>Výpočtový hardware a software.....</b>	<b>37</b>
<b>5.5.</b>	<b>Nastavení parametrů harmonické analýzy .....</b>	<b>37</b>
<b>5.6.</b>	<b>Výsledky harmonické analýzy.....</b>	<b>38</b>
5.6.1.	Varianta I.....	38
5.6.2.	Varianta II.....	40
5.6.3.	Varianta III.....	41
5.6.4.	Varianta IV.....	43
5.6.5.	Varianta V.....	45
5.6.6.	Varianta VI.....	46
5.6.7.	Varianta VII.....	48
<b>6.</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>50</b>
<b>7.</b>	<b>VLIV ÚPRAV NA VÝROBNÍ NÁKLADY .....</b>	<b>55</b>
<b>8.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>62</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>63</b>
	<b>GEOMETRICKÉ VARIANTY GENERÁTORU.....</b>	<b>64</b>

<b>VLASTNÍ TVARY KMITÁNÍ GENERÁTORU .....</b>	<b>68</b>
<b>VÝSLEDKY HARMONICKÉ ANALÝZY .....</b>	<b>75</b>
<b>Rychlosti pro variantu I.....</b>	<b>75</b>
<b>Rychlosti pro variantu II .....</b>	<b>76</b>
<b>Rychlosti pro variantu III.....</b>	<b>77</b>
<b>Rychlosti pro variantu IV .....</b>	<b>78</b>
<b>Rychlosti pro variantu V .....</b>	<b>79</b>
<b>Rychlosti pro variantu VI.....</b>	<b>80</b>
<b>Rychlosti pro variantu VII .....</b>	<b>81</b>
<b>Zrychlení pro variantu I.....</b>	<b>82</b>
<b>Zrychlení pro variantu II .....</b>	<b>83</b>
<b>Zrychlení pro variantu III.....</b>	<b>84</b>
<b>Zrychlení pro variantu IV .....</b>	<b>85</b>
<b>Zrychlení pro variantu V.....</b>	<b>86</b>
<b>Zrychlení pro variantu VI.....</b>	<b>87</b>
<b>Zrychlení pro variantu VII.....</b>	<b>88</b>

## 1. ÚVOD

Elektrická energie se stala pro moderní společnost zavedeným standardem, bez kterého bychom se už jen stěží dokázali obejít. V současné době je na ní více či méně závislá téměř každá naše činnost. Výroba elektrické energie, ať už je to v elektrárnách tepelných, jaderných, vodních nebo větrných, se neobejde bez generátoru elektrické energie. Je to jedna z hlavních součástí při výrobě elektrické energie. Ve většině případů je připojen k turbíně a přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou. Tento způsob výroby elektrické energie ve světě stále převládá.

Jednou z neoddelitelných fází návrhu téměř všech výrobků je ve spoustě případů i jejich výpočtová analýza. Konstruktor by měl svou myšlenku realizace řešení určitého problému, kterou převede do podoby reálného výrobku, podrobit ještě před výrobou výpočtovému procesu tak, aby součást splňovala požadované vlastnosti. Jedním z neefektivnějších způsobů provedení pevnostní, dynamické nebo termální analýzy a je v současnosti metoda konečných prvků, která šetří mnoho času, financí a zefektivňuje celkový proces návrhu.

Záměrem této práce je posouzení vlivu tuhosti ložiskových štítů na vibrace synchronního generátoru. V úvodu je stručně zmíněna konstrukce synchronních generátorů. Tato kapitola nemá za úkol popsat celkovou konstrukci synchronního generátoru, ale spíše přiblížit funkci a uspořádání jednotlivých součástí.

S touto otázkou úzce souvisí kapitola věnující se systému podstatných veličin, která se snaží postihnout všechny významné veličiny související s daným problémem. Jsou v něm zmíněny všechny podstatné veličiny, které si nemůžeme z určitých důvodů ve výpočtu dovolit zanedbat.

Ústřední částí je ovšem samotný výpočet sestávající z modální a harmonické analýzy. Úvod této kapitoly se věnuje tvorbě výpočtového modelu v prostředí programu ANSYS, kde je stručně popsán postup vytváření výpočtového modelu. Hlavními výstupy z modální analýzy jsou vlastní frekvence a vlastní tvary stroje, které poskytují základní představu o dynamickém chování stroje. Následuje harmonická analýza, kterou lze stanovit velikost výchylky, rychlosti a zrychlení v závislosti na frekvenci při ustáleném kmitání a určit, které frekvence mohou být v provozu nebezpečné.

Při provozu strojů je zapotřebí se vyhnout situaci, kdy budící frekvence je stejná nebo velmi blízká vlastní frekvenci stroje tzv. rezonanci. Při rezonanci dochází k výrazným výchylkám. V praxi je proto nezbytné se vyhnout provozním stavům, kdy dochází k buzení vlastních frekvencí stroje.

Na závěr byly porovnány a zhodnoceny jednotlivé konstrukční varianty z hlediska velikosti výchylky, rychlosti a zrychlení. Bylo provedeno vyhodnocení jednotlivých konstrukčních řešení a diskuze, jak případné změny v geometrii ovlivnily odezvu ustáleného kmitání.



## 2. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

Vibrace rotačních strojů jsou téměř vždy nežádoucím jevem. Kromě zvýšené úrovně hluku mohou vést často ke snížení životnosti nebo k poškození stroje. Proto je nutné věnovat zvýšenou pozornost predikci rezonančních stavů a pokusit se je vhodnými konstrukčními změnami eliminovat. Tato diplomová práce si klade za cíl provést studii vlivu tuhosti ložiskových štítů synchronního generátoru na vibrace stroje a posoudit, které konstrukční změny na ložiskových štítech jsou z hlediska snižování vibrační celého stroje nejvýhodnější.

### 2.1. Cíle řešení

1. Na základě konstrukční dokumentace vytvořit konečnoprvkový model celého stroje v prostředí ANSYS
2. Provést modální analýzu a stanovit vlastní frekvence stroje
3. Stanovit velikost maximální hodnoty nevyvážky dle ISO 1940
4. Stanovit harmonickou analýzou chvění stroje v definovaných bodech pro rozsah otáček (0-2160 ot./min). Chvění vyjádřit v efektivních hodnotách výchylky, rychlosti a zrychlení
5. Variovat tuhost štítů (tloušťkou základní desky, případně žeber) a stanovit závislost chvění na tuhosti při nominálních otáčkách
6. Optimalizovat tuhost štítů z hlediska nákladů při splnění limitů vibrační dle IEC 60034-14

### 2.2. Systém podstatných veličin

Systém podstatných veličin by měl zahrnovat všechny veličiny, které popisují podstatné okolnosti z hlediska řešení problému. Je rozdělen do devíti podmnožin (S0-S8), které jsou vypsány v textu níže. Je třeba si uvědomit, že zanedbáním podstatné veličiny se dopouštíme základní chyby modelování, která vede k nesprávným výsledkům [1].

Objekt - Konečnoprvkový model štítu synchronního generátoru

Soustava - Synchronní generátor

Systém - Konečnoprvkový model synchronního generátoru

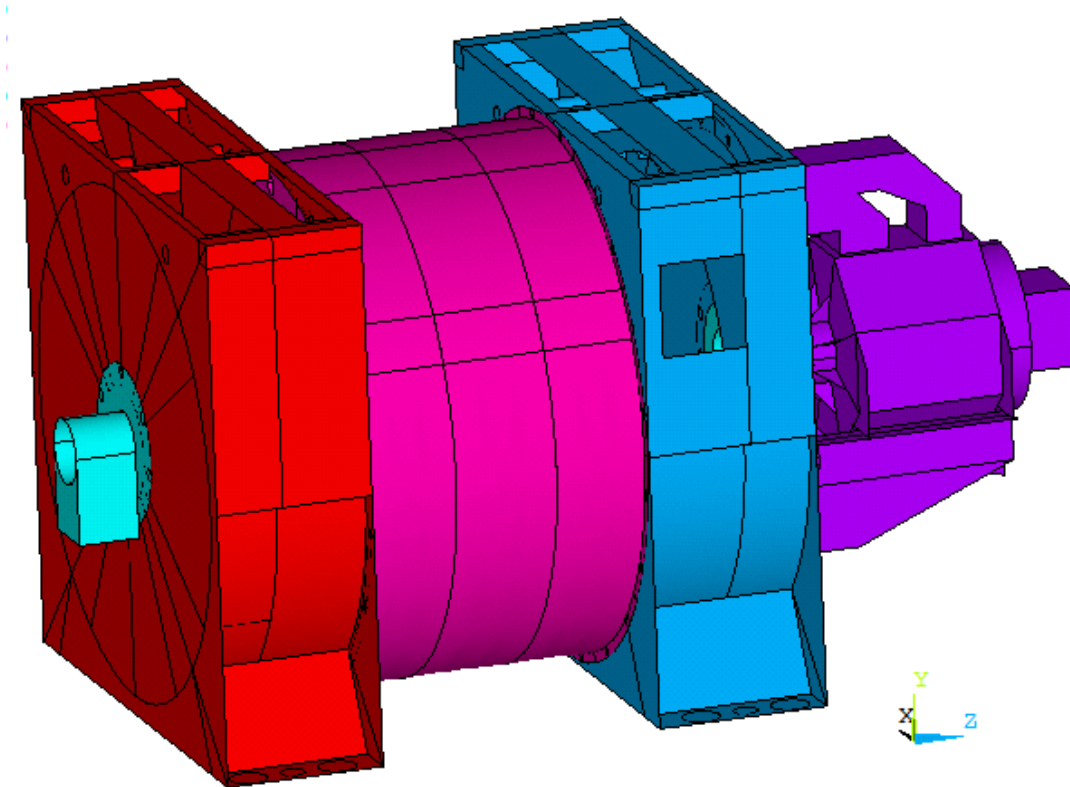
#### 2.2.1. Veličiny popisující prvky okolí objektu (S0)

Každý z obou štítů generátoru je pevně uchycen pomocí šroubů k podlaze. Jednotlivé části (štít, stator, externí budič) celé sestavy synchronního generátoru jsou navzájem spojeny šroubovým spojením. Na čelní desce obou štítů jsou přišroubována kluzná ložiska, v kterých je uchycena hřídel rotoru generátoru. Mezi štíty generátoru se nachází stator, který je ke každému štítu přichycen šrouby. Na pravý štít je ještě přichycen externí budič také pomocí šroubového spojení.

### 2.2.2. Veličiny komplexně popisující objekt (S1)

#### Geometrie

Model geometrie byl vytvořen pomocí APDL (Ansys parametric design language) v programu ANSYS (Obr. 1) na základě dodané výkresové dokumentace.



Obr. 1 Model geometrie generátoru

### 2.2.3. Vazbové a interakční veličiny objektu s okolím (S2)

Jedná se o podněty či příčiny, které vyjadřují aktivaci objektu s okolím. Reálné vazby jsou nahrazeny příslušnými okrajovými podmínkami. V našem případě předepsanými posuvy.

### 2.2.4. Aktivační veličiny objektu s okolím (S3)

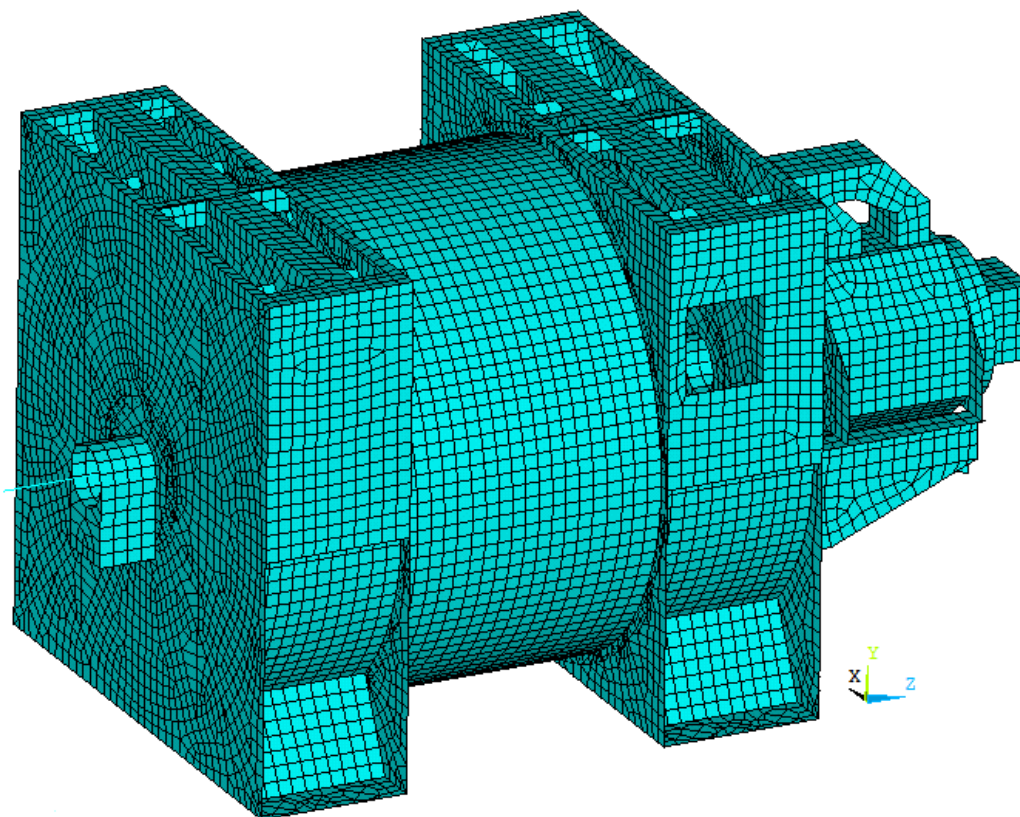
Objekt je z okolí aktivován rotací hřídele generátoru.

### 2.2.5. Veličiny ovlivňující objekt a na něm probíhající procesy (S4)

Kvůli rotaci hřídele generátoru a určité zbytkové velikosti nevyvážku vznikají přidavné odstředivé síly. Tyto odstředivé síly jsou budící silou působící na entitu. Gravitační a elektromagnetické síly nebudeme z hlediska řešení daného úkolu považovat za podstatné.

### 2.2.6. Strukturně-vlastnostní veličiny objektu (S5)

Model geometrie byl v případě numerického řešení nahrazen sítí konečných prvků (Obr. 2).



Obr. 2 Konečnoprvková síť generátoru

### Model materiálu

Jako model materiálu byl použit izotropní, homogenní, lineárně-elastický materiál, který se chová jako Hookovský v celém svém rozsahu. Nezbytné materiálové charakteristiky potřebné pro modální a harmonickou analýzu vstupující do výpočtu jsou Youngův modul pružnosti, Poissonův poměr a hustota materiálu, které jsou uvedeny v (Tab. 1).

Tab. 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu

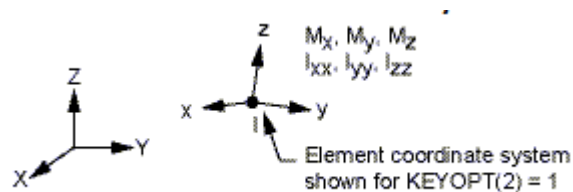
$E$ [GPa]	$\mu$ [1]	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]
210	0,3	7850

### Použité typy konečných prvků

Dokumentace v nápovědě [2] k výpočtovému software ANSYS 14.5 popisuje použité prvky následovně:

### Mass 21

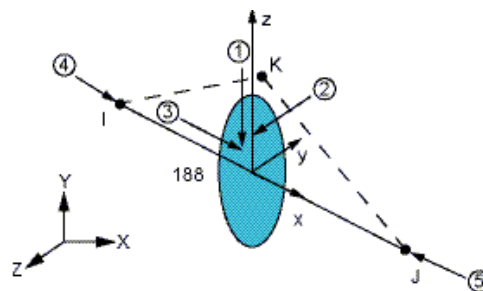
Mass 21 je bodový prvek, který může mít až šest stupňů volnosti (posuvy ve směru „x“, „y“ a „z“ a rotace kolem těchto os). Hmotnost a moment setrvačnosti může být přiřazen nezávisle každému směru.



Obr. 3 Prvek Mass 21 [2]

### Beam 188

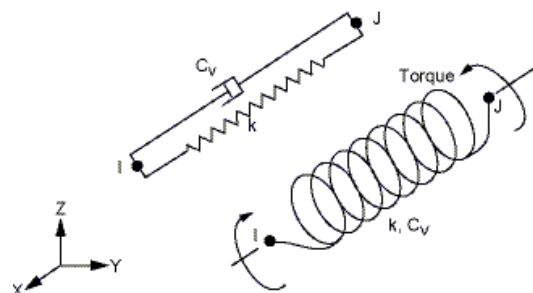
Beam 188 je prostorový prvek vhodný pro analýzu nosníků. Prvek má dva uzly s šesti nebo sedmi stupni volnosti (posuvy ve směru „x“, „y“ a „z“ a rotace kolem těchto os, sedmý stupeň volnosti je volitelný).



Obr. 4 Prvek Beam 188 [2]

### Combin 14

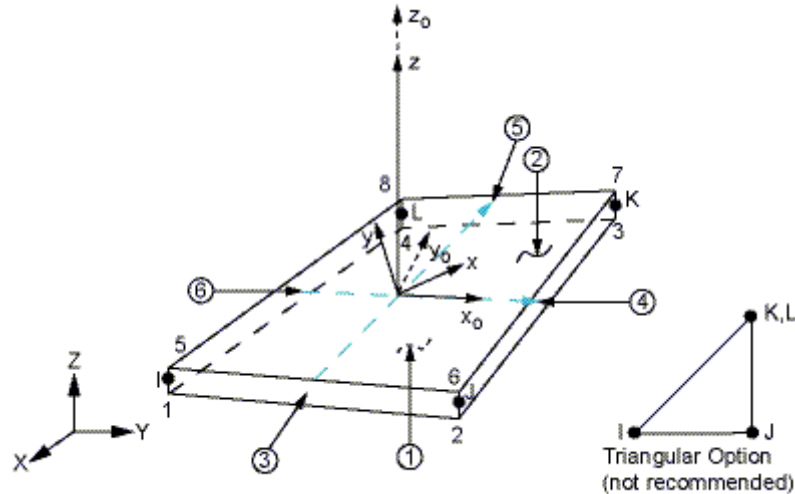
Combin 14 lze využít jako pružný prvek v axiálním nebo torzním smyslu, přičemž ohybová tuhost je nulová. Může být využit jak v 1D, 2D nebo i 3D úloze. Lze mu předepsat tuhost a koeficient tlumení. Má dva uzly s třemi stupni volnosti (posuvy ve směru „x“, „y“ a „z“ nebo rotace kolem těchto os, pokud se jedná o torzní variantu tlumiče) a má nulovou hmotnost.



Obr. 5 Prvek Combin 14 [2]

### Shell 181

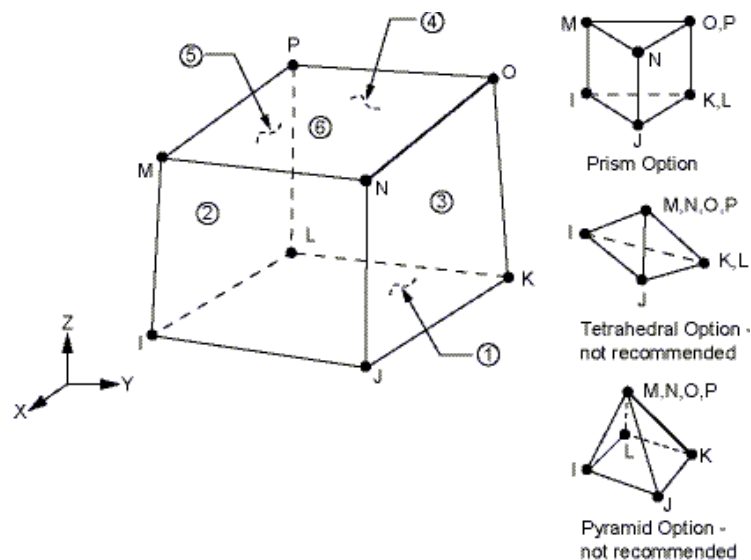
Shell 181 je prostorový prvek vhodný pro analýzu tenkých až středně tlustých skořepinových konstrukcí. Prvek má čtyři uzly ve vrcholech prvku. Každý uzel má šest stupňů volnosti (posuvy ve směru „x“, „y“ a „z“ a rotace kolem těchto os).



Obr. 6 Prvek Shell 181 [2]

### Solid 185

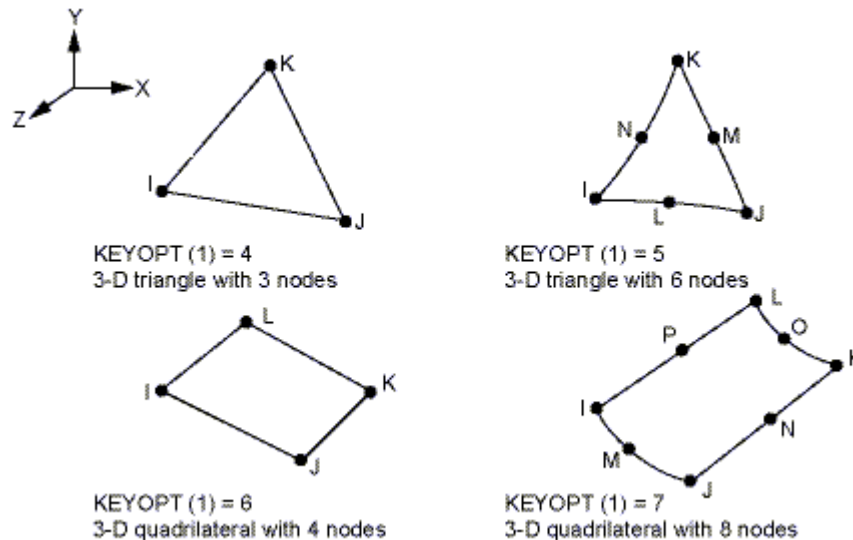
Solid 185 je prostorový prvek s osmi uzly. Osm uzlů leží ve vrcholech prvku. Každý uzel má tři stupně volnosti (posuvy ve směru „x“, „y“ a „z“). Prvek dokáže popsat plasticitu, hyperelasticitu, creep, deformační zpevnění, velké deformace a velká přetvoření.



Obr. 7 Prvek Solid 185 [2]

## Mesh 200

Mesh 200 se používá jako pomocný prvek pro vytvoření sítě s prvky a uzly. Prvkem Mesh 200 je vytvořena síť konečných prvků, která je následně přesít'ována jiným typem prvku. U prvku lze volit buď rovinný nebo prostorový prvek. Dále volíme množství uzlů na hranách prvku, podle toho je-li požadován lineární nebo kvadratický.



Obr. 8 Prvek Mesh 200 rovinný [2]

### 2.2.7. Veličiny popisující procesy a stavy objektu (S6)

Řešíme-li problém na makroúrovni mechaniky kontinua, což znamená, že se nezajímáme o ty procesy, které probíhají ve struktuře materiálu a vedou k vibracím synchronního generátoru, je tato množina prázdná.

### 2.2.8. Veličiny vyjadřující projevy objektu (S7)

Výstupy modální analýzy budou vlastní frekvence a vlastní tvary entity. Z harmonické analýzy obdržíme výchylku a rychlost vybraných bodů konstrukce v závislosti na frekvenci při ustáleném kmitání.

### 2.2.9. Veličiny popisující důsledky projevů objektu (S8)

Důsledkem budících sil může dojít k velkým vibracím celého stroje, což může vést k poruše nebo vzniku různých mezních stavů.

### 2.2.10. Problém přímý či nepřímý?

Dle předešlého systému podstatných a problémově orientovaných veličin na objektu je zřejmé, že se jedná o problém přímý, neboť je známá struktura objektu a příčiny vyvolávající změnu chování objektu. Cílem je stanovit a posoudit důsledky těchto příčin.

### 3. POPIS ELEKTRICKÉHO GENERÁTORU

Elektrický generátor je stroj, který mění mechanickou energii na energii elektrickou. K přeměně může docházet i v opačném smyslu, tedy se jedná o elektrický motor. V obou případech je využíván princip elektromagnetické indukce. Generátory vyráběné v Siemens Electric Machines Drásov jsou čtyř až dvanácti pólové synchronní generátory o výkonech od 3 do 25 MVA. Generátory ze závodu Drásov se využívají na největších dopravních a výletních lodích světa, ve vlacích, na ropných plošinách a v průmyslu. Provozní otáčky generátoru se liší podle toho, kolik mají pólů a do které elektrické sítě jsou připojeny. Pro čtyřpólové je to 1800 případně 1500 otáček za minutu. Mezi hlavní části synchronního generátoru patří rotor, stator, ložiskové štíty, externí budič a ventilace.[4]



Obr. 9 Generátor typ IDU [3]

#### 3.1. Rotor

Rotor je sestaven z hřídele a rotorových plechů s drážkami pro vinutí uložených s přesahem na hřídeli. Na hřídeli se buďto svařováním nebo pomocí frézování vytvoří podélné drážky, které slouží ke chlazení rotoru. Plechy jsou tlusté několik desetin milimetru a jsou od sebe navzájem odizolovány.[5]



Obr. 10 Rotor [3]



### 3.2. Stator

Stator je vyroben jako svařovaná konstrukce, ve které je uložen statorový svazek opatřený vinutím. Je uložen mezi dvěma ložiskovými štíty, ke kterým je přišroubován.



Obr. 11 Stator [9]

### 3.3. Ložiskové štíty

Na ložiskové štíty jsou přišroubovány kluzná nebo kuličková ložiska, ve kterých je uložena hřídel rotoru. V ložiskových štítech jsou patky pro uchycení stroje k podlaze.



Obr. 12 Ložiskový štít

### 3.4. Ventilace

Téměř v každém stroji vzniká vlivem elektrických ztrát značné teplo. Pro zamezení přílišného zahřívání stroje je nutné jej chladit. Převážná většina elektrických strojů je chlazená proudem vzduchu nebo i jiného plynu (např. vodíkem). Někdy jsou nejvíce zahřívající části stroje chlazené vodou.



## 4. MODÁLNÍ ANALÝZA SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

Modální analýza slouží k získání základních dynamických vlastností stroje, obvykle ještě během vývoje stroje. Často slouží jako výchozí krok před dalšími analýzami jako je například harmonická, transientní nebo spektrální analýza. Výstupy z modální analýzy jsou vlastní frekvence a vlastní tvary stroje. Je důležité znát tyto charakteristiky, aby se předešlo situaci, kdy budící a vlastní frekvence budou velmi blízké a mohlo by dojít k rezonanci a třeba i ke zničení celé konstrukce. Je možné také provést modální analýzu na předepjaté konstrukci, jako jsou například rotující lopatky turbíny. Pro tlumenou modální analýzu se vlastní frekvence a tvary stávají komplexní. U rotujících částí mohou být do modální analýzy zahrnuty i gyroskopické účinky, které ovlivňují tlumení. Hodnota tlumení se mění také, jsou-li přítomna ložiska, zejména kluzná.[2]

### 4.1. Model materiálových vlastností

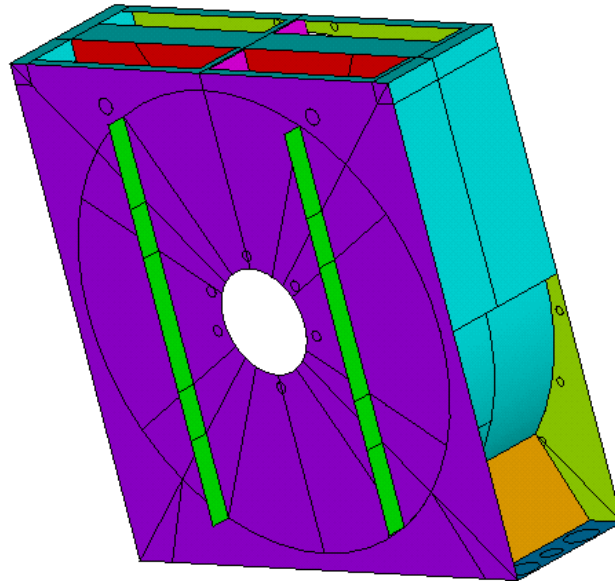
Model materiálu byl jak pro synchronní generátor, tak pro hřídel rotoru použit stejný. Byl uvažován homogenní, izotropní, lineárně elastický materiál, pro jehož popis je potřeba dvou parametrů. Jsou to Youngův modul pružnosti v tahu a Poissonův poměr. Pro řešení modální analýzy je ještě zapotřebí i parametr popisující měrnou hmotnost, tedy hustotu materiálu. V případě generátoru i rotoru se jedná o ocel s materiálovými vlastnostmi uvedenými v Tab. 1.

### 4.2. Model geometrie

Model geometrie byl vytvářen na základě dodaných 3D modelů a výkresové dokumentace. Z dodaných 3D modelů a výkresů se odměřovaly rozměry pro tvorbu geometrie. Jednou z možností vytváření geometrie výpočtového modelu je připravit si model ve speciálních CAD programech a následně ho importovat do klasického prostředí programu ANSYS v odpovídajícím formátu. S tímto postupem však přichází i různá úskalí, především s velmi komplikovanými modely, které obsahují mnoho dílů, které nejsou z hlediska řešeného problému podstatné a jen by zvyšovaly výpočtovou náročnost. Proto je mnohdy užitečné vytvořit geometrii přímo v prostředí výpočtového softwaru. Je všeobecně známo, že pro analýzu dynamiky soustav pomocí metody konečných prvků je výhodnější vytvořit hrubou rovnoměrnou síť konečných prvků. Proto bylo při vytváření modelu geometrie třeba odstranit konstrukční detaily a entity, které mají nepodstatný vliv na dynamické vlastnosti soustavy. To znamená, že nedojde k výrazným změnám z hlediska hmotnosti a tuhosti entity. Při tvorbě geometrie přímo v klasickém prostředí programu ANSYS, je daná pevná hierarchie postupu vytváření modelu. Ta je tvořena čtyřmi entitami, kterými jsou body, čáry, plochy a objemy. V tomto pořadí byl vytvářen i model generátoru (Obr. 14). Nelze vytvořit čáru bez toho, aby se k ní nevytvořily dva body či plochu aniž by se vytvořily body a čáry, které jí náleží. Tvorba geometrie byla prováděna psáním posloupnosti jednotlivých příkazů pomocí APDL, bylo tedy vytvořeno makro. V některých případech se pro spojování jednotlivých ploch použily i booleovské operace. Jako například příkazy pro rozdělení nebo spojení ploch. A to jak z důvodu návaznosti jednotlivých ploch, tak i pro následné vytváření co nejrovnoměrnější sítě konečných prvků. Jednotlivé geometrické varianty generátoru, které byly porovnávány z hlediska velikosti výchylky a rychlosti jsou uvedeny v příloze. Jejich stručný popis je naznačen v následujících odstavcích.

#### 4.2.1. Varianta II

Oproti původní geometrické modifikaci obsahuje přidaná žebra na čele ložiskového štítu (Obr. 13).



Obr. 13 Přidaná žebra na ložiskovém štítu

#### 4.2.2. Varianta III

Stejně jako varianta II obsahuje žebra na čele ložiskového štítu, s tím rozdílem že mají dvojnásobnou výšku profilu.

#### 4.2.3. Varianta IV

Varianta IV má zvětšenou tloušťku přední desky levého ložiskového štítu (Obr. 48).

#### 4.2.4. Varianta V

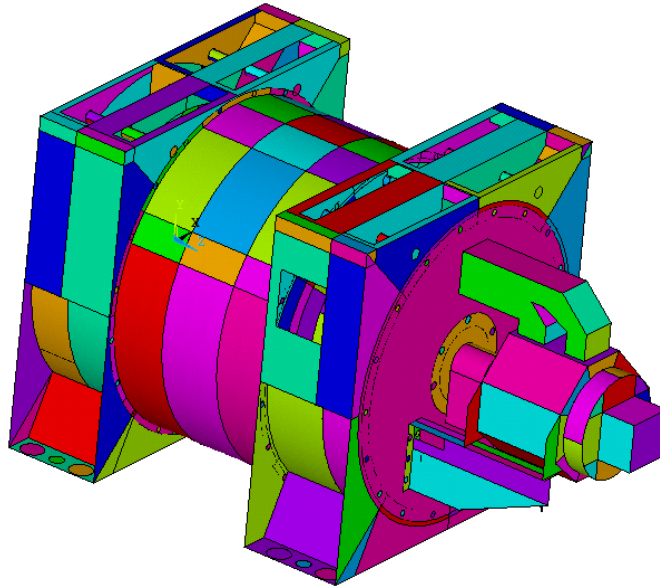
Varianta V má zvětšenou tloušťku přední desky levého ložiskového štítu a i tloušťku kruhové desky na pravém ložiskovém štítu (Obr. 49).

#### 4.2.5. Varianta VI

Tato varianta má jednak zmenšenou tloušťku levého předního ložiskového štítu a také přidaná žebra na předním štítu stejné velikosti jako obsahuje varianta II (Obr. 50).

#### 4.2.6. Varianta VII

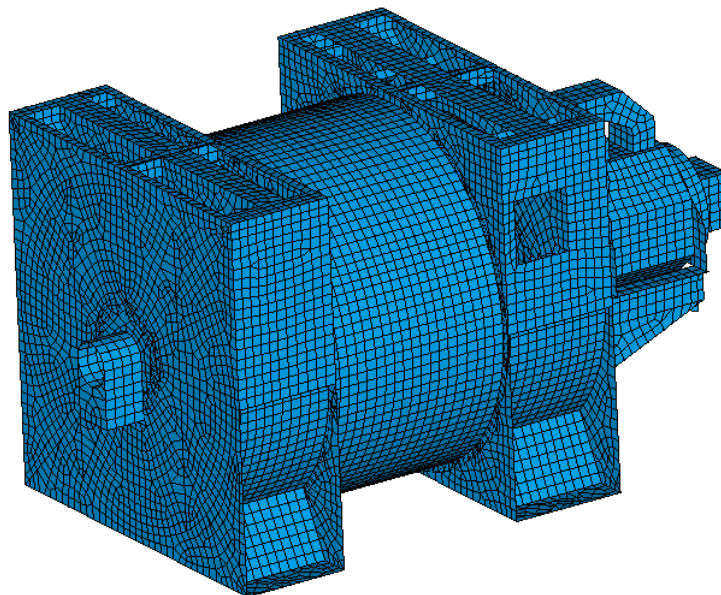
Poslední varianta obsahuje jiný typ ložiska, kvůli kterému musel být do určité míry upraven i otvor na ložiskovém štítu a místa pro uchycení ložiska na štítu (Obr. 51).



Obr. 14 Model geometrie generátoru

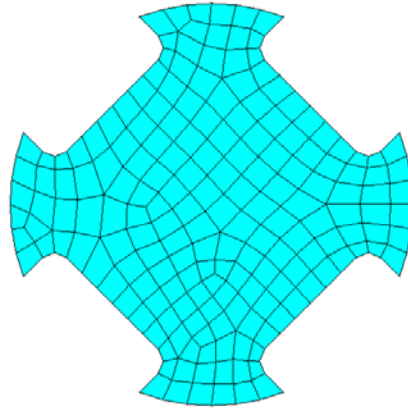
#### 4.2.7. Tvorba konečnoprvkové sítě

Pro vytvoření diskretizovaného modelu byly použity prvky uvedené v kapitole 2.2.6. Prvky solid 185 byly použity k vytvoření svazku plechů s vnutím pro stator a externí budič, na všechny ostatní vytvořené plochy generátoru byl použit prvek Shell 181, kterému byla přiřazena v nastavení „Section“ příslušná tloušťka stěny a model materiálu. Sít konečných prvků se vytvářela s požadavkem na co nejrovnoměrnější hrubou síť, která je pro úlohy dynamiky nejvhodnější. Cílem bylo vytvořit co nejvíce čtyřuzlových nedegenerovaných elementů sítě. Globální velikost hrany prvku pro generátor byla nastavena na 60 mm (Obr. 15). Velikost elementu na hřídeli byla zvolena 30 mm (Obr. 16).



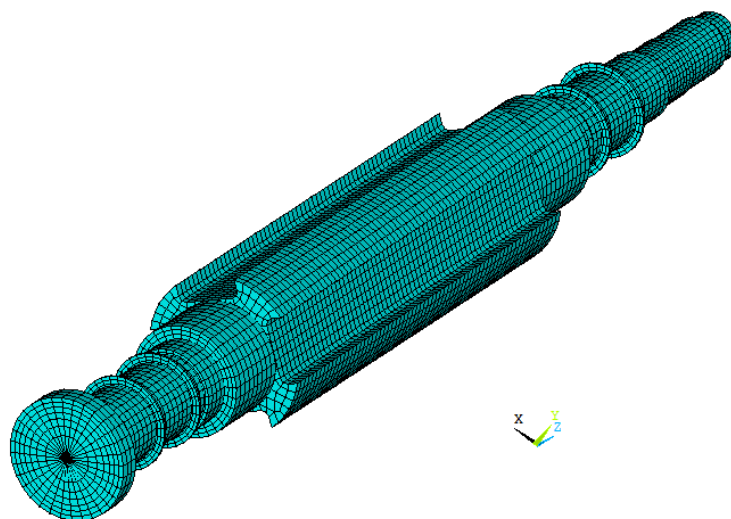
Obr. 15 Konečnoprvkový model generátoru bez hřídele

Hřídel rotoru byla modelována pomocí prvku Beam 188. Jednotlivé průřezy se přiřadily prvku Beam pomocí tzv. „Section“, kde byl zvolen tvar průřezu z nabízených možností a zároveň se stanovilo, jakým způsobem bude průřez rozdělen na jednotlivé elementy. Existuje i možnost vytvoření vlastního uživatelského průřezu.



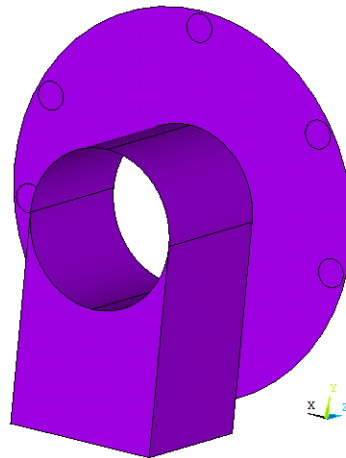
Obr. 16 *Uživatelský průřez s prvky MESH 200*

Ten se vytváří buďto importováním vytvořeného tvaru průřezu v CAD programu do softwaru ANSYS nebo jeho vymodelováním přímo v prostředí programu ANSYS. Následně je tento průřez vysítován speciálním prvkem MESH 200, který nemá žádná výstupní data a slouží jen pro vytvoření sítě (Obr. 16). Následně je průřez uložen do souboru s příponou .sect a může být načten jako uživatelský „Section“. Svazek plechů a vnutí rotoru, ventilátory, budič a usměrňovač na hřídeli, byly zjednodušeně modelovány pomocí prvku Mass 21. Byly umístěny do svých těžišť na ose hřídele a byla jim přiřazena hmotnost a momenty setrvačnosti, které byly uvedeny v dodané výkresové dokumentaci. Svazek plechů a vnutí bylo rozděleno do šesti prvků Mass 21 rovnoměrně rozložených kolem těžiště uvedeného ve výkresové dokumentaci, kvůli zrovnoměnění rozložené hmoty po délce hřídele.



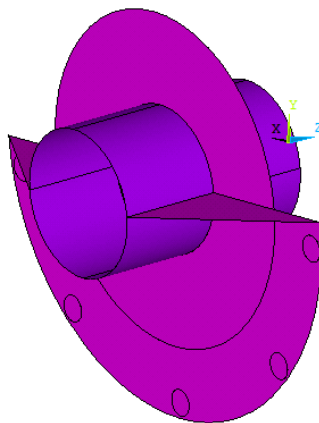
Obr. 17 *Konečnoprvkový model hřídele rotoru*

Kluzná ložiska byla modelována zjednodušeně pro potřeby výpočtu. Objem byl přizpůsoben tak, aby se zachovala skutečná hmotnost ložisek. Jejich tuhost a tlumení byly modelovány pomocí prvků COMBIN 14.



Obr. 18 *Model ložiska*

Pro variantu VII byl použit jiný typ ložiska. S tím souvisela i úprava ložiskového štítu, na kterém museli být vytvořen nový otvor a díry pro šrouby.



Obr. 19 *Model ložiska pro variantu VII*

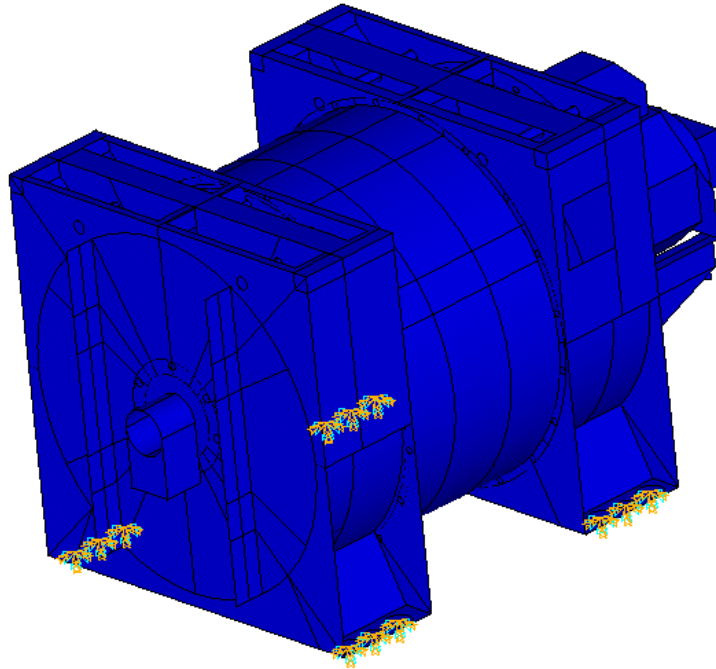
Celkový počet elementů použitých ve výpočtovém modelu se v jednotlivých variantách téměř neliší. V Tab. 2. je uveden počet elementů pro variantu I, tedy původní nemodifikovanou geometrii.

Tab. 2 *Informace o výpočtovém modelu*

Typ elementů	Počet elementů
Solid 185	4389
Shell 181	19519
Combin 14	4
Mass 21	6

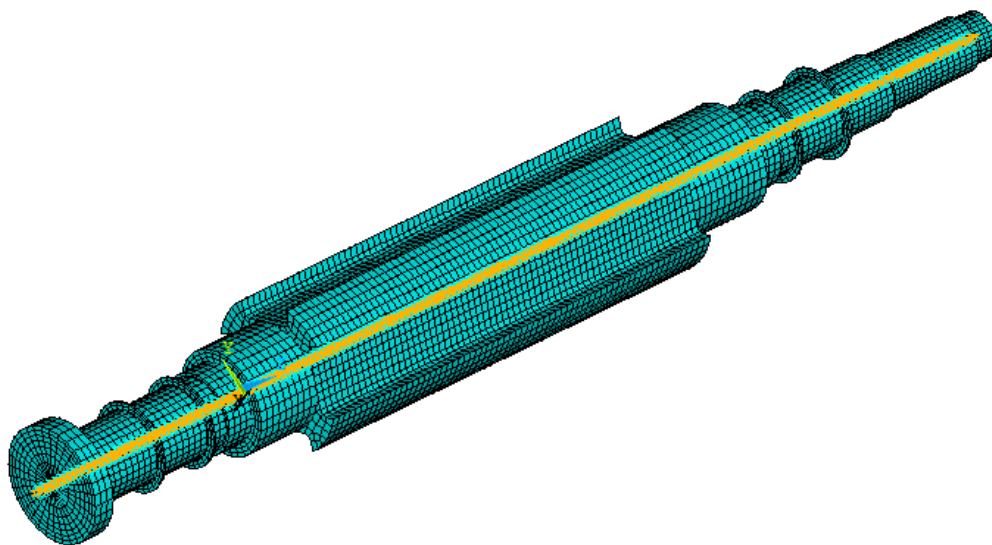
### 4.3. Model okrajových podmínek

Generátor je v provozu umístěn na betonové podložce, ke které je v příslušných místech na ložiskových štítech přišroubován. V těchto místech byl zamezen posuv ve všech osách a natočení kolem těchto os (Obr. 20).



Obr. 20 *Vetknutí ložiskových štítů*

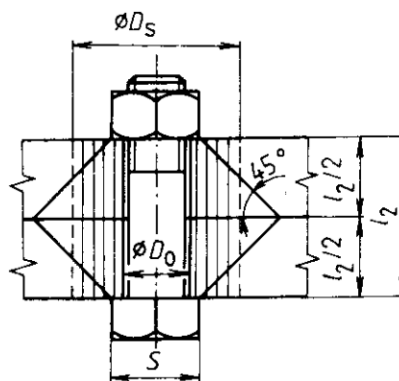
Dále byla omezena rotace hřídele kolem své osy a její posuv ve směru osy (Obr. 21). Jednotlivé celky konstrukce (ložiskové štíty, stator a externí budič) jsou navzájem spojeny pomocí šroubového spojení.



Obr. 21 *Okrajové podmínky na hřídeli generátoru*

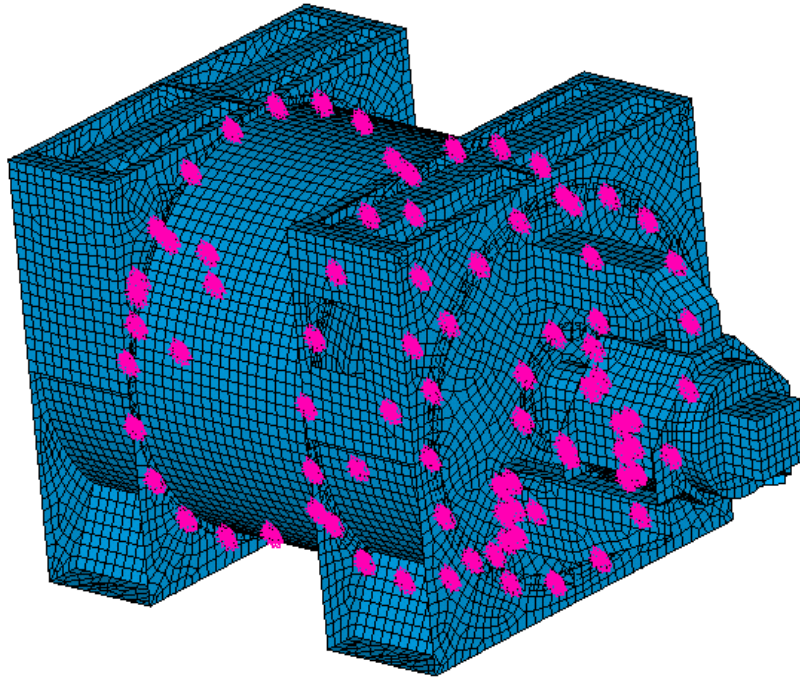
Šroubové spojení bylo modelováno za použití funkce „Rigid region“, která automaticky vygeneruje vazebné rovnice mezi danými uzly. Pro vytvoření vazeb je potřeba definovat tzv. „Master“ a „Slave“ uzly. V našem případě byly svázaný všechny stupně volnosti. Uzly pro vytvoření vazebných rovnic byly vybrány na předem připravených kruhových plochách v příslušných místech spojení na konstrukci. Plochy byly zjednodušeně vytvořeny s předpokladem, že jejich průměr bude mít velikost odpovídající tlakovému dvojkuželu s úhlem  $45^\circ$ , pro danou velikost šroubového spoje. Výpočet velikosti průměru kruhové plochy je uveden v rovnici (1). Těmito okrajovými podmínkami zaručíme, že je entitě zamezen pohyb jako celku.

$$D_s = s + \frac{l_2}{2} \quad (1)$$



Obr. 22 Tlakový kužel [6]





Obr. 23 Vytvoření spojů pomocí rigid region

#### 4.4. Použitý výpočtový hardware a software

Pro výpočet a zpracování dat byly použity počítače v počítačové učebně ústavu mechaniky těles.

##### Použitý hardware

- Procesor : Intel(R) Core(TM) i5 - 3210M CPU @ 2.5GHz
- Paměť: 8 GB RAM

K načtení a odměření geometrických modelů obdržných ve formátu \*.step byl použit CAD systém Inventor. Program Ansys byl použit pro veškeré výpočty a analýzy. K vytváření pomocných maker byl použit textový editor PSPad. Pro vyhodnocování a grafické zpracování grafů byl použit software Matlab.

##### Použitý software

- Ansys
- Autodesk Inventor
- PSPad
- Matlab

#### 4.5. Nastavení parametrů modální analýzy

Metoda řešení: QR Damped

Počet vlastních tvarů: 6

Frekvenční rozsah: neomezeno



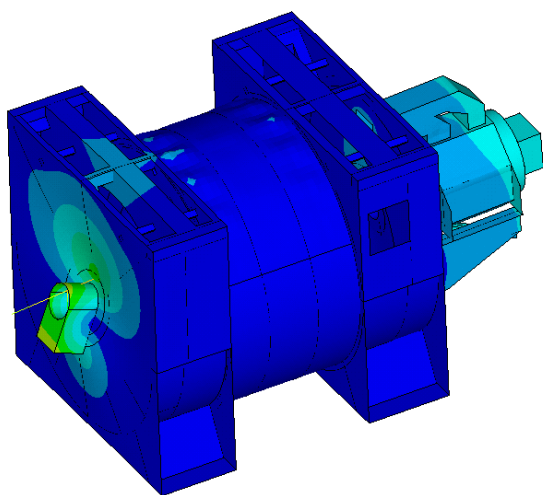
## 4.6. Výsledky modální analýzy

### 4.6.1. Varianta I

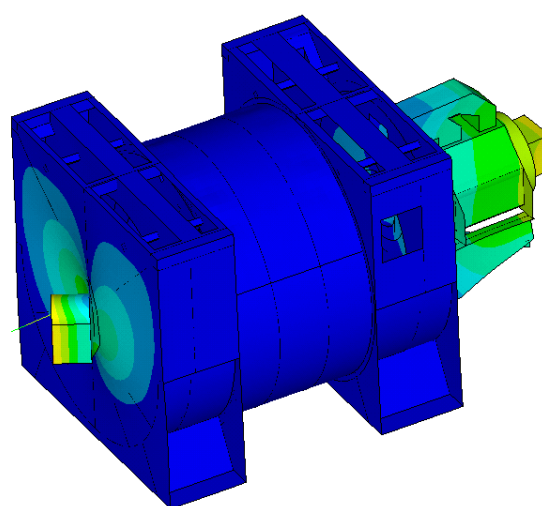
Výsledné tvary kmitu a vlastní frekvence pro variantu I jsou uvedeny v Tab. 3 a na Obr. 24 a)-f). V prvním a druhém tvaru kmitu dominantně kmitá rotor a s ním spojené levé ložisko na jedné straně a pravé ložisko na straně druhé v osách y respektive x. V těchto tvarech kmitu se významně naklápí i externí budič. Ve třetím vlastním tvaru celý generátor kmitá v ose z, tedy v ose hřídele. Čtvrtý vlastní tvar má charakter kmitání, kdy se výrazně naklápí externí budič v ose x. V pátém tvaru se pohybují obě ložiska i s externím budičem v ose hřídele navzájem proti sobě. V šestém vlastním tvaru převládá kmitání levého ložiska s čelní deskou ložiskového štítu v podélné ose rotoru. Ve všech případech převládá největší výchylka na ložiscích a externím budiči, které jsou uchyceny vně rámu stroje.

Tab. 3 Vlastní frekvence generátoru pro variantu I

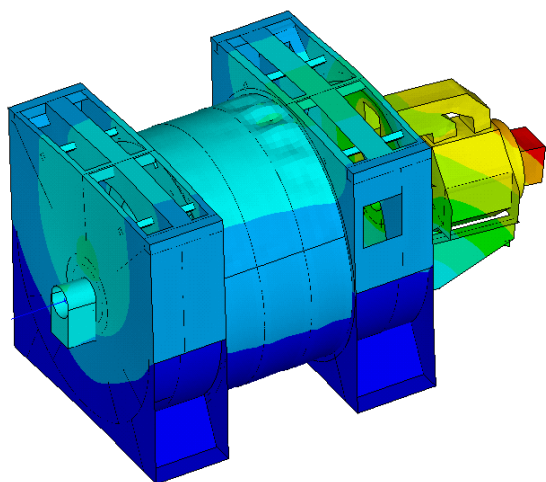
Vlastní tvar [-]	1	2	3	4	5	6
Vlastní frekvence [Hz]	33,8	37,5	42,3	49,3	55,2	65,5



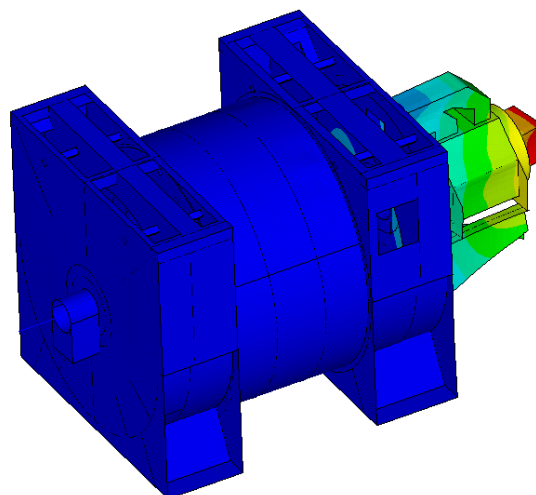
a) 1. vlastní tvar



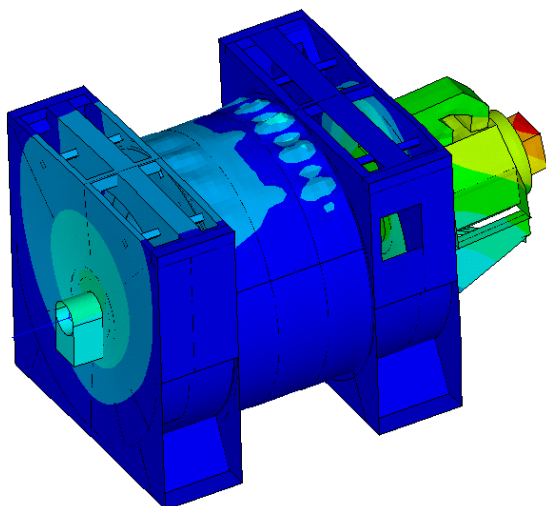
b) 2. vlastní tvar



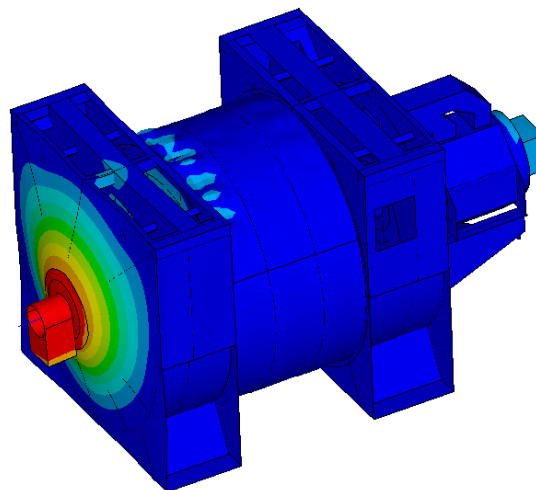
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar



e) 5. vlastní tvar



f) 6. vlastní tvar

Obr. 24 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu I

V tabulkách níže jsou uvedeny vlastní frekvence jednotlivých variant. Vlastní tvary kmitání jednotlivých konstrukčních provedení jsou uvedeny v příloze.

4.6.2. **Varianta II**

Vlastní frekvence stroje určené pomocí modální analýzy pro konstrukční variantu II jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 *Vlastní frekvence generátoru pro variantu II*

<i>Vlastní tvar</i> [-]	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Vlastní frekvence</i> [Hz]	33,9	37,6	42,3	49,3	55,3	66,8

4.6.3. **Varianta III**

Vlastní frekvence stroje určené pomocí modální analýzy pro konstrukční variantu III jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 *Vlastní frekvence generátoru pro variantu III*

<i>Vlastní tvar</i> [-]	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Vlastní frekvence</i> [Hz]	34	38	42,4	49,2	55,5	71,5

4.6.4. **Varianta IV**

Vlastní frekvence stroje určené pomocí modální analýzy pro konstrukční variantu IV jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 *Vlastní frekvence generátoru pro variantu IV*

<i>Vlastní tvar</i> [-]	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Vlastní frekvence</i> [Hz]	34,5	38,8	42,3	49,1	55,4	70,7

4.6.5. **Varianta V**

Vlastní frekvence stroje určené pomocí modální analýzy pro konstrukční variantu V jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 *Vlastní frekvence generátoru pro variantu V*

<i>Vlastní tvar</i> [-]	1	2	3	4	5	6
<i>Vlastní frekvence</i> [Hz]	34,5	38,8	42,8	53,4	57,3	70,8

4.6.6. **Varianta VI**

Vlastní frekvence stroje určené pomocí modální analýzy pro konstrukční variantu VI jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 *Vlastní frekvence generátoru pro variantu VI*

<i>Vlastní tvar</i> [-]	1	2	3	4	5	6
<i>Vlastní frekvence</i> [Hz]	33,2	36,2	42,5	49,5	55	62,6

4.6.7. **Varianta VII**

Vlastní frekvence stroje určené pomocí modální analýzy pro konstrukční variantu VII jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 *Vlastní frekvence generátoru pro variantu VII*

<i>Vlastní tvar</i> [-]	1	2	3	4	5	6
<i>Vlastní frekvence</i> [Hz]	34,9	42,5	42,6	48	55,5	65,5

## 5. HARMONICKÁ ANALÝZA SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

Harmonická analýza sleduje odezvu v ustáleném stavu na harmonické buzení, které se mění s časem. Umožňuje ověřit, zda zvolené konstrukce například úspěšně překonají rezonanční stavy. V technické praxi existuje několik způsobů buzení. V našem případě uvažujeme buzení způsobené nevyváhou, tedy buzení odstředivou silou. Harmonické buzení je v synchronním generátoru způsobeno zbytkovou nevyváhou po vyvažování. V analýze bude uvažována maximální dovolená hodnota zbytkové nevyváhy daná normou.

### 5.1. Model materiálových vlastností

Materiálové vlastnosti jsou shodné s kapitolou 4.1.

### 5.2. Model geometrie

#### 5.2.1. Tvorba konečnoprvkové sítě

Konečnoprvková síť je shodná s kapitolou 4.2.7.

### 5.3. Model okrajových podmínek

Okrajové podmínky jsou téměř shodné s okrajovými podmínkami v kapitole 4.3. V harmonické analýze se liší pouze o budící sílu, která byla umístěna do těžiště rotoru.

#### 5.3.1. Výpočet dovolené zbytkové nevyváhy

Velikost buzení od nevyváhy bylo počítáno na základě normy ISO 1940-1 určující maximální velikost dovolené zbytkové nevyváhy po vyvažování hřídele. Velikost tohoto nevyvážku se spočítá podle rovnice (2). [7]

$$U_{per} = 1000 * \frac{(e_{per} * \Omega) * m}{\Omega} \quad (2)$$

kde,

$U_{per}$  je číselná hodnota dovolené zbytkové nevyváhy, vyjádřená v [g\*mm]

$(e_{per} * \Omega)$  je číselná hodnota vybraného stupně kvality vyvážení, vyjádřená v [mm/s]

$m$  je hmotnost rotoru, vyjádřená v [kg]

$\Omega$  je velikost provozní úhlové rychlosti, vyjádřená v [rad/s]

V našem případě je to:

$$U_{per} = 1000 * \frac{(2,5) * 10981}{188} = 146\ 000 \text{ [g * mm]}$$

### 5.4. Výpočtový hardware a software

Výpočtový hardware a software jsou shodné s kapitolou 4.4.

### 5.5. Nastavení parametrů harmonické analýzy

Metoda řešení: Full

Počet kroků: 280

Frekvenční rozsah: 0-70 Hz

## 5.6. Výsledky harmonické analýzy

Výstupy z harmonické analýzy budou výchylky, rychlosti a zrychlení v závislosti na frekvenci. Tyto charakteristiky se budou vyhodnocovat v daných bodech na pravém a levém ložisku pro různé geometrické modifikace generátoru. Hodnoty budou uváděny v tzv. efektivních hodnotách podle rovnice (3) a porovnány s maximálními dovolenými efektivními hodnotami podle normy IEC 60034-14 [8], které jsou uvedeny v Tab. 10. Vyhodnocována bude provozní otáčková frekvence 30 Hz a její dvojnásobek 60 Hz, protože z praxe je známo, že u vyšetřovaného stroje dochází v některých případech díky špatnému sespojkování k buzení dvojnásobné frekvence než je frekvence otáčková. Grafy rychlostí a zrychlení pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v příloze.

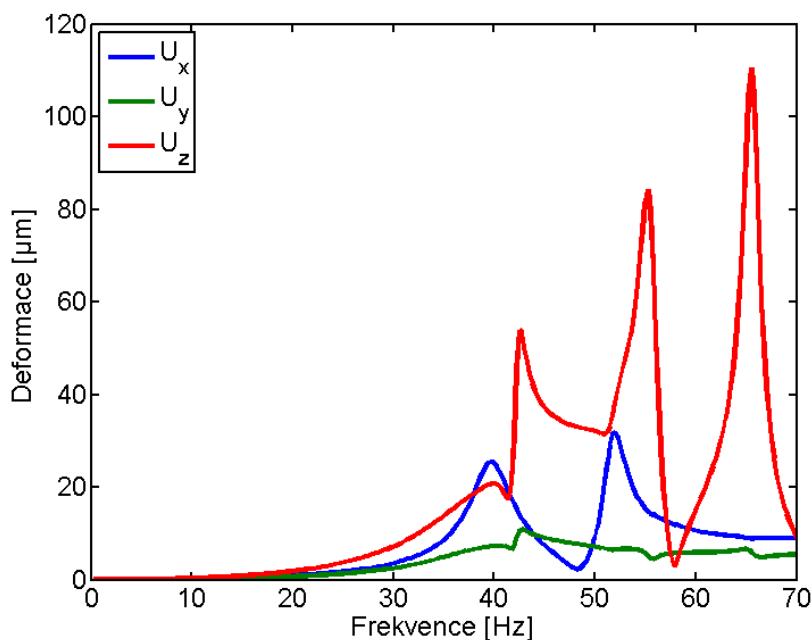
$$a_{eft} = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Tab. 10 Limity maximálních hodnot vibrací výchylky, rychlosti a zrychlení

	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]	Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]	Zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]
Maximální dovolená hodnota	37	2,3	3,6

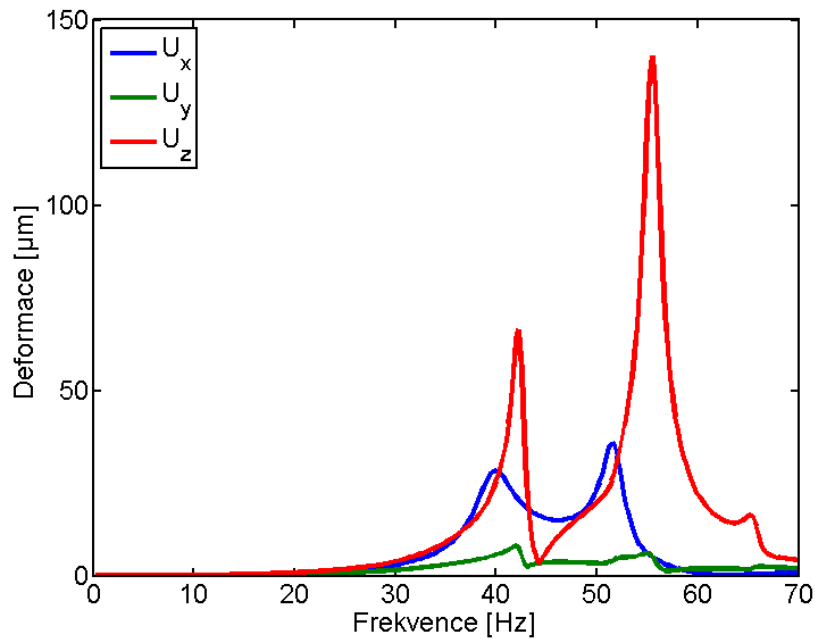
### 5.6.1. Varianta I

Jedná se o nezměněnou variantu původní geometrie. Na obrázcích níže je vidět průběh výchylek v jednotlivých osách v závislosti na frekvenci. Největších hodnot nabývá výchylka v ose z. Na levém ložisku jsou tři význačné vrcholy vybuzených frekvencí pro směr v ose z na frekvencích 42,5 Hz, 55,5 Hz a 65,5 Hz.



Obr. 25 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I

Ve směru osy x se objevují v grafech pro výchylku pravého i levého ložiska dva výrazné vrcholy na hodnotách frekvence 40 Hz a 52 Hz. U výchylky na pravém ložisku v ose z se pro variantu I objevují dva vrcholy na frekvencích 42,5 Hz a 55,5 Hz.



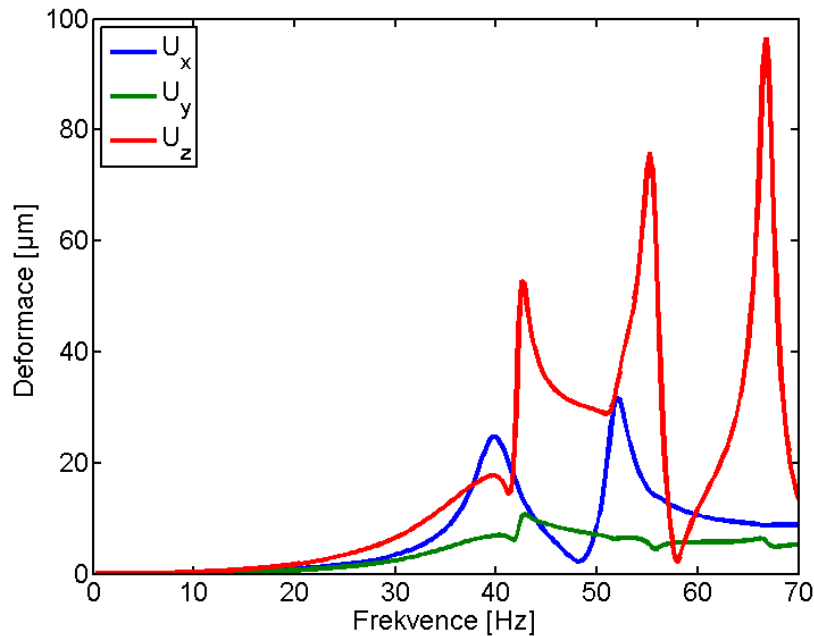
Obr. 26 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I

Tab. 11 Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu I

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]			Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Dovolené hodnoty</i>	37	37	37	2,3	2,3	2,3
<i>Levé ložisko 30 Hz</i>	3,5	2,6	7,2	0,7	0,5	1,4
<i>Levé ložisko 60 Hz</i>	10,6	5,9	15	<b>4</b>	2,2	<b>5,7</b>
<i>Pravé ložisko 30 Hz</i>	2,9	1,6	3,9	0,6	0,3	0,7
<i>Pravé ložisko 60 Hz</i>	0,7	1,9	22	0,3	0,7	<b>8,3</b>

### 5.6.2. Varianta II

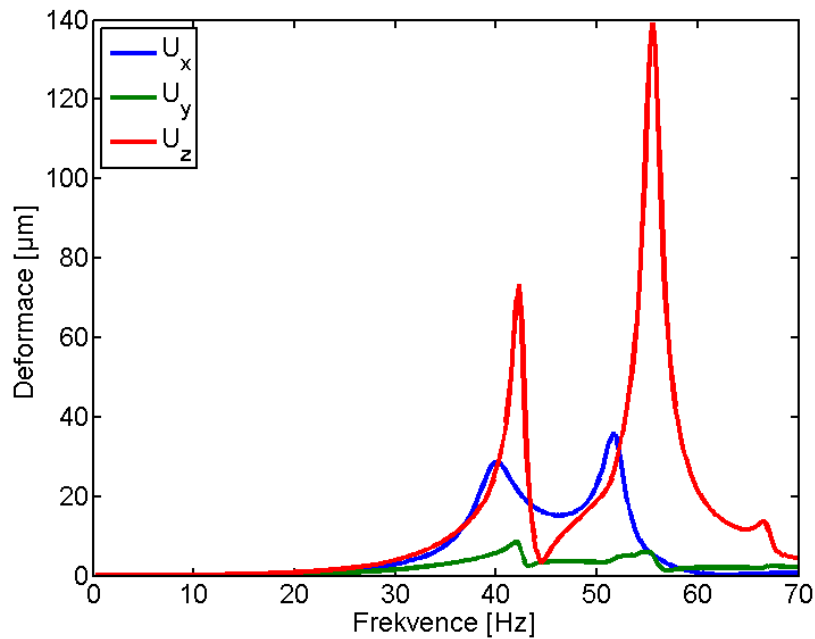
Tato konstrukční modifikace obsahuje přidaná žebra na čele ložiskového štítu. Podobně jako u předchozí varianty se poloha ani velikost průběhu výchylky v závislosti na frekvenci příliš neliší. Vybuzené frekvence pro směr osy z mají hodnoty 42,5 Hz, 55 Hz a 66,8 Hz.



Obr. 27 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II

U pravého ložiska je odezva téměř naprosto identická jako u původní varianty, což odpovídá i tomu, že na pravém ložiskovém štítu nedošlo k žádné konstrukční změně. Dominantní výchylka v ose z je při frekvencích 42,5 Hz a 55,5 Hz.





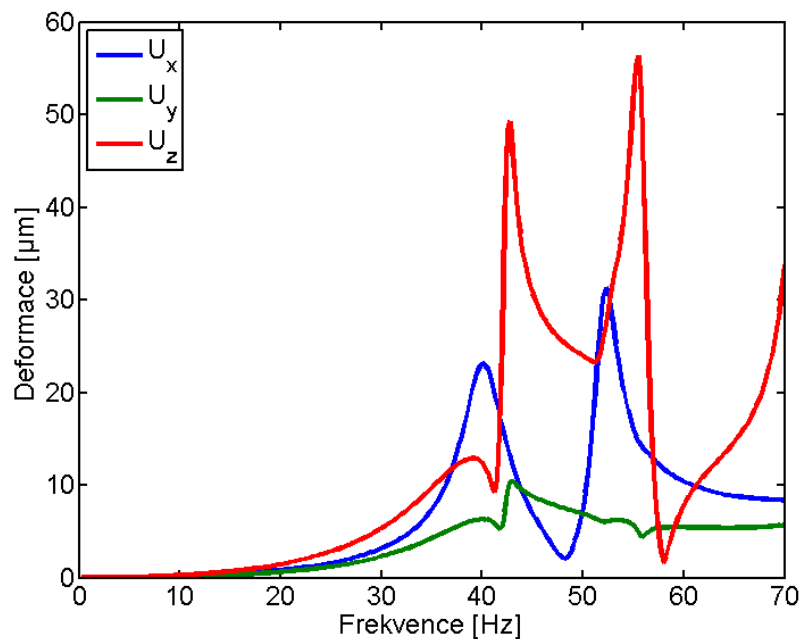
Obr. 28 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II

Tab. 12 Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu II

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]			Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Dovolené hodnoty	37	37	37	2,3	2,3	2,3
Levé ložisko 30 Hz	3,4	2,4	6,5	0,6	0,5	1,2
Levé ložisko 60 Hz	10,6	5,7	11,8	<b>4</b>	2,2	<b>4,4</b>
Pravé ložisko 30 Hz	2,9	1,6	3,9	0,5	0,3	0,7
Pravé ložisko 60 Hz	0,8	2	21,5	0,3	0,8	<b>8,1</b>

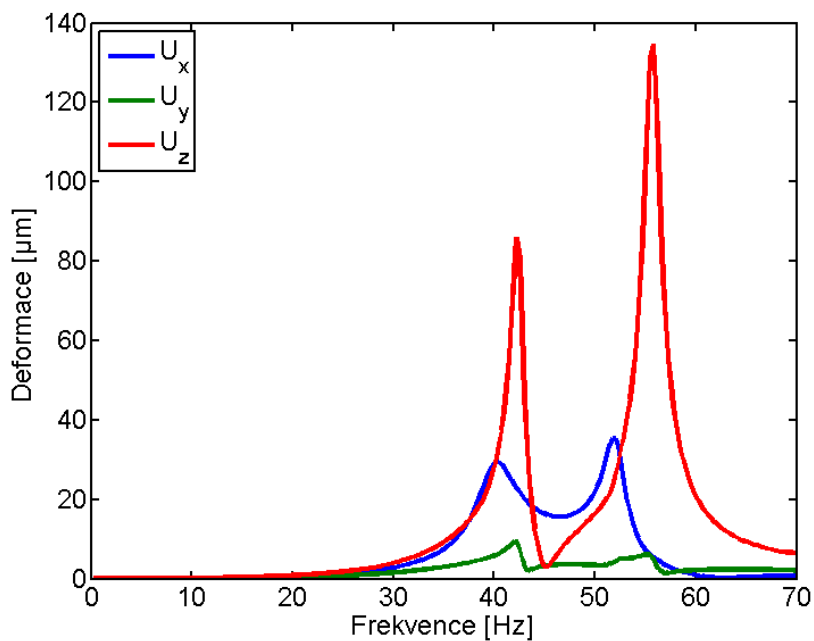
### 5.6.3. Varianta III

Tato varianta obsahuje přidaná žebra na čele ložiskového štítu stejně jako varianta II, ale s dvojnásobně vyšším profilem. Na rozdíl od předcházejících variant se průběh na levém ložisku výrazněji liší. Třetí vrchol pro souřadnici posuvu v ose z je posunut do vyšších frekvencí a jednotlivé vrcholy dosahují nižších hodnot než tomu bylo u předcházejících variant. Což naznačuje, že dané konstrukční úpravy mají pozitivní vliv na vibrace stroje.



Obr. 29 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III

Vzhledem k faktu, že pravý ložiskový štít zůstal i pro tuto variantu nezměněn, se odezva na pravém ložisku prakticky neliší s odezvou dvou předchozích variant. Polohy vrcholů i velikosti výchylek jsou téměř totožné s předchozími variantami.



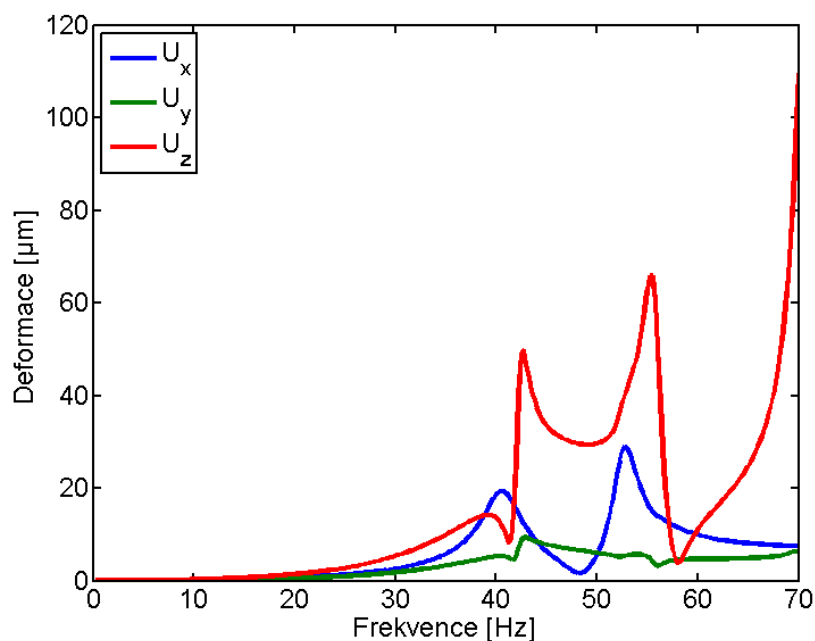
Obr. 30 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III

Tab. 13 Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu III

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]			Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Dovolené hodnoty	37	37	37	2,3	2,3	2,3
Levé ložisko 30 Hz	3,1	2,3	5,3	0,6	0,4	1
Levé ložisko 60 Hz	10,4	5,5	7,8	<b>3,9</b>	2	<b>3</b>
Pravé ložisko 30 Hz	2,9	1,6	3,9	0,5	0,3	0,7
Pravé ložisko 60 Hz	0,9	2,2	20,9	0,3	0,8	<b>7,9</b>

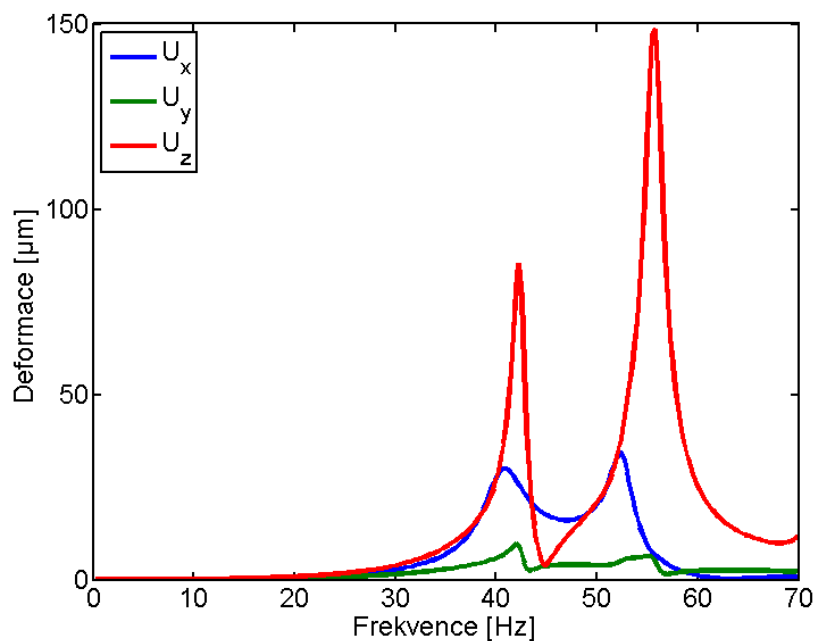
#### 5.6.4. Varianta IV

U varianty IV byla oproti původní variantě zvětšena tloušťka přední desky levého ložiskového štítu. Vrcholy se podobně jako u předcházejících variant nacházejí pro výchylku v ose z na 42,5 Hz a 55,5 Hz. Třetí vrchol je posunut do frekvencí, které jsou vyšší než je 70 Hz.



Obr. 31 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV

Na Obr. 32 obdobně jako u předchozí varianty jsou pro směr osy z dominantní dva vrcholy. Ty se vyskytují při 42 Hz a 56 Hz. V ose x jsou vrcholy na frekvencích 41 Hz a 52 Hz.



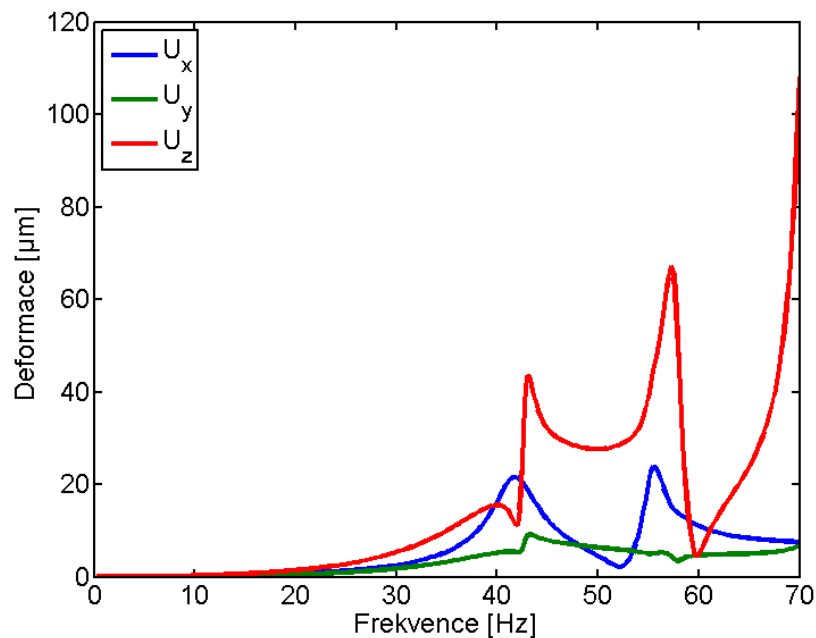
Obr. 32 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV

Tab. 14 Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu IV

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]			Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Dovolené hodnoty</i>	37	37	37	2,3	2,3	2,3
<i>Levé ložisko 30 Hz</i>	2,6	1,8	5,3	0,5	0,3	1
<i>Levé ložisko 60 Hz</i>	9,9	4,7	11	<b>3,7</b>	1,8	<b>4,2</b>
<i>Pravé ložisko 30 Hz</i>	2,8	1,5	3,8	0,5	0,3	0,7
<i>Pravé ložisko 60 Hz</i>	1,2	2,5	25,3	0,4	0,9	<b>9,5</b>

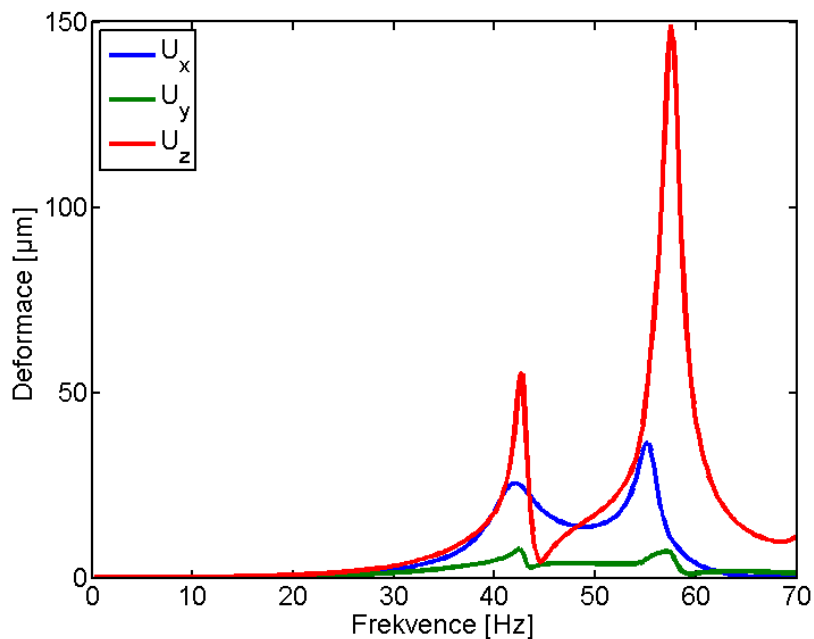
### 5.6.5. Varianta V

U varianty V byla zvětšena tloušťka přední desky levého ložiskového štítu a i tloušťka kruhové desky, které je na pravém ložiskovém štítu uchycena pomocí šroubů po obvodu kruhové desky. Vrcholy uváděné u předchozích variant se v ose z se posunuly na frekvence 43 Hz a 57,5 Hz. Velikost výchylky v ose x se vzhledem předchozím variantám zmenšila.



Obr. 33 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V

Dominující vrcholy na pravém ložisku pro pátou variantu jsou při frekvencích 43 Hz a 57,5 Hz



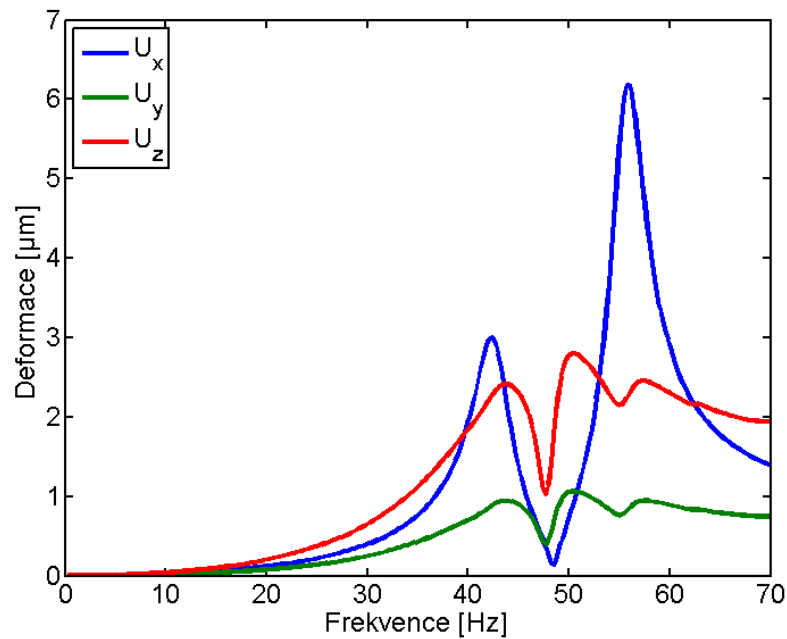
Obr. 34 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V

Tab. 15 Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu V

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]			Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Dovolené hodnoty	37	37	37	2,3	2,3	2,3
Levé ložisko 30 Hz	2,5	1,8	5,3	0,5	0,3	1
Levé ložisko 60 Hz	11	4,7	4,9	<b>4,1</b>	1,8	1,8
Pravé ložisko 30 Hz	2,3	1,3	3,2	0,4	0,3	0,6
Pravé ložisko 60 Hz	3,8	1,2	<b>42,3</b>	1,4	0,4	<b>16</b>

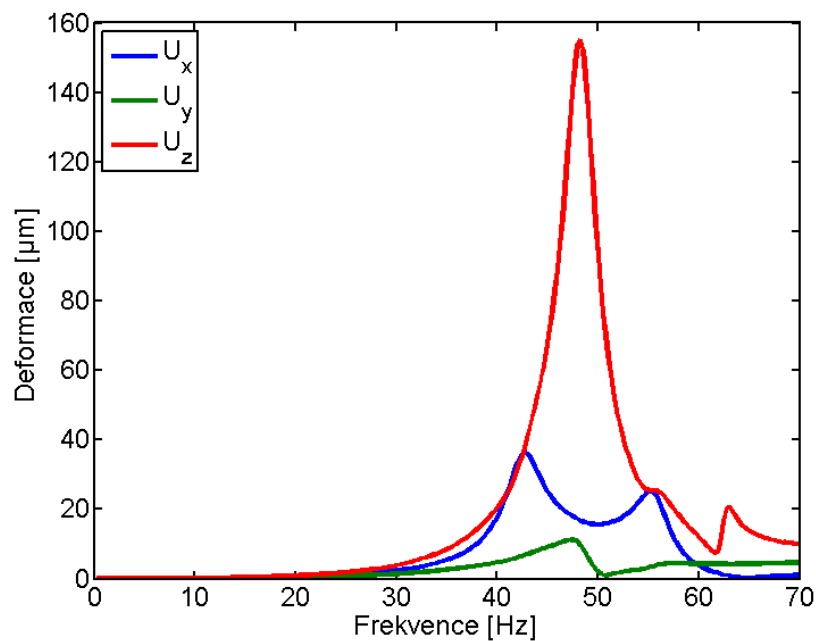
### 5.6.6. Varianta VI

Variantě VI byly přidány žebra na levém ložiskovém štítu, ale zároveň byla zeštíhlena tloušťka přední desky ložiskového štítu. Na levém štítu tím byla výrazně ovlivněna tuhost. Dominantně vybuzenými frekvencemi jsou nyní 42,3 Hz a 56 Hz v ose x. Oproti předchozím variantám tato konstrukční modifikace výrazně snížila vibrace v ose rotoru na levém ložiskovém štítu.



Obr. 35 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI

V grafu na Obr. 36 se pro výchylku na pravém ložisku vyskytuje výrazný vrchol pro 48,3 Hz, přičemž v daném frekvenčním pásmu se jiné špičky pro osu z nevyskytují. V tom se varianta VI výrazně liší od přecházejících případů.



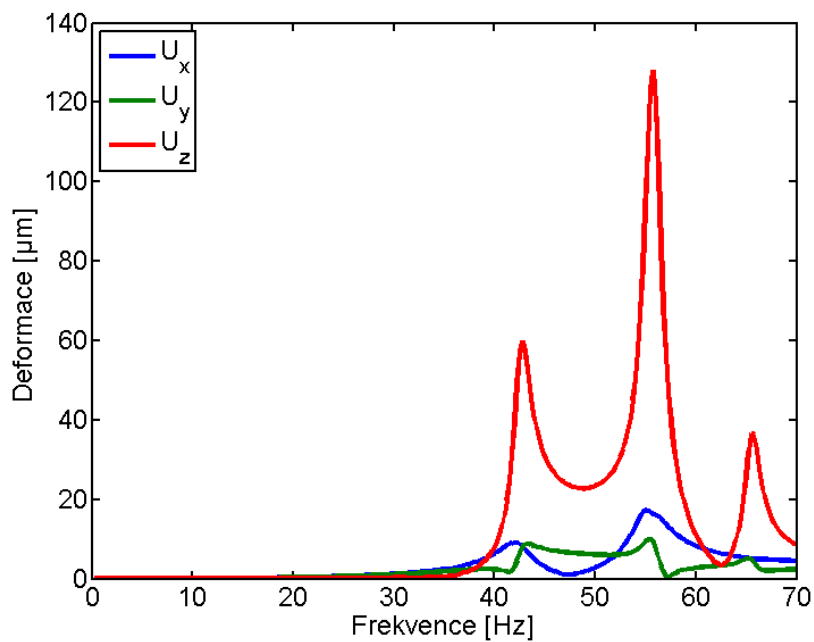
Obr. 36 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI

Tab. 16 Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu VI

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]			Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Dovolené hodnoty	37	37	37	2,3	2,3	2,3
Levé ložisko 30 Hz	0,4	0,2	0,6	0,1	0,1	0,1
Levé ložisko 60 Hz	2,9	0,9	2,3	1,1	0,3	0,9
Pravé ložisko 30 Hz	2,4	1,4	3,9	0,5	0,3	0,7
Pravé ložisko 60 Hz	3,8	4,4	12	1,4	1,7	<b>4,5</b>

### 5.6.7. Varianta VII

Varianta VII obsahuje jiný typ ložiska. To si vyžádalo i příslušné změny na ložiskovém štítu.

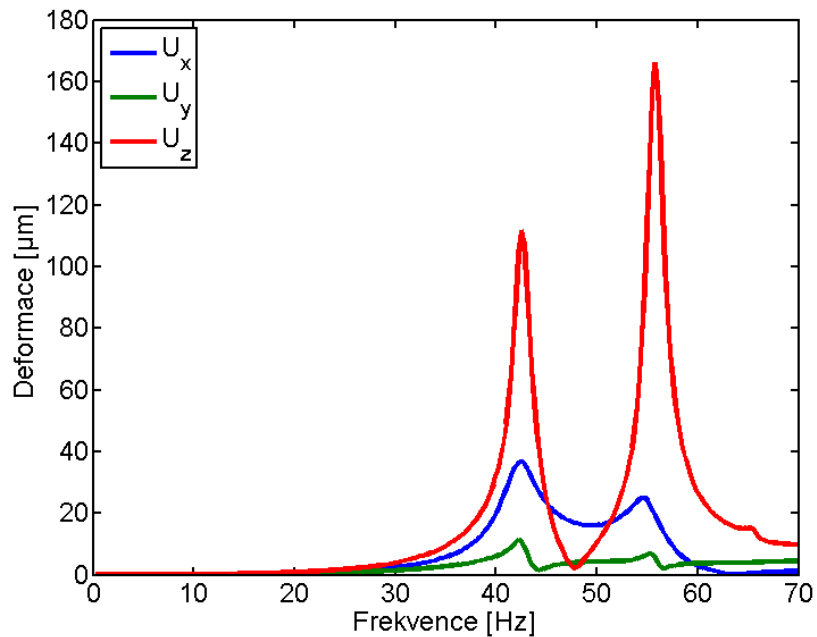


Obr. 37 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII

Pro pravé i levé ložisko je amplituda deformace v ose z řádově větší než pro ostatní složky. Její frekvence jsou 42,5 Hz, 55,5 Hz a 65,5 Hz. Tyto hodnoty odpovídají druhé, páté a šesté vlastní frekvenci stroje.



Varianta VII má vzhledem k ostatním modifikacím největší amplitudy výchylky na pravém ložisku, jak je vidět na Obr. 38.



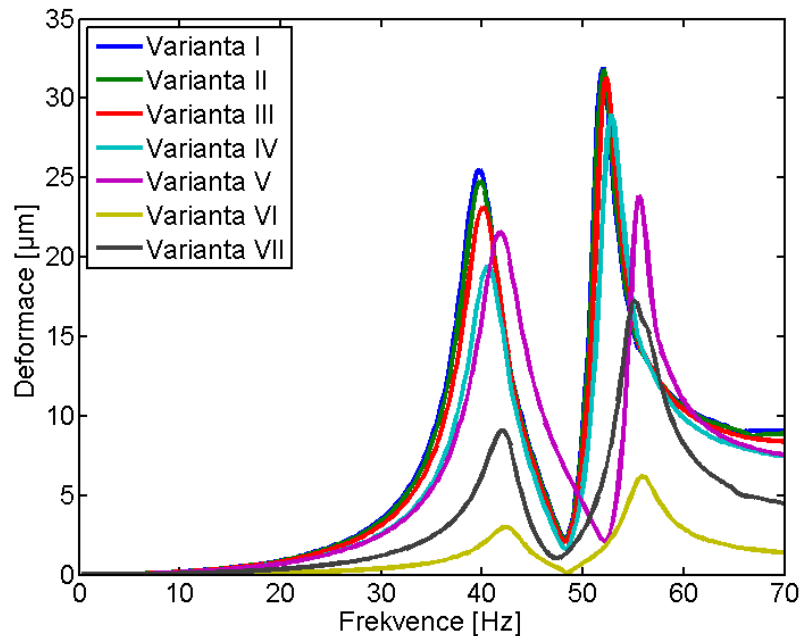
Obr. 38 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII

Tab. 17 Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu VII

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]			Rychlost [ $\text{mm/s}$ ]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Dovolené hodnoty</i>	37	37	37	2,3	2,3	2,3
<i>Levé ložisko 30 Hz</i>	1,2	1,1	0,3	0,2	0,2	0,1
<i>Levé ložisko 60 Hz</i>	8,2	2,8	11	<b>3</b>	1	<b>4,2</b>
<i>Pravé ložisko 30 Hz</i>	2,5	1,5	3,9	0,5	0,3	0,7
<i>Pravé ložisko 60 Hz</i>	2,9	3,8	26,7	1	1,4	<b>10</b>

## 6. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

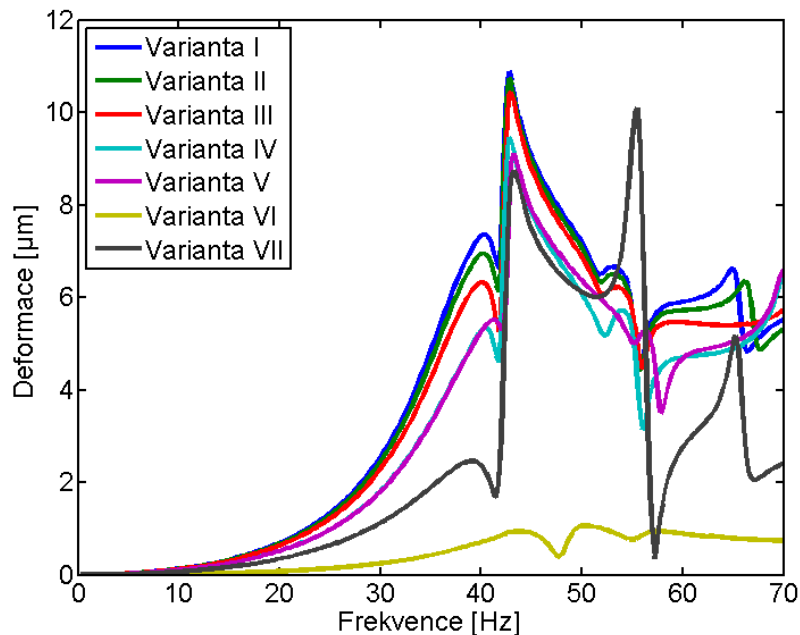
Aby bylo možné dosažené výsledky porovnat, je nutné specifikovat, které výsledky budeme porovnávat. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny deformace v jednotlivých osách pro všechny konstrukční varianty. Z obrázků lze usuzovat, jaké měly jednotlivé konstrukční změny na ložiskových štítech vliv na jejich tuhost.



Obr. 39 Porovnání výchylek levého ložiska v ose  $x$

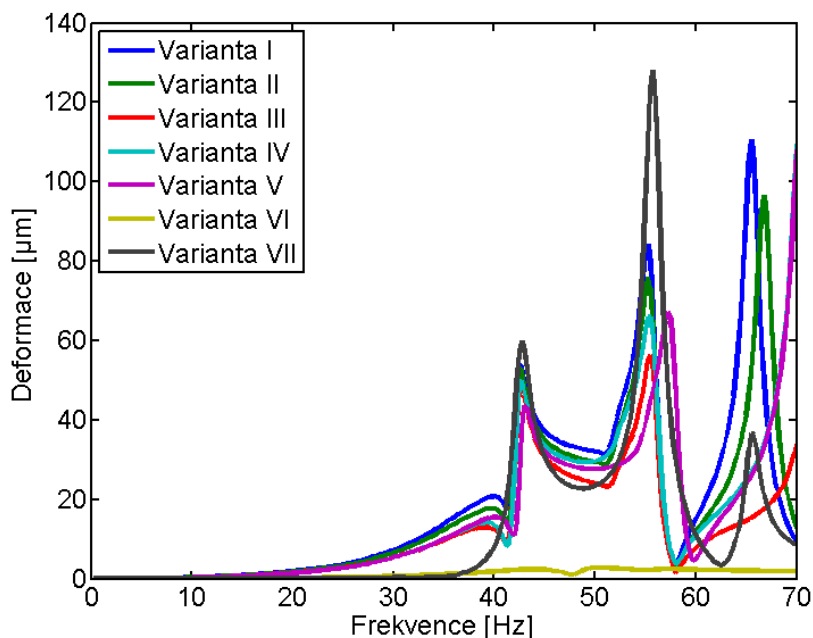
Na Obr. 39 lze vidět, že největší amplitudy deformace v ose  $x$  má původní geometrická konfigurace. Druhá a třetí varianta s přidáním žebry jeví oproti původní jen minimální rozdíly a podle toho lze soudit, že žebra v kombinaci s původní tloušťkou stěny ložiskového štítu tedy nemají zásadní vliv na tuhost štítu v daném směru. U varianty V je vidět frekvenční posun a i nižší amplituda deformace než u prvních třech variant. Jako nejlepší se ukazuje varianta VI, u které výrazně poklesla velikost amplitudy deformace.

Stejně to platí i pro deformace v ostatních směrech na levém štítu, kde varianta VI má řádově nižší velikosti deformace než ostatní varianty.



Obr. 40 Porovnání výchylek levého ložiska v ose y

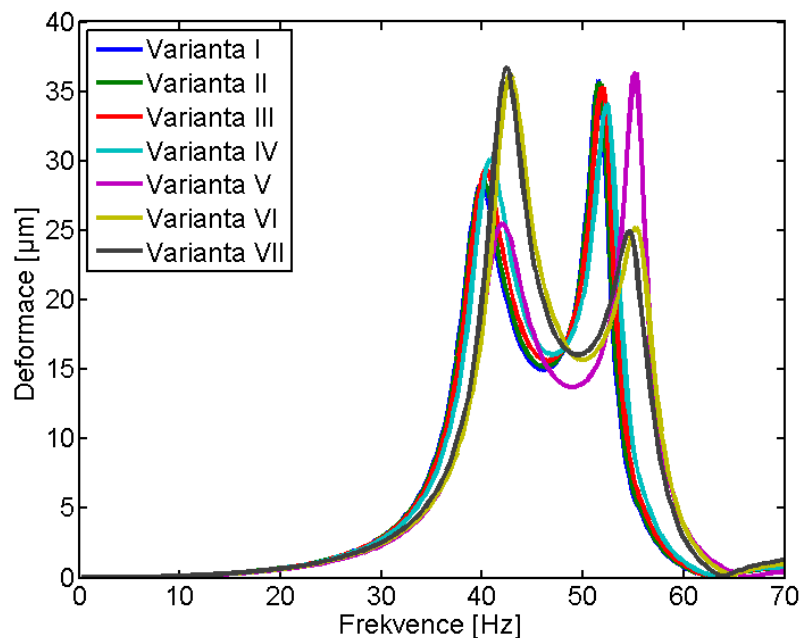
Můžeme konstatovat že, zeštíhlením předního štítu zároveň kombinovaným s přidáními žebry se dosáhlo výrazně nižších hodnot deformací na levém ložiskovém štítu.



Obr. 41 Porovnání výchylek levého ložiska v ose z

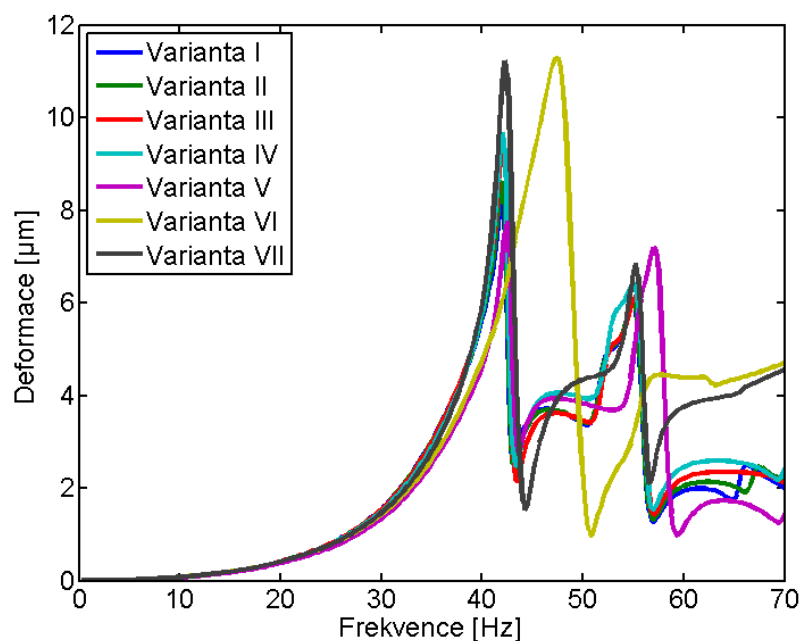
Na Obr. 41 je vidět největší vrchol deformací na 55,5 Hz pro sedmou variantu provedení. Tato hodnota frekvence odpovídá pátému vlastnímu tvaru stroje.

Na pravém štítu se pro jednotlivé varianty průběhy deformací v závislosti na frekvenci příliš neliší. Varianty V, VI a VII mají posunuté špičky deformací pro deformaci v ose x do vyšších frekvencí. Což je zajímavé hlavně u varianty VI a VII, kdy na pravém ložiskovém štítu nebyla provedena žádná konstrukční úprava.



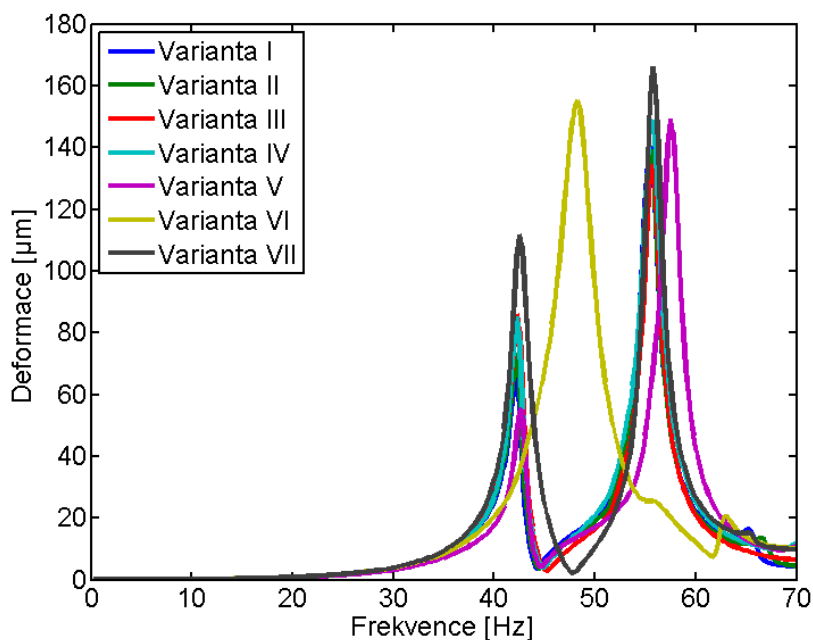
Obr. 42 Porovnání výchylek pravého ložiska v ose x

U varianty V je patrný pokles amplitudy pro první vybuzenou frekvenci 42 Hz a naopak pro varianty VI a VII je amplituda deformace pro danou frekvenci větší. U druhé vybuzené frekvence 55 Hz je situace opačná.



Obr. 43 Porovnání výchylek pravého ložiska v ose y

Pro deformaci v ose y na Obr. 43 vyčnívá oproti ostatním varianta VI. Její první vybuzená frekvence je 47 Hz. Všechny zbylé varianty mají první vrchol při 42 Hz. Druhá špička je pro všechny varianty kromě V a VI na hodnotě 55,5 Hz. Varianta V má druhý vrchol při 57,5 Hz.



Obr. 44 Porovnání výchylek pravého ložiska v ose z

Výsledky pro nominální frekvenci 30 Hz jsou ještě přehledně uvedeny v Tab. 18, Tab. 19 a Tab. 20. V tabulce níže můžeme vidět, že všechny varianty splňují pro hodnotu 30 Hz maximální dovolené hodnoty výchylky uvedené v Tab. 10.

Tab. 18 Porovnání výchylek jednotlivých variant pro 30 Hz

Osy	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ] Levé ložisko 30 Hz			Výchylka [ $\mu\text{m}$ ] Pravé ložisko 30 Hz		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Varianta I	3,5	2,6	7,1	2,9	1,6	3,9
Varianta II	3,4	2,5	6,5	2,9	1,6	3,9
Varianta III	3,1	2,3	5,3	2,9	1,5	3,9
Varianta IV	2,6	1,8	5,3	2,8	1,5	3,8
Varianta V	2,5	1,8	5,3	2,3	1,3	3,2
Varianta VI	0,4	0,7	0,3	2,4	1,4	3,8
Varianta VII	1,2	1,1	0,3	2,5	1,5	3,9

I když norma udává limity maximálních hodnot vibrací výchylky, rychlosti i zrychlení, je zvyklostí udávat a posuzovat stroj podle rychlostí vibrací. Výsledky rychlostí jednotlivých variant pro otáčkovou frekvenci stroje 30 Hz jsou uvedeny v Tab. 19. Z tabulky výsledků pro rychlosti vibrací vyplývá, že mezní hodnotu danou normou splňují všechny varianty. Z tabulky je zároveň vidět, že nejmenších hodnot rychlosti pro frekvenci 30 Hz dosahuje varianta VI.

Tab. 19 Porovnání rychlostí jednotlivých variant pro 30 Hz

Osy	Rychlost [mm/s] Levé ložisko 30 Hz			Rychlost [mm/s] Pravé ložisko 30 Hz		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Varianta I</i>	0,7	0,5	1,4	0,6	0,3	0,7
<i>Varianta II</i>	0,6	0,5	1,2	0,5	0,3	0,7
<i>Varianta III</i>	0,6	0,4	1	0,5	0,3	0,7
<i>Varianta IV</i>	0,5	0,3	1	0,5	0,3	0,7
<i>Varianta V</i>	0,5	0,3	1	0,4	0,3	0,6
<i>Varianta VI</i>	0,1	0,1	0,1	0,5	0,3	0,7
<i>Varianta VII</i>	0,2	0,2	0,1	0,5	0,3	0,7

V Tab. 20 jsou uvedeny zrychlení bodů na levém i pravém ložisku pro otáčkovou frekvenci stroje. Z tabulky vyplývá, že všechny varianty splňují mezní hodnoty dané normou pro velikost zrychlení.

Tab. 20 Porovnání zrychlení jednotlivých variant pro 30 Hz

Osy	Zrychlení [ $m/s^2$ ] Levé ložisko 30 Hz			Zrychlení [ $m/s^2$ ] Pravé ložisko 30 Hz		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Varianta I</i>	0,13	0,09	0,25	0,10	0,06	0,14
<i>Varianta II</i>	0,09	0,12	0,23	0,10	0,06	0,14
<i>Varianta III</i>	0,11	0,08	0,19	0,10	0,05	0,14
<i>Varianta IV</i>	0,09	0,06	0,19	0,10	0,05	0,14
<i>Varianta V</i>	0,09	0,06	0,19	0,08	0,05	0,11
<i>Varianta VI</i>	0,01	0,01	0,02	0,08	0,05	0,14
<i>Varianta VII</i>	0,04	0,04	0,01	0,09	0,05	0,14

## 7. VLIV ÚPRAV NA VÝROBNÍ NÁKLADY

V zásadě se jedná o posouzení nákladů na výrobu svařence ložiskových štítů synchronního generátoru a otázku, jestli je finančně výhodnější dosáhnout požadované tuhosti štítů silnější základní deskou nebo slabší základní deskou s navařenými žebry.

Varianta s navařenými žebry má nižší hmotnost a tím i menší náklady na pořízení vstupního materiálu. Z druhého hlediska jsou zde navíc náklady na navýšení pracovních při svařování.

Při uvažování výroby v SEM Drásov vychází varianta s navařenými žebry o něco dražší, což je dáno především vysokými režijními náklady, které se přičítají k navýšenému času pro operaci svařování. Při úvaze o nákupu celého dílce v rámci externí kooperace, vyjde v některých případech ložiskový štít s navařenými žebry levněji, protože někteří dodavatelé stanovují cenu pouze na základě hmotnosti dílce.

Z výše popsaných důvodů nelze tedy jednoznačně určit, která z posuzovaných variant je z nákladového hlediska nejvýhodnější. V rámci nákladů celého stroje navíc nejde o podstatné snížení ceny, která by měla hrát rozhodující roli při vyhodnocení optimální varianty. Navíc při uvažování počtu vyrobených generátorů, kdy hovoříme o kusové výrobě, je vliv ceny jednotlivých variant ložiskového štítu téměř nepodstatný vzhledem k celkové ceně zařízení. Hlavní prioritou při konstrukci takového zařízení je především klidný a tichý chod stroje. Ceně štítů je ve výsledku přikládán až druhotný význam.

To na druhou stranu umožňuje rozhodnout se výhradně na základě výsledků simulace vibrací.

## 8. ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo posoudit vliv tuhosti ložiskových štítů na vibrace synchronního generátoru a porovnání dosažených výsledků pro jednotlivé konstrukční varianty.

Cíle práce, které byly formulovány v první části, byly splněny v celém rozsahu. Nejprve byla provedena aplikace systémové metodologie na řešené úloze a s ní související tvorba systému podstatných veličin pro danou soustavu. V pořadí další kapitola se věnuje stručnému popisu hlavních částí synchronního generátoru. V této kapitole je krátký náhled do konstrukce stroje pro vytvoření základní představy o funkci a umístění jednotlivých částí v celé sestavě stroje.

Poté byl vytvořen konečnoprvkový model na základě dodané konstrukční dokumentace pomocí APDL v programu ANSYS.

V další kapitole byla provedena modální analýza celého stroje. Výstupy z modální analýzy jsou vlastní tvary a vlastní frekvence stroje. Tyto výsledky jsou důležité pro prvotní představu o dynamickém chování generátoru. Hodnoty vlastních frekvencí pro všechny konstrukční varianty jsou přehledně uvedeny v Tab. 3 až Tab. 9.

V kapitole zabývající se harmonickou analýzou byla stanovena maximální hodnota nevyvážku dle normy ISO 1940. Tato maximální hodnota byla uvažována jako budící síla v harmonické analýze. Dále bylo stanoveno chvění stroje v zadaných bodech v efektivních hodnotách výchylky, rychlosti a zrychlení pro daný rozsah otáček. Toto bylo provedeno pro všechny uvažované konstrukční varianty.

Na závěr byly jednotlivé konstrukční varianty přehledně uspořádány do tabulek a porovnány z hlediska velikosti výchylky, rychlosti a zrychlení v efektivních hodnotách pro nominální otáčky 30 Hz. V Tab. 19 byly uvedeny velikosti rychlosti, které jsou vyžadovány zákazníkem při přejímce stroje. Po porovnání velikosti výchylky jednotlivých variant vyplývá následující. Výchylka na levém ložisku byla nejmenší v celém zkoumaném frekvenčním rozsahu u varianty VI, naopak u původní varianty byla velikost výchylky největší. Výrazného snížení velikosti výchylky na levém ložisku v porovnání s ostatními variantami dosáhla i poslední varianta. Při nominálních otáčkách vychází výchylka na pravém ložisku nejlépe pro pátou variantu. Na základě získaných výsledků bylo navrženo implementovat dané poznatky do výroby.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JANÍČEK, P. *Systém podstatných veličin na objektu, Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: Hledání souvislostí*. 1. Vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2007. str. 682. ISBN 978-80-214-3545.
- [2] SAS IP, Inc.: AnsysHelp. 2011.
- [3] Siemens Česká republika: Siemens Electric Machines - Česká republika. [online]. [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: [https://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty\\_a\\_sluzby/sem/Documents/Siemens%20Electric%20Machines%20s.r.o.Drasov\\_20150917.pdf](https://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby/sem/Documents/Siemens%20Electric%20Machines%20s.r.o.Drasov_20150917.pdf)
- [4] SEDLÁČEK, R. *Tvorba výpočtového modelu pro deformačně napěťovou analýzu prvků generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Návrat, Ph.D..
- [5] ALEXEJEV, A.: *Konstrukce elektrických strojů*, 1952, Průmyslové nakladatelství, Praha, s.408
- [6] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4
- [7] ČSN ISO 1940-1: *Vibrace - Požadavky na jakost vyvážení rotorů v konstantním (tuhém) stavu*
- [8] IEC 60034-14: *Rotující elektrické stroje - Mechanické vibrace strojů s hřídelí s průměrem 56 mm a větším*
- [9] Dirac Delta. [online]. [cit.2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/s/t/stator/source.html#.VzSUBISLTIU>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Model geometrie generátoru .....	18
Obr. 2 Konečnoprvková síť generátoru .....	19
Obr. 3 Prvek Mass 21 [2] .....	20
Obr. 4 Prvek Beam 188 [2].....	20
Obr. 5 Prvek Combin 14 [2] .....	20
Obr. 6 Prvek Shell 181 [2].....	21
Obr. 7 Prvek Solid 185 [2].....	21
Obr. 8 Prvek Mesh 200 rovinný [2] .....	22
Obr. 9 Generátor typ 1DU [3] .....	23
Obr. 10 Rotor [3] .....	23
Obr. 11 Stator [9].....	24
Obr. 12 Ložiskový štít .....	24
Obr. 13 Přidaná žebra na ložiskovém štítu.....	26
Obr. 14 Model geometrie generátoru .....	27
Obr. 15 Konečnoprvkový model generátoru bez hřídele .....	27
Obr. 16 Uživatelský průřez s prvky MESH 200.....	28
Obr. 17 Konečnoprvkový model hřídele rotoru .....	28
Obr. 18 Model ložiska.....	29
Obr. 19 Model ložiska pro variantu VII.....	29
Obr. 20 Vetknutí ložiskových štítů .....	30
Obr. 21 Okrajové podmínky na hřídeli generátoru .....	30
Obr. 22 Tlakový kužel [6] .....	31
Obr. 23 Vytvoření spojů pomocí Rigid region .....	32
Obr. 24 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu I .....	34
Obr. 25 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I .....	38
Obr. 26 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I .....	39
Obr. 27 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II.....	40
Obr. 28 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II .....	41
Obr. 29 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III .....	42
Obr. 30 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III.....	42
Obr. 31 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV.....	43
Obr. 32 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV .....	44
Obr. 33 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V.....	45
Obr. 34 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V .....	46
Obr. 35 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI.....	47
Obr. 36 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI .....	47
Obr. 37 Výchylka levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII .....	48
Obr. 38 Výchylka pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII.....	49

Obr. 39 Porovnání výchylek levého ložiska v ose $x$ .....	50
Obr. 40 Porovnání výchylek levého ložiska v ose $y$ .....	51
Obr. 41 Porovnání výchylek levého ložiska v ose $z$ .....	51
Obr. 42 Porovnání výchylek pravého ložiska v ose $x$ .....	52
Obr. 43 Porovnání výchylek pravého ložiska v ose $y$ .....	52
Obr. 44 Porovnání výchylek pravého ložiska v ose $z$ .....	53
Obr. 45 Model geometrie generátoru varianta I .....	64
Obr. 46 Model geometrie generátoru varianta II .....	64
Obr. 47 Model geometrie generátoru varianta III .....	65
Obr. 48 Model geometrie generátoru varianta IV .....	65
Obr. 49 Model geometrie generátoru varianta V .....	66
Obr. 50 Model geometrie generátoru varianta VI .....	66
Obr. 51 Model geometrie generátoru varianta VII .....	67
Obr. 52 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu I .....	68
Obr. 53 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu II .....	69
Obr. 54 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu III .....	70
Obr. 55 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu IV .....	71
Obr. 56 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu V .....	72
Obr. 57 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu VI .....	73
Obr. 58 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu VII .....	74
Obr. 59 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I .....	75
Obr. 60 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I .....	75
Obr. 61 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II .....	76
Obr. 62 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II .....	76
Obr. 63 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III .....	77
Obr. 64 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III .....	77
Obr. 65 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV .....	78
Obr. 66 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV .....	78
Obr. 67 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V .....	79
Obr. 68 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V .....	79
Obr. 69 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI .....	80
Obr. 70 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI .....	80
Obr. 71 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII .....	81
Obr. 72 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII .....	81
Obr. 73 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I .....	82
Obr. 74 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I .....	82
Obr. 75 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II .....	83
Obr. 76 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II .....	83
Obr. 77 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III .....	84

Obr. 78 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III .....	84
Obr. 79 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV .....	85
Obr. 80 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV .....	85
Obr. 81 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V .....	86
Obr. 82 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V .....	86
Obr. 83 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI .....	87
Obr. 84 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI .....	87
Obr. 85 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII .....	88
Obr. 86 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII .....	88

**SEZNAM TABULEK**

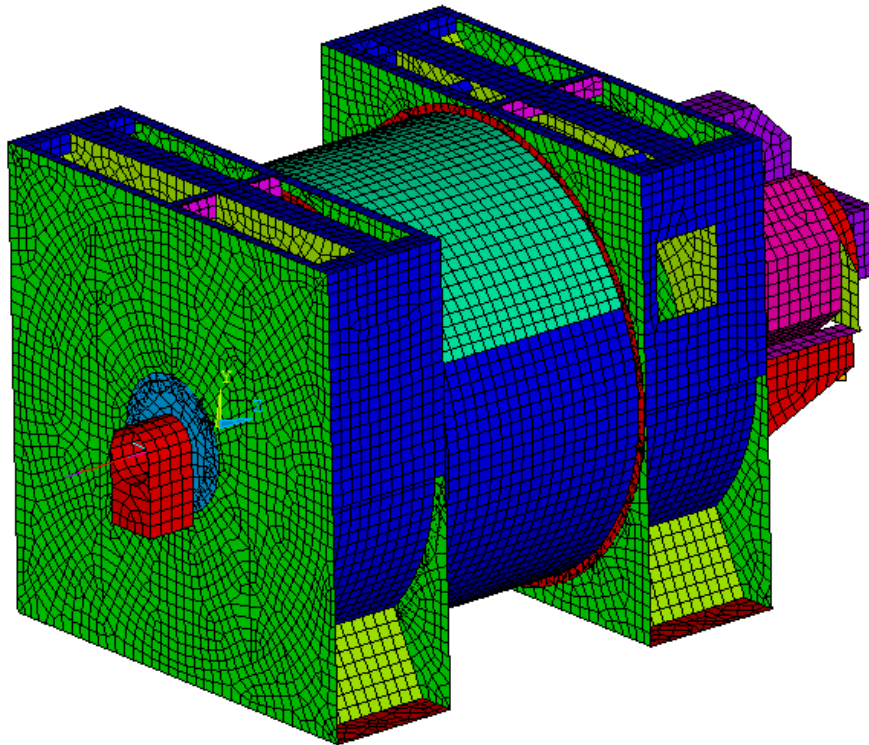
Tab. 1 <i>Fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu</i> .....	19
Tab. 2 <i>Informace o výpočtovém modelu</i> .....	29
Tab. 3 <i>Vlastní frekvence generátoru pro variantu I</i> .....	33
Tab. 4 <i>Vlastní frekvence generátoru pro variantu II</i> .....	35
Tab. 5 <i>Vlastní frekvence generátoru pro variantu III</i> .....	35
Tab. 6 <i>Vlastní frekvence generátoru pro variantu IV</i> .....	35
Tab. 7 <i>Vlastní frekvence generátoru pro variantu V</i> .....	36
Tab. 8 <i>Vlastní frekvence generátoru pro variantu VI</i> .....	36
Tab. 9 <i>Vlastní frekvence generátoru pro variantu VII</i> .....	36
Tab. 10 <i>Limity maximálních hodnot vibrací výchylky, rychlosti a zrychlení</i> .....	38
Tab. 11 <i>Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu I</i> .....	39
Tab. 12 <i>Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu II</i> .....	41
Tab. 13 <i>Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu III</i> .....	43
Tab. 14 <i>Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu IV</i> .....	44
Tab. 15 <i>Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu V</i> .....	46
Tab. 16 <i>Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu VI</i> .....	48
Tab. 17 <i>Hodnoty výchylky a rychlosti pro variantu VII</i> .....	49
Tab. 18 <i>Porovnání výchylek jednotlivých variant pro 30 Hz</i> .....	53
Tab. 19 <i>Porovnání rychlostí jednotlivých variant pro 30 Hz</i> .....	54
Tab. 20 <i>Porovnání zrychlení jednotlivých variant pro 30 Hz</i> .....	54

**SEZNAM PŘÍLOH**

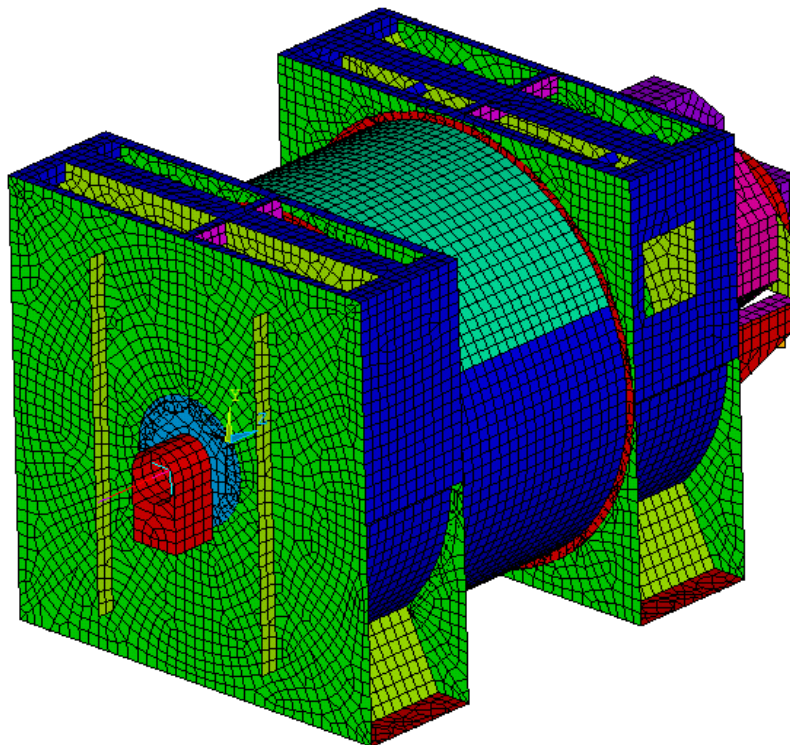
<b>GEOMETRICKÉ VARIANTY GENERÁTORU .....</b>	<b>64</b>
<b>VLASTNÍ TVARY KMITÁNÍ GENERÁTORU .....</b>	<b>68</b>
<b>VÝSLEDKY HARMONICKÉ ANALÝZY .....</b>	<b>75</b>
<b>Rychlosti pro variantu I .....</b>	<b>75</b>
<b>Rychlosti pro variantu II.....</b>	<b>76</b>
<b>Rychlosti pro variantu III .....</b>	<b>77</b>
<b>Rychlosti pro variantu IV .....</b>	<b>78</b>
<b>Rychlosti pro variantu V .....</b>	<b>79</b>
<b>Rychlosti pro variantu VI .....</b>	<b>80</b>
<b>Rychlosti pro variantu VII.....</b>	<b>81</b>
<b>Zrychlení pro variantu I .....</b>	<b>82</b>
<b>Zrychlení pro variantu II.....</b>	<b>83</b>
<b>Zrychlení pro variantu III.....</b>	<b>84</b>
<b>Zrychlení pro variantu IV .....</b>	<b>85</b>
<b>Zrychlení pro variantu V .....</b>	<b>86</b>
<b>Zrychlení pro variantu VI.....</b>	<b>87</b>
<b>Zrychlení pro variantu VII .....</b>	<b>88</b>

## PŘÍLOHY

## GEOMETRICKÉ VARIANTY GENERÁTORU

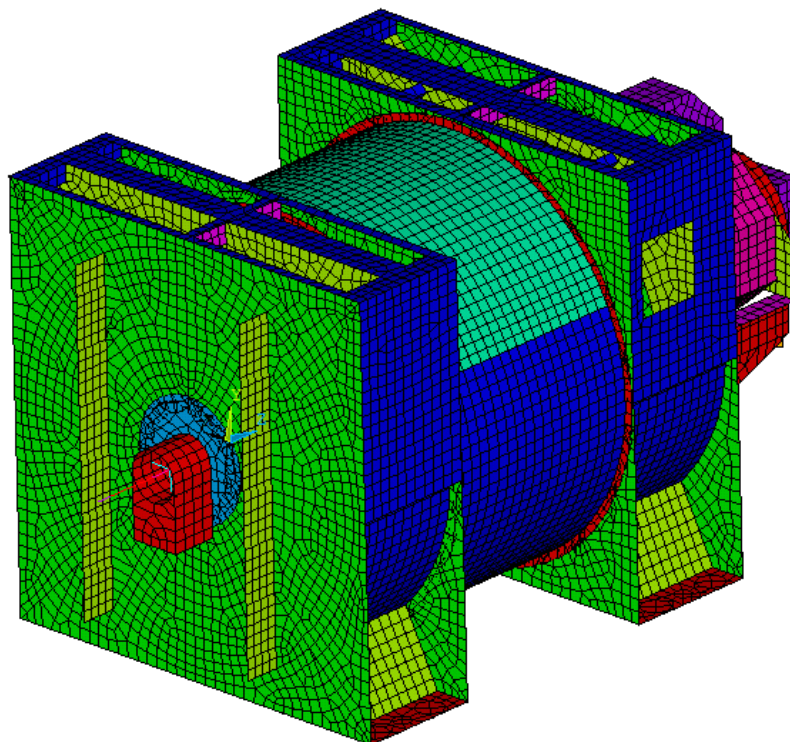


Obr. 45 Model geometrie generátoru varianta I

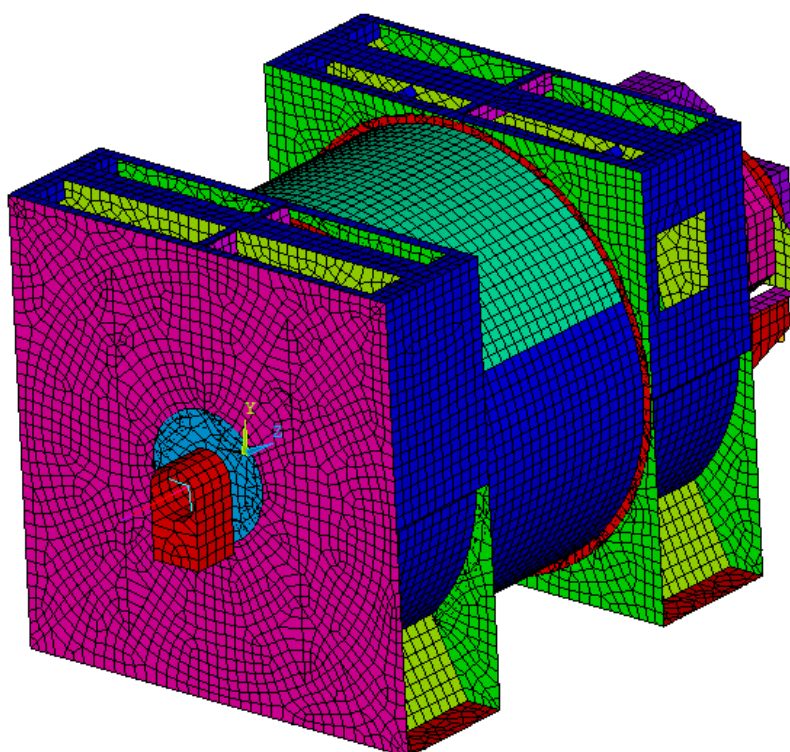


Obr. 46 Model geometrie generátoru varianta II

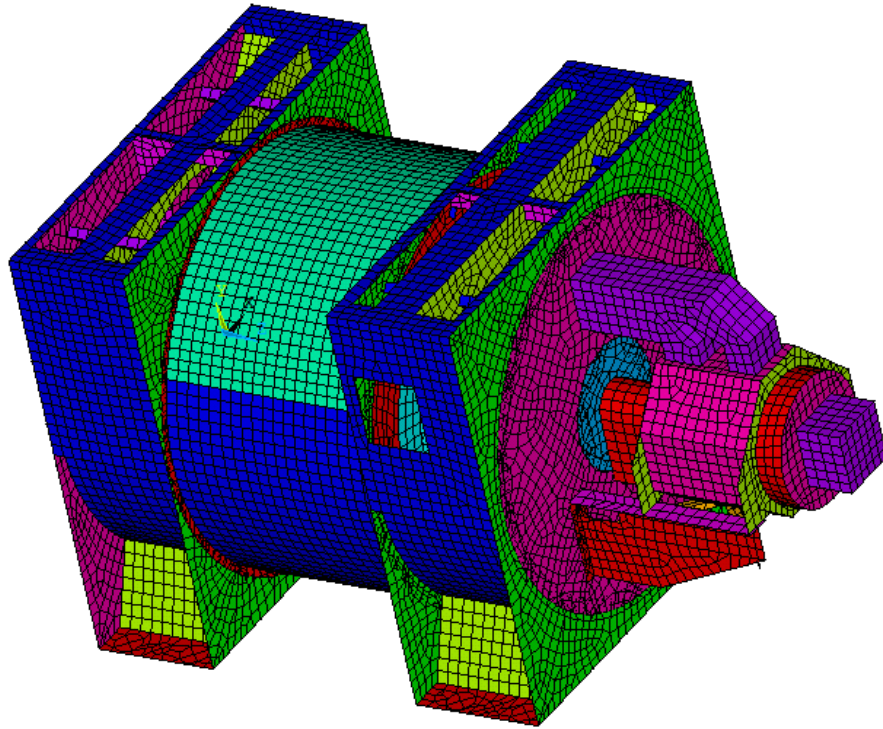




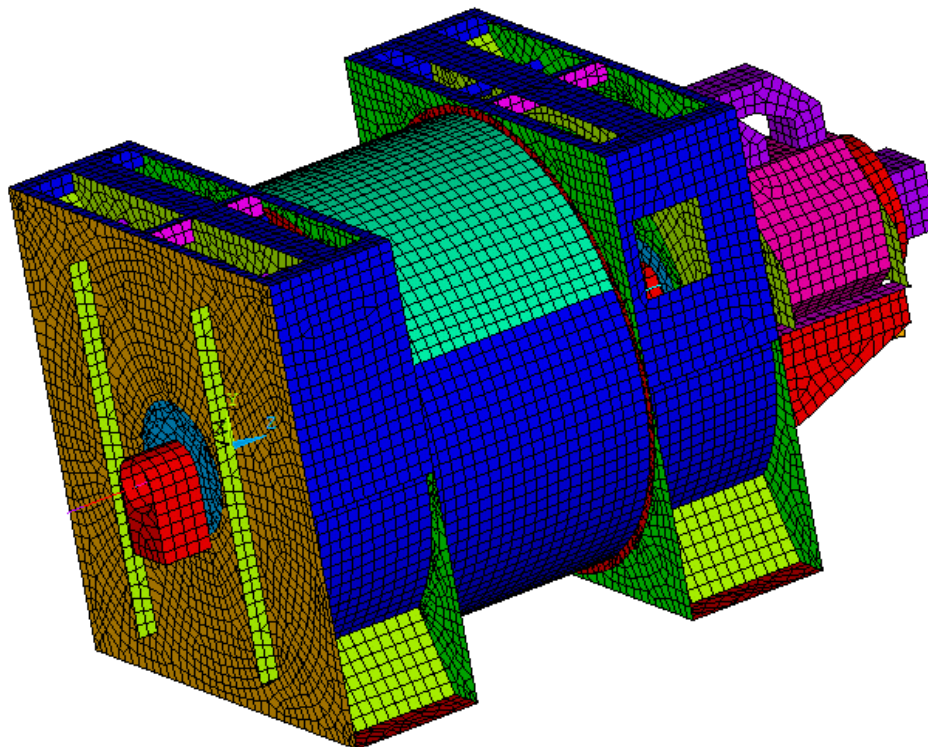
Obr. 47 Model geometrie generátoru varianta III



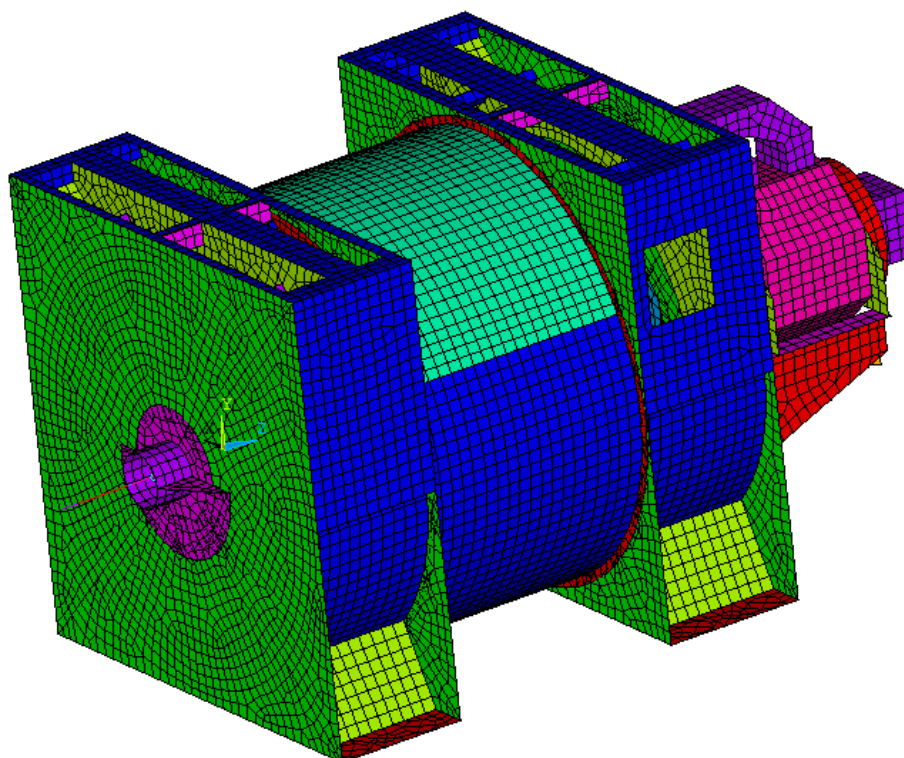
Obr. 48 Model geometrie generátoru varianta IV



Obr. 49 Model geometrie generátoru varianta V

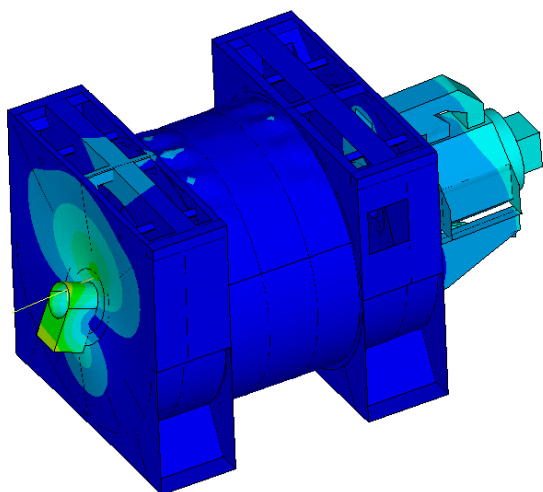


Obr. 50 Model geometrie generátoru varianta VI

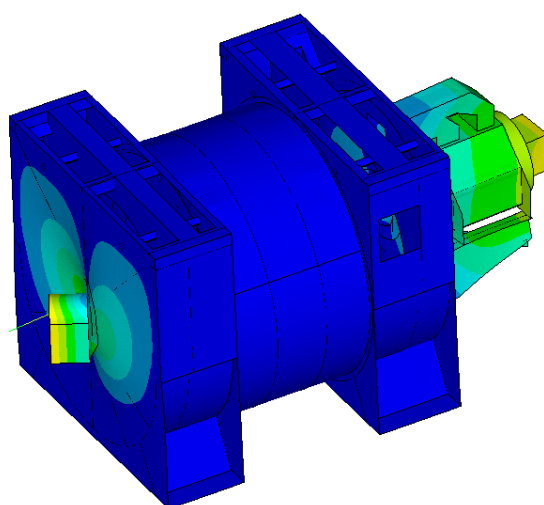


Obr. 51 *Model geometrie generátoru varianta VII*

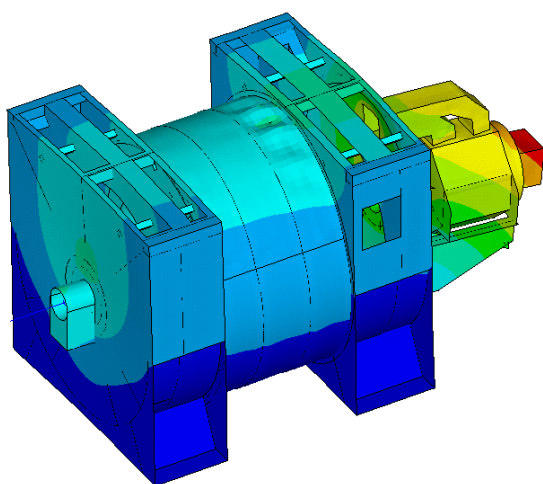
## VLASTNÍ TVARY KMITÁNÍ GENERÁTORU



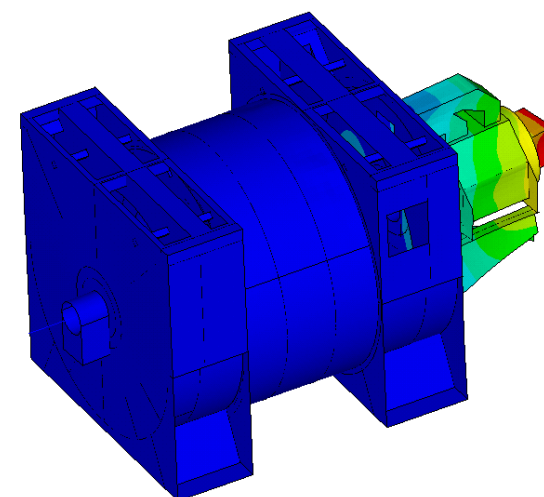
a) 1. vlastní tvar



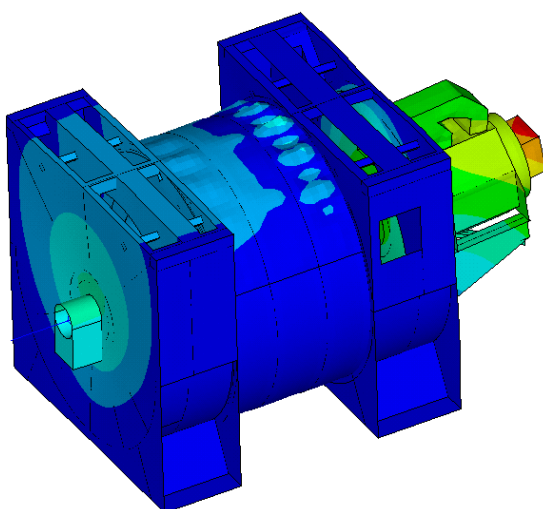
b) 2. vlastní tvar



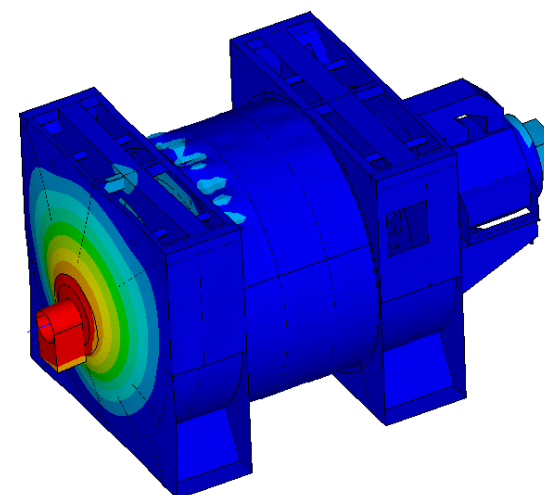
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar



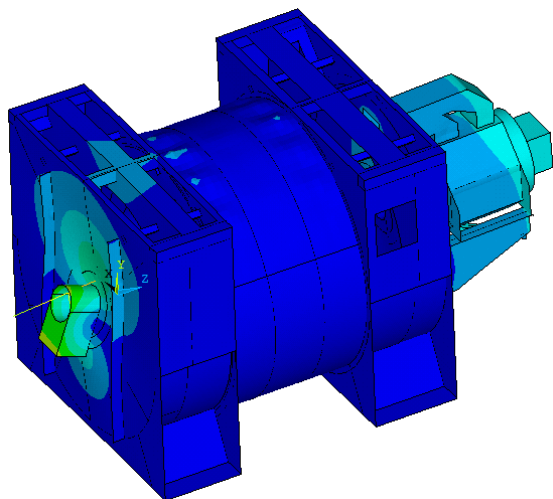
e) 5. vlastní tvar



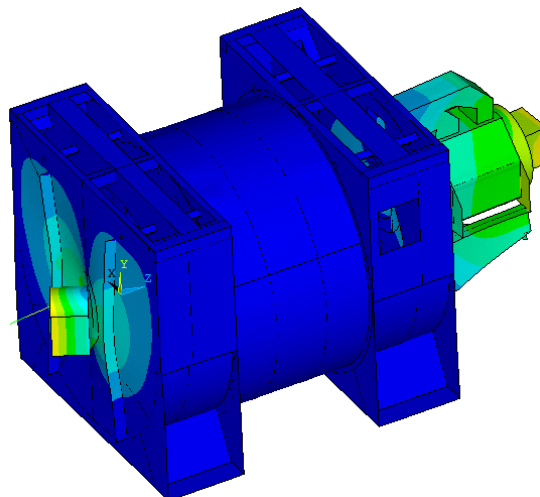
f) 6. vlastní tvar

Obr. 52 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu I

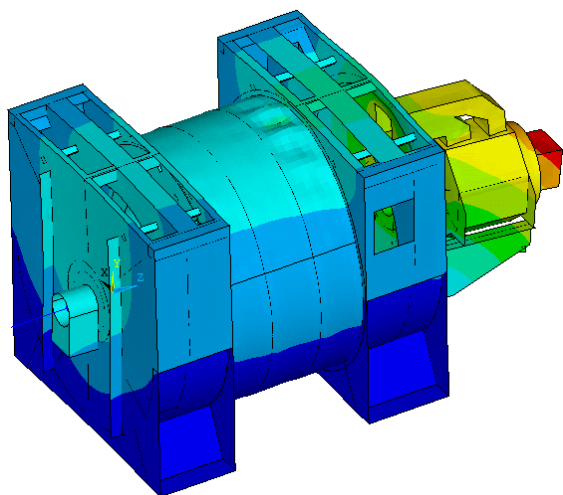




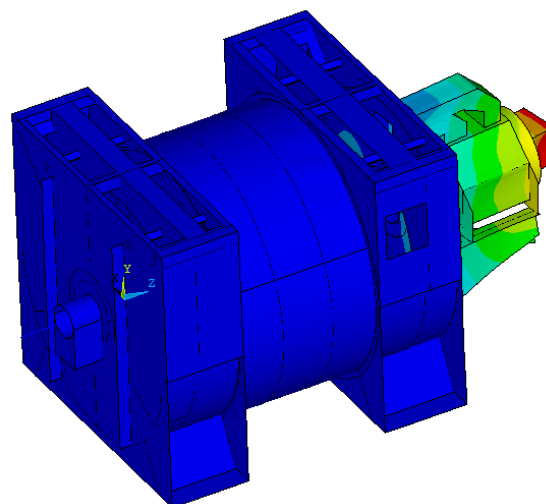
a) 1. vlastní tvar



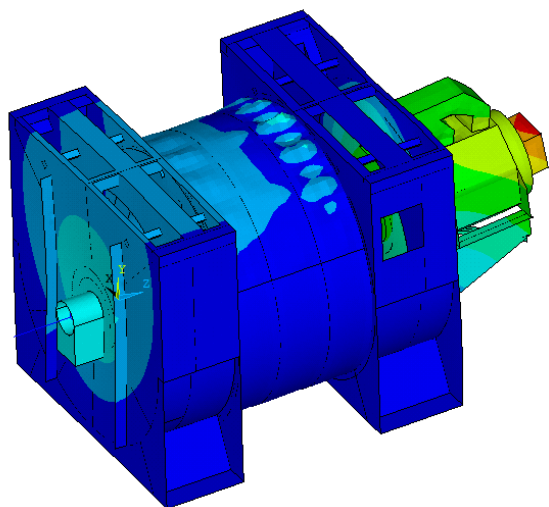
b) 2. vlastní tvar



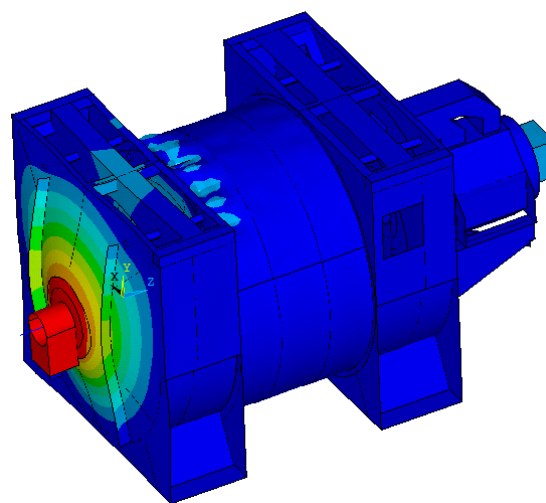
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar

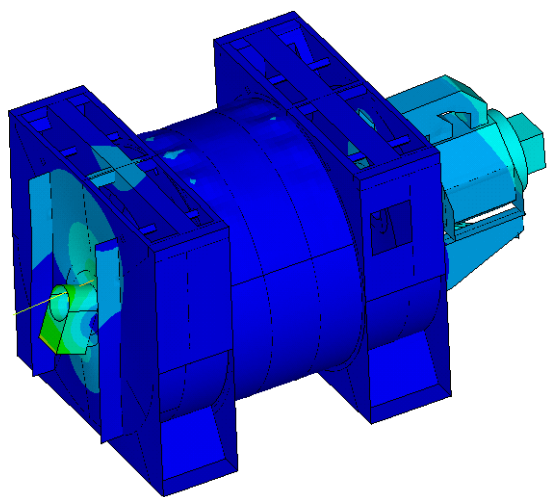


e) 5. vlastní tvar

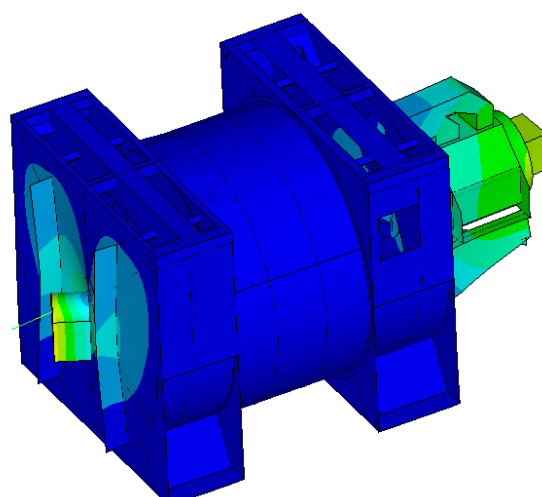


f) 6. vlastní tvar

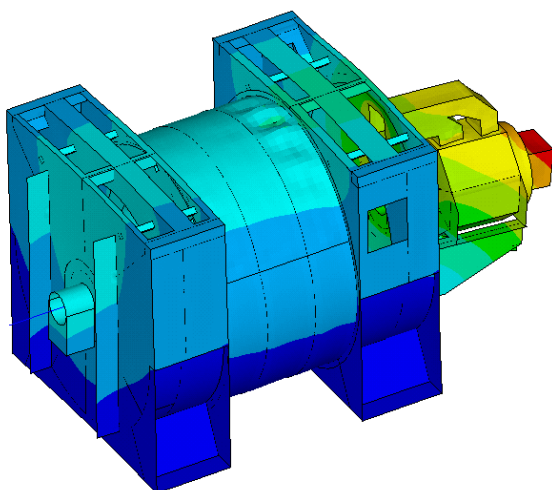
Obr. 53 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu II



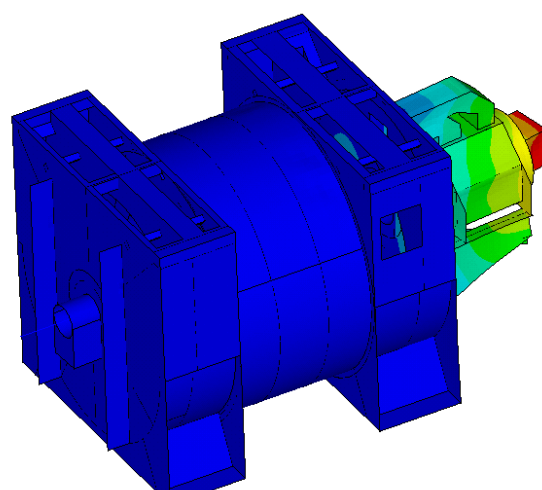
a) 1. vlastní tvar



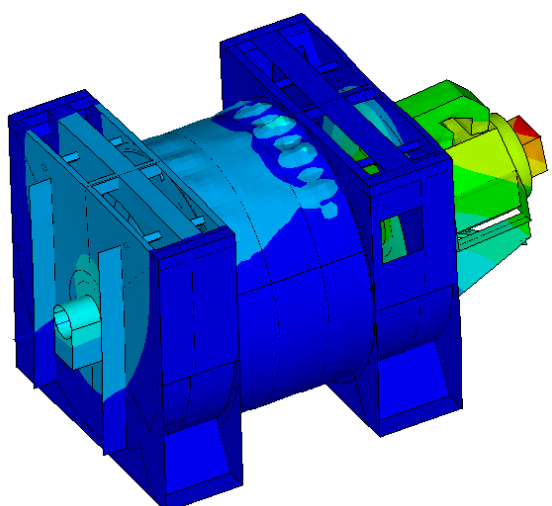
b) 2. vlastní tvar



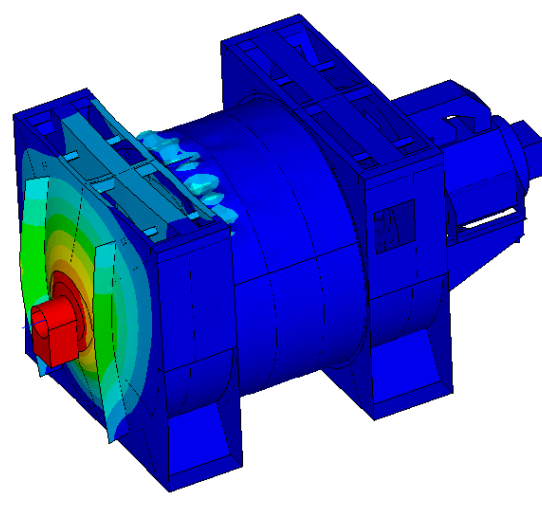
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar

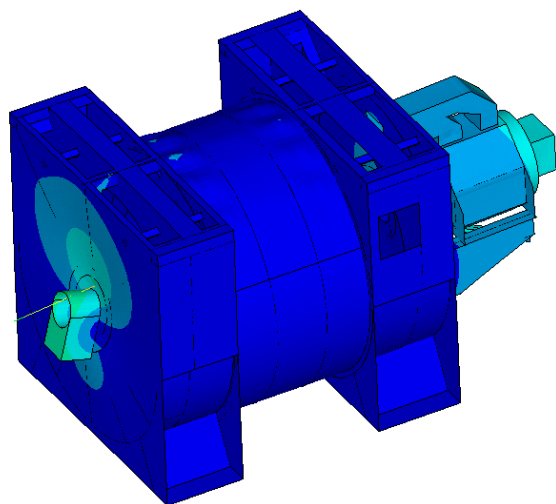


e) 5. vlastní tvar

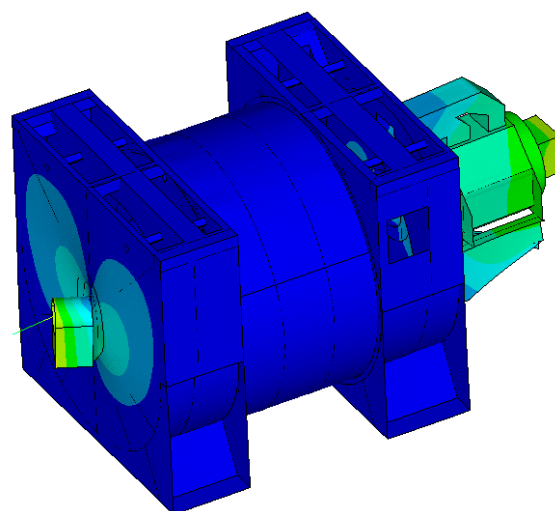


f) 6. vlastní tvar

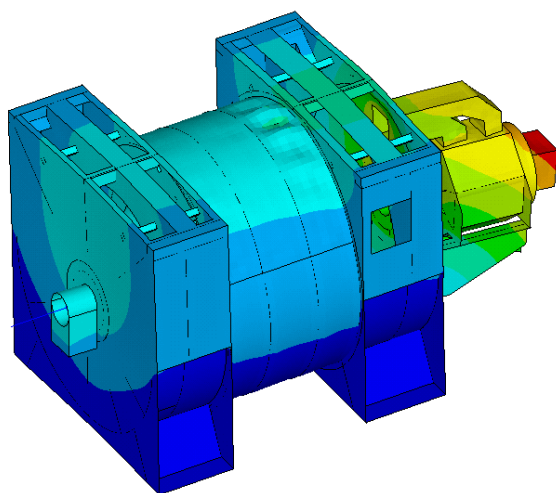
Obr. 54 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu III



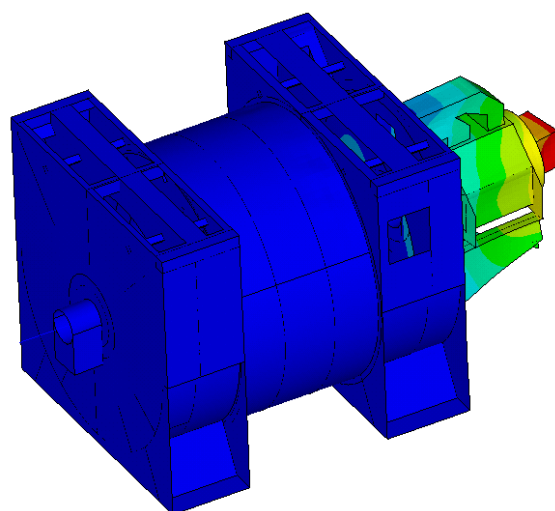
a) 1. vlastní tvar



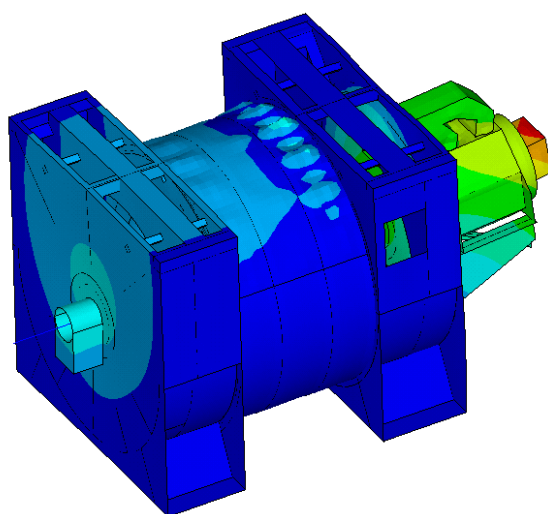
b) 2. vlastní tvar



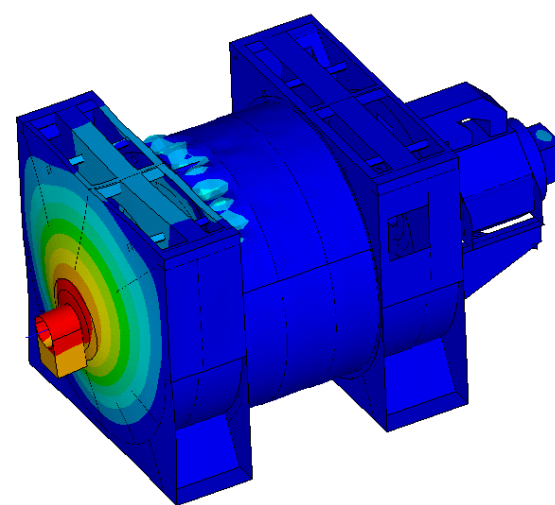
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar

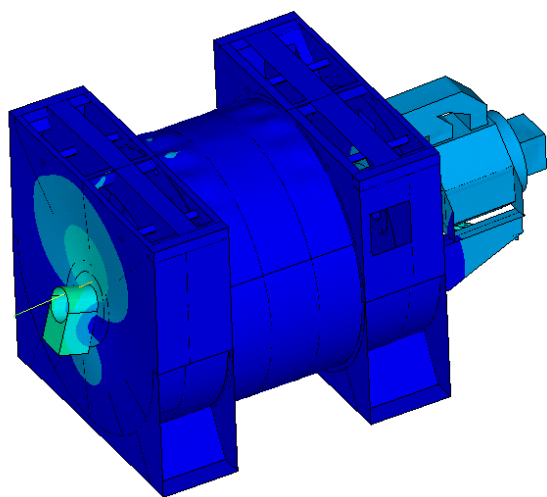


e) 5. vlastní tvar

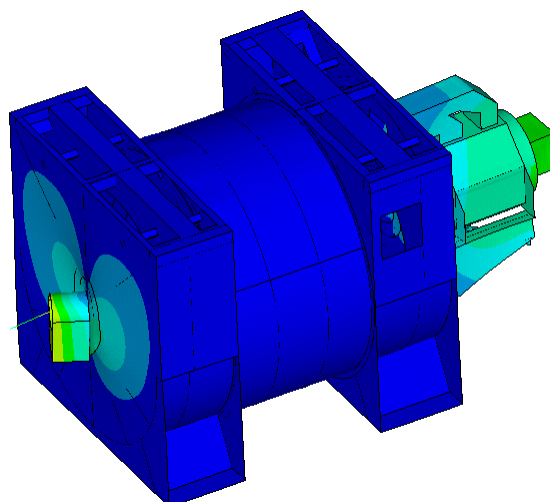


f) 6. vlastní tvar

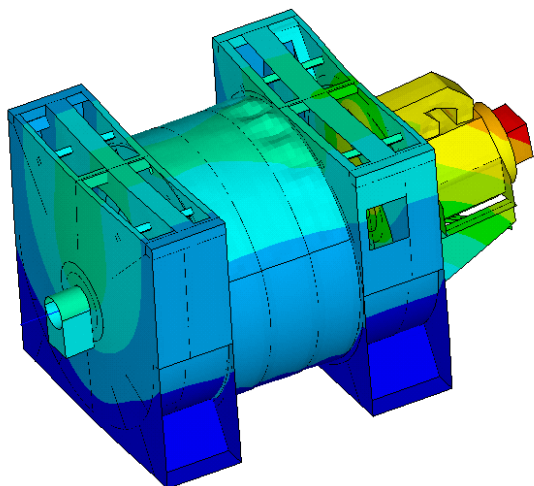
Obr. 55 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu IV



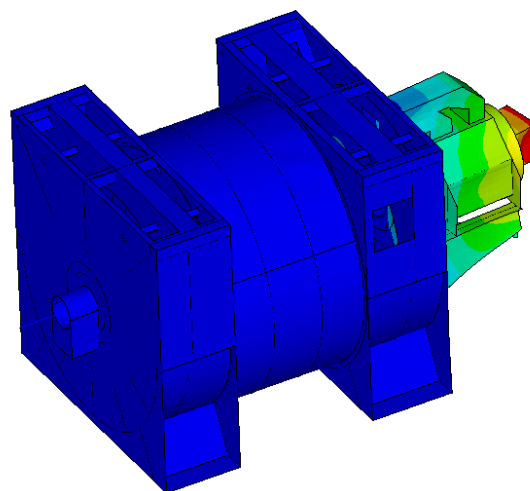
a) 1. vlastní tvar



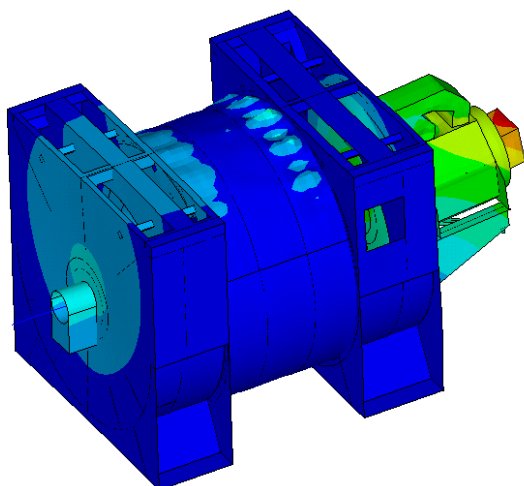
b) 2. vlastní tvar



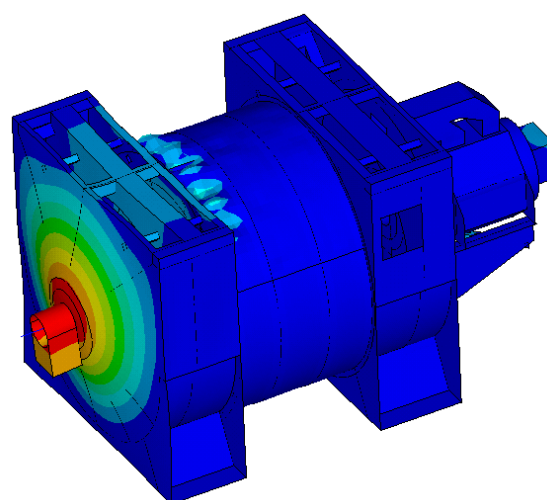
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar



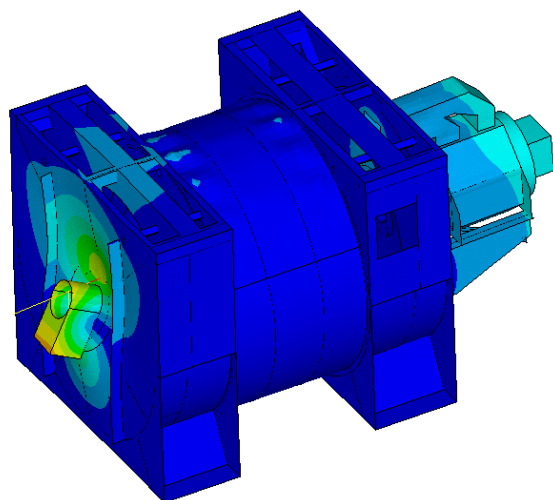
e) 5. vlastní tvar



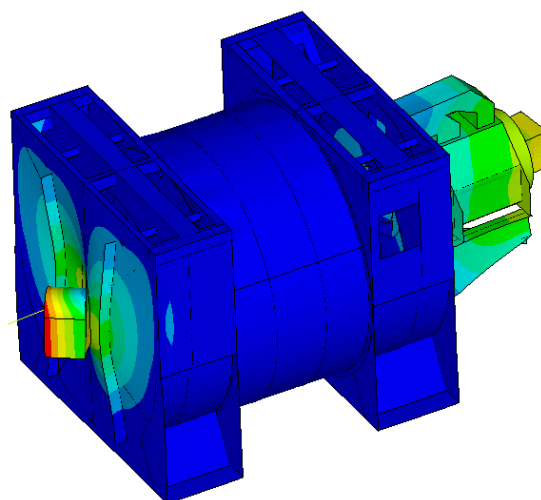
f) 6. vlastní tvar

Obr. 56 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu V

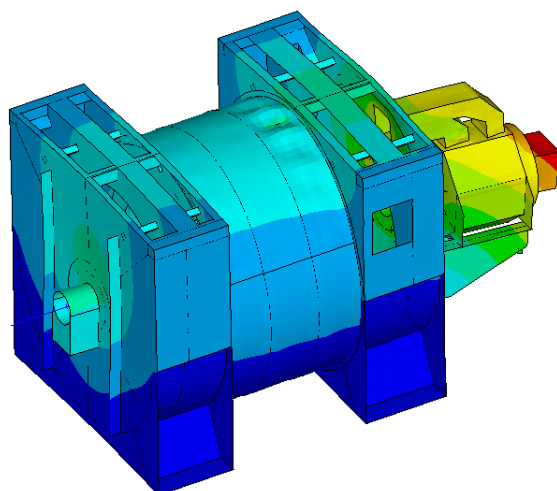




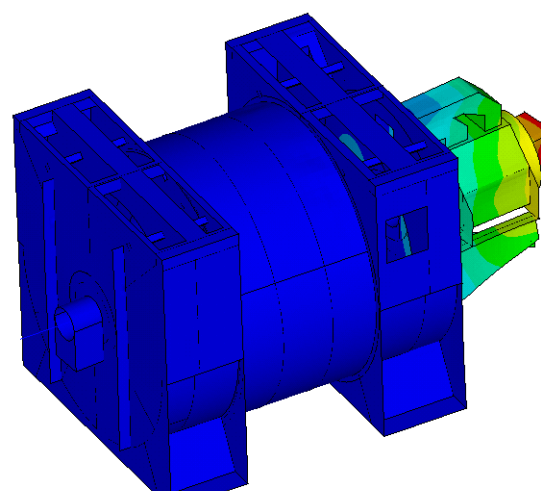
a) 1. vlastní tvar



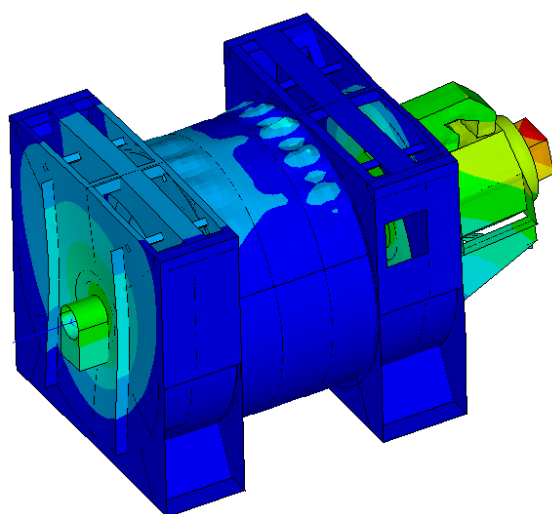
b) 2. vlastní tvar



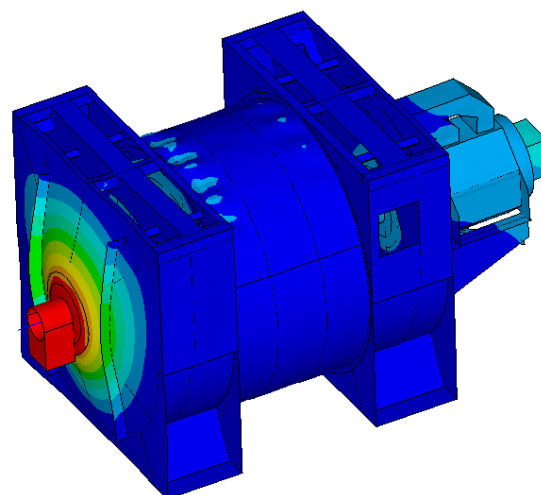
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar

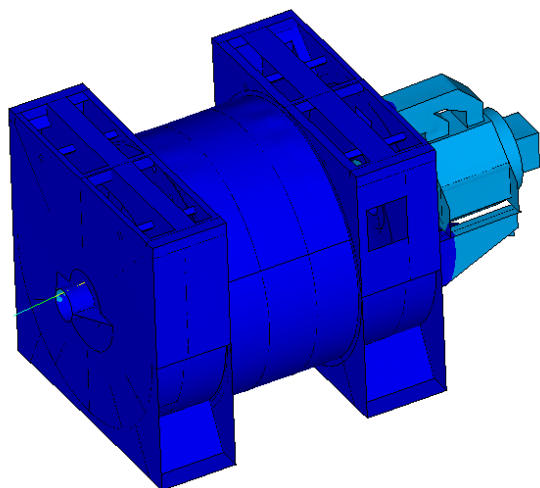


e) 5. vlastní tvar

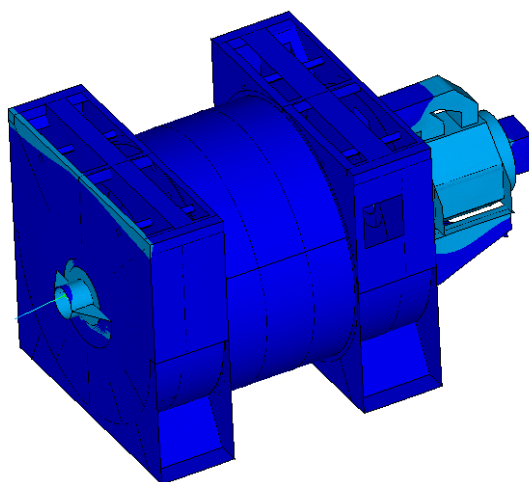


f) 6. vlastní tvar

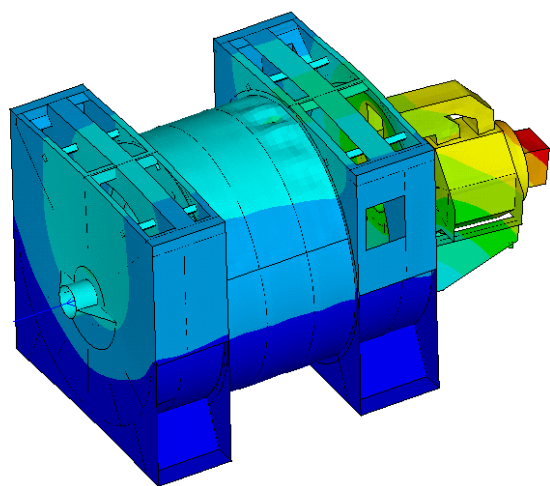
Obr. 57 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu VI



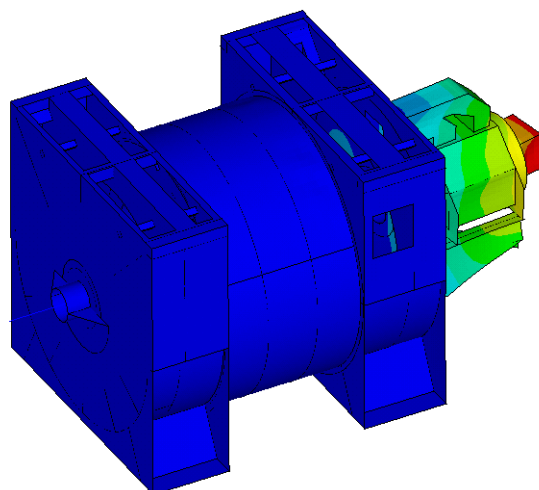
a) 1. vlastní tvar



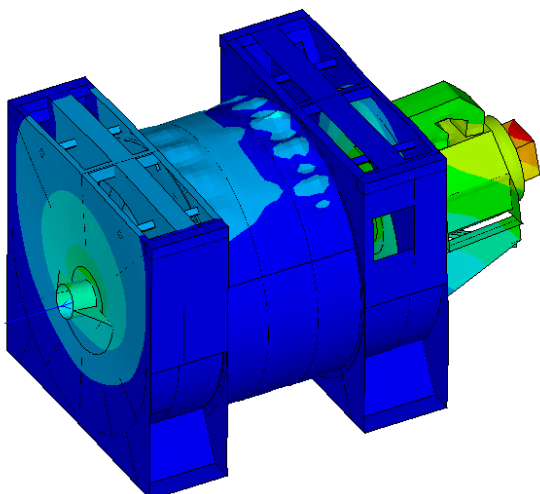
b) 2. vlastní tvar



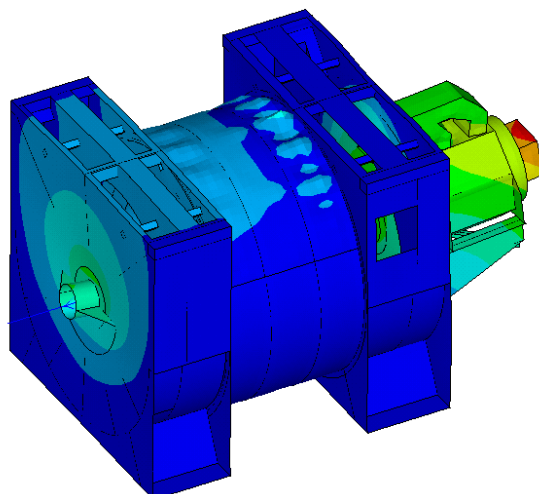
c) 3. vlastní tvar



d) 4. vlastní tvar



e) 5. vlastní tvar

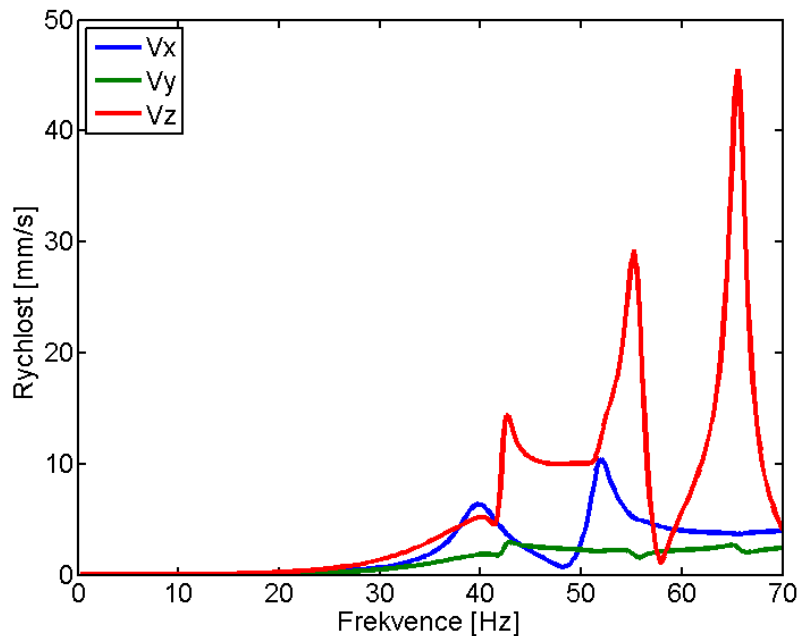


f) 6. vlastní tvar

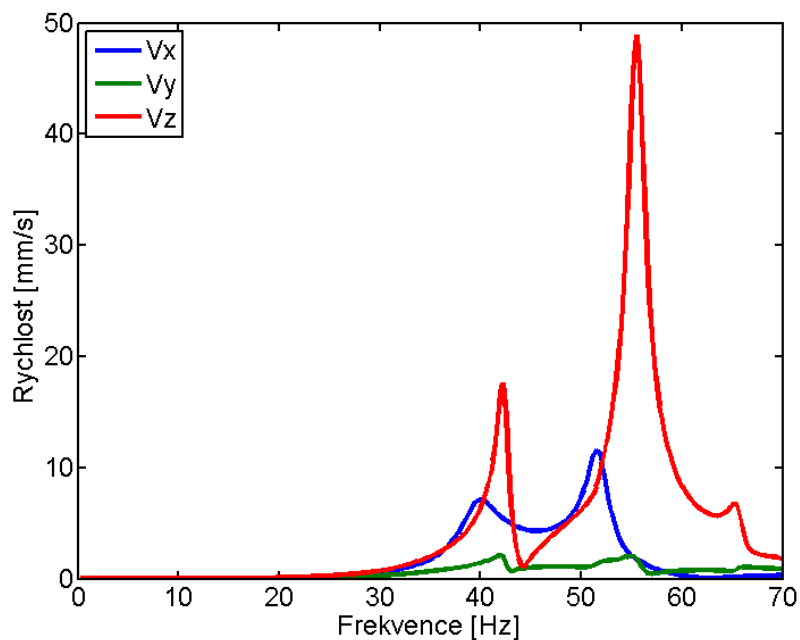
Obr. 58 Vlastní tvary kmitání generátoru pro variantu VII

## VÝSLEDKY HARMONICKÉ ANALÝZY

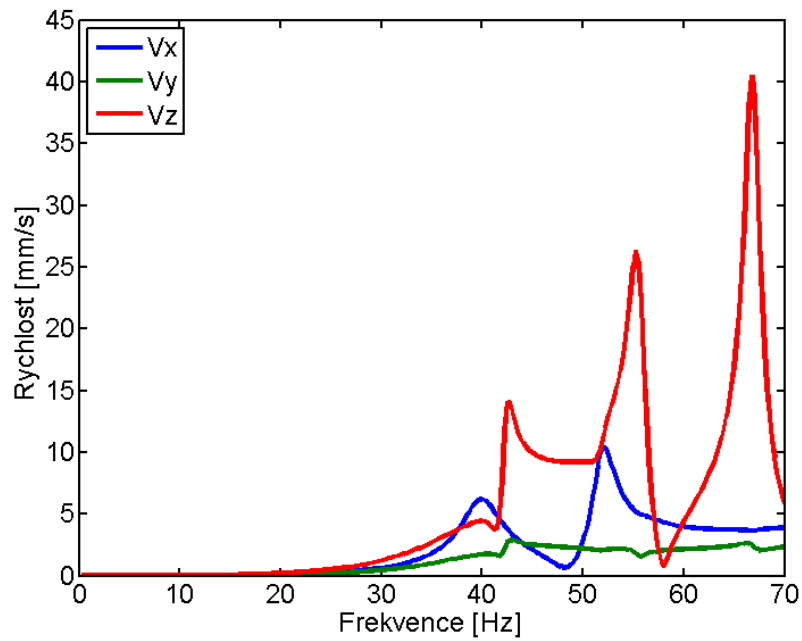
## Rychlosti pro variantu I



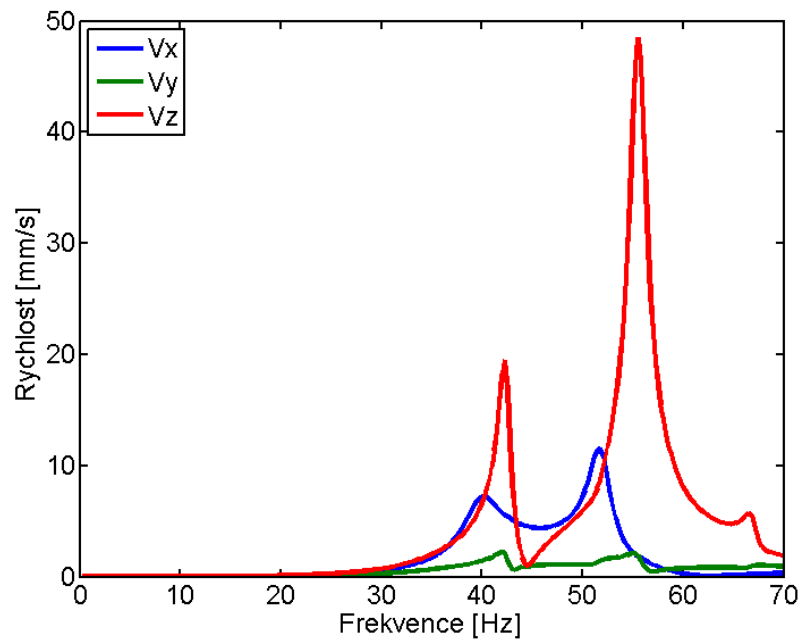
Obr. 59 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I



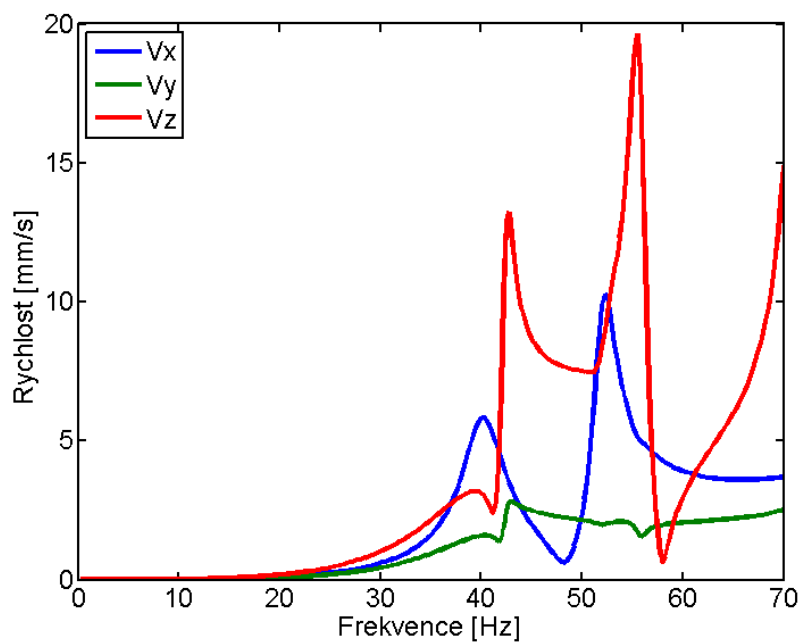
Obr. 60 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I

**Rychlosti pro variantu II**

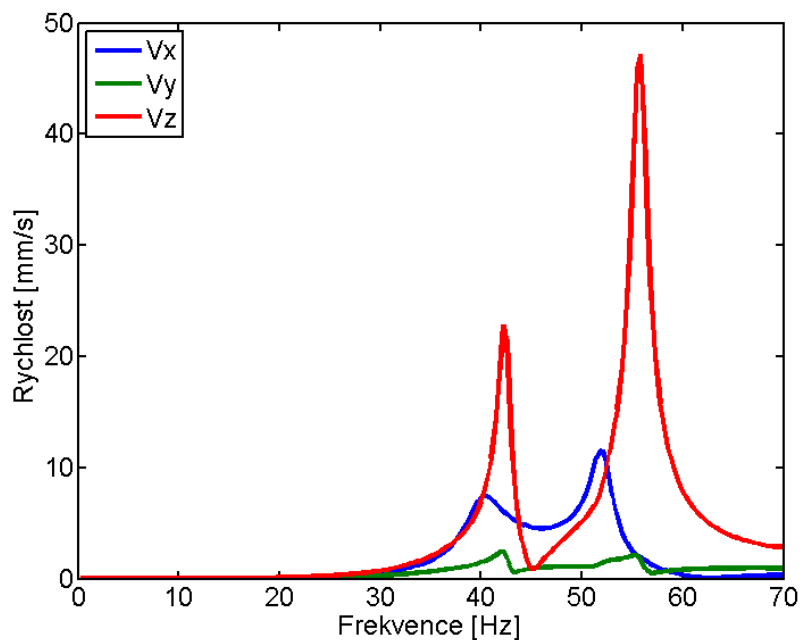
Obr. 61 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II



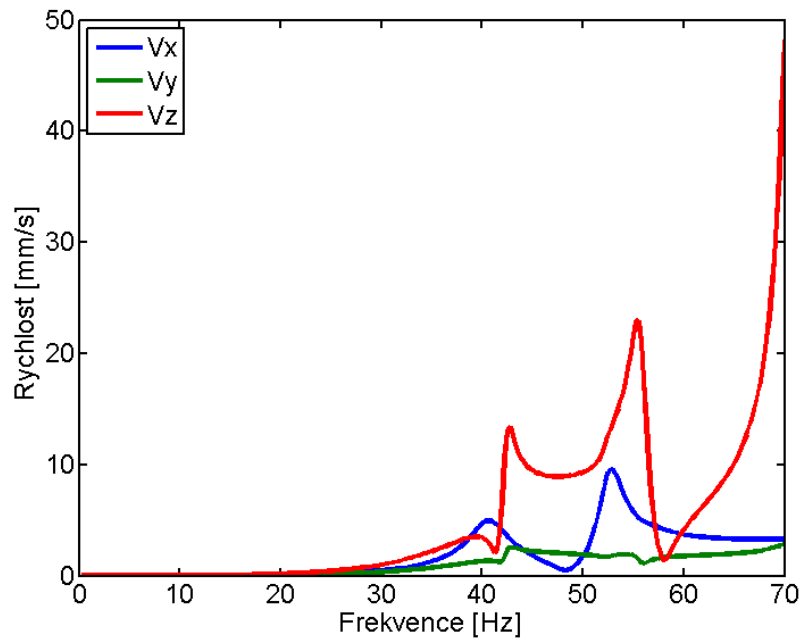
Obr. 62 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II

**Rychlosti pro variantu III**

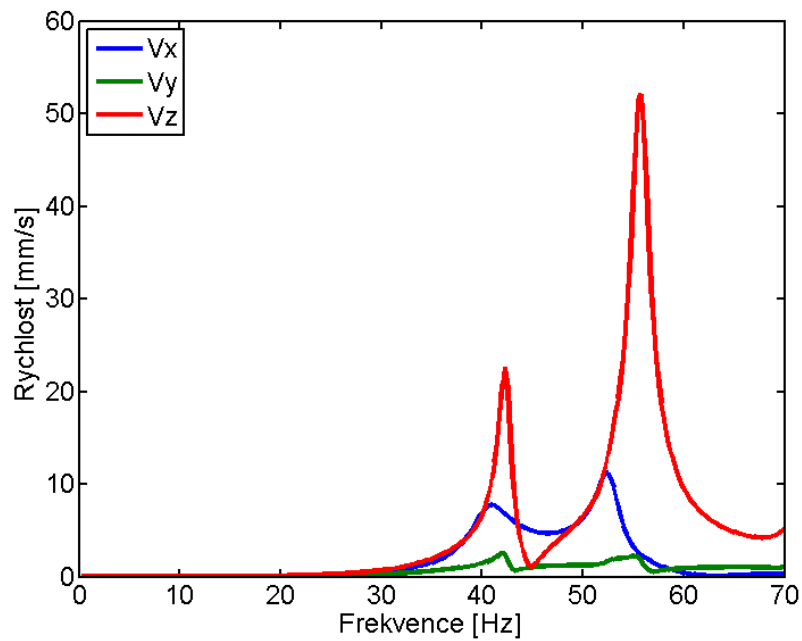
Obr. 63 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III



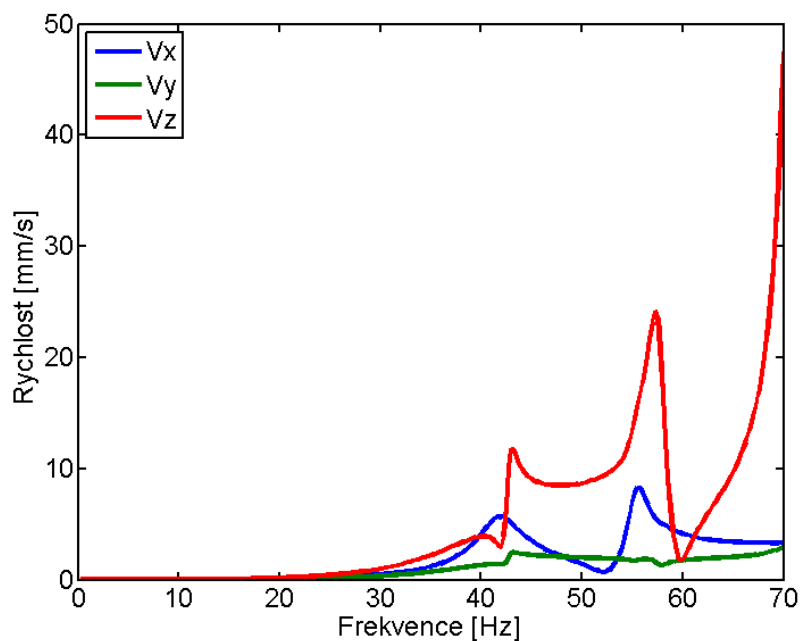
Obr. 64 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III

**Rychlosti pro variantu IV**

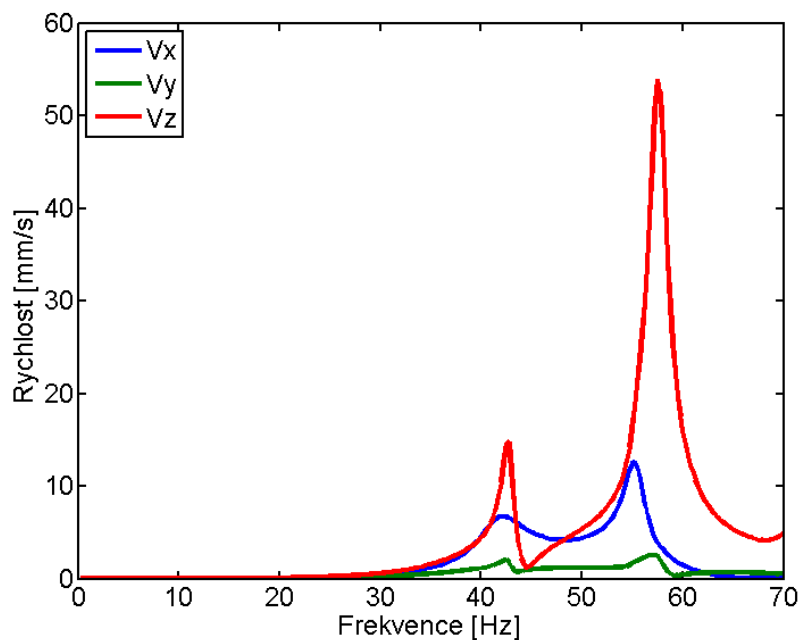
Obr. 65 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV



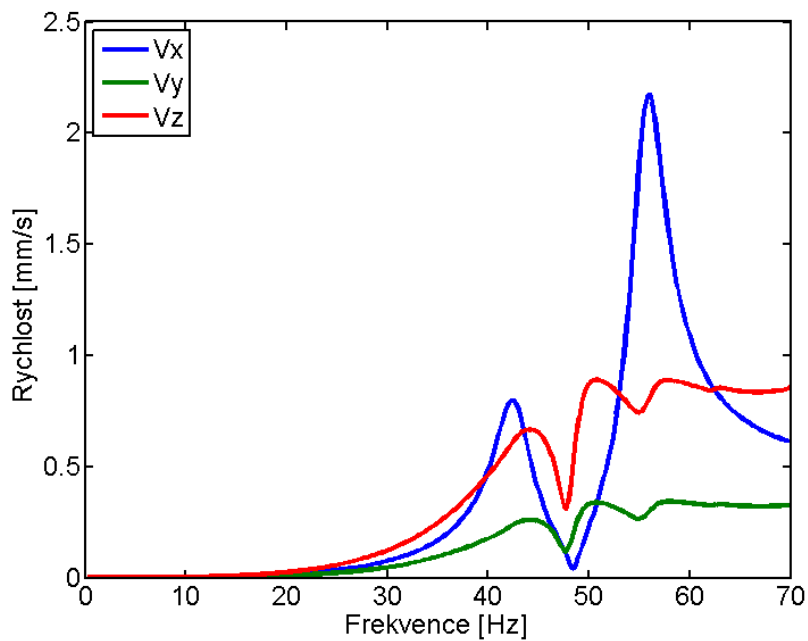
Obr. 66 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV

**Rychlosti pro variantu V**

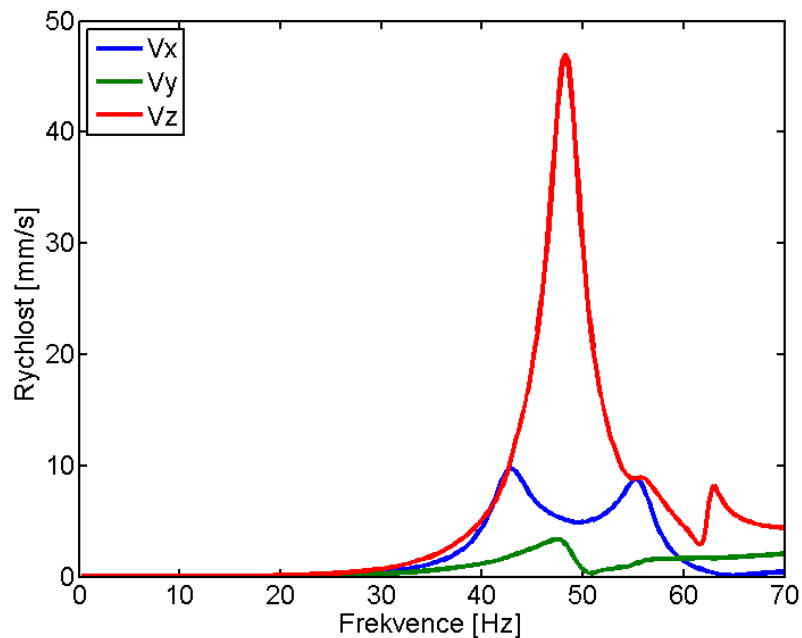
Obr. 67 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V



Obr. 68 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V

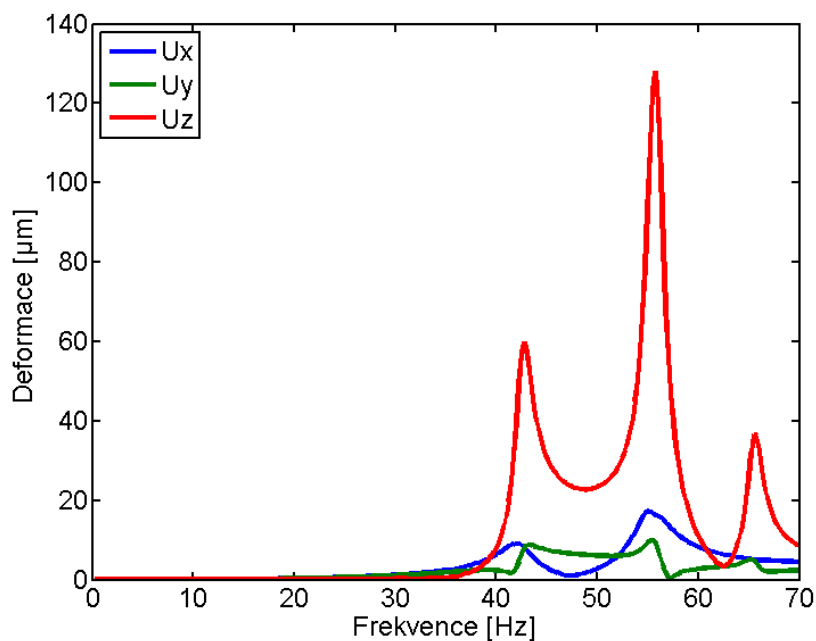
**Rychlosti pro variantu VI**

Obr. 69 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI

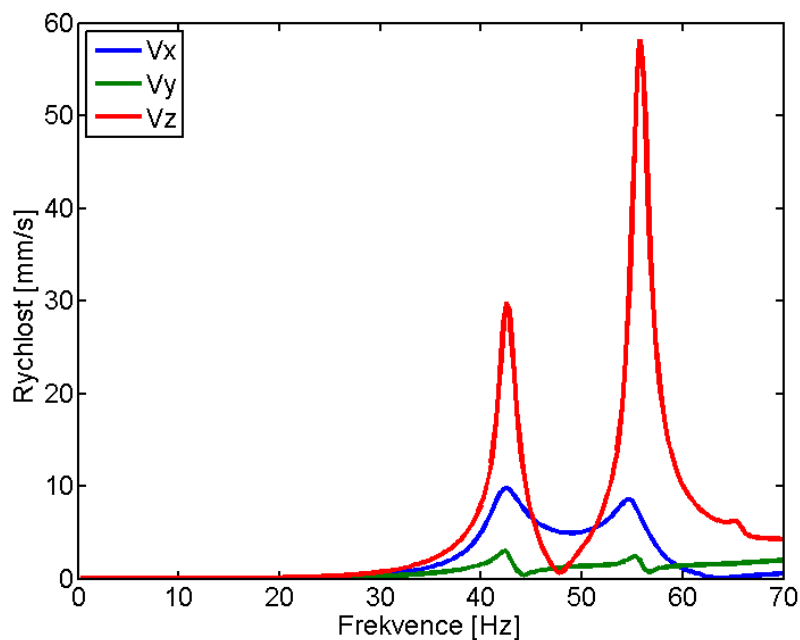


Obr. 70 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI

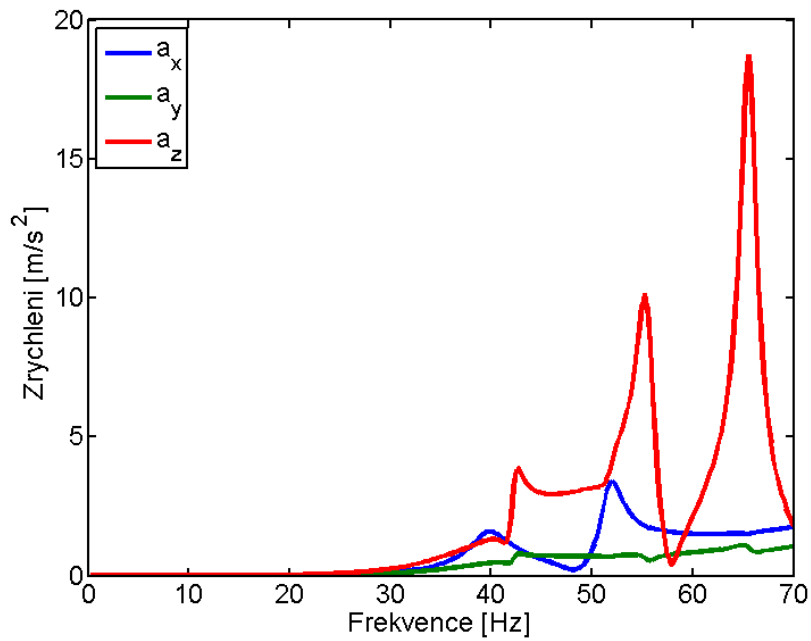


**Rychlosti pro variantu VII**

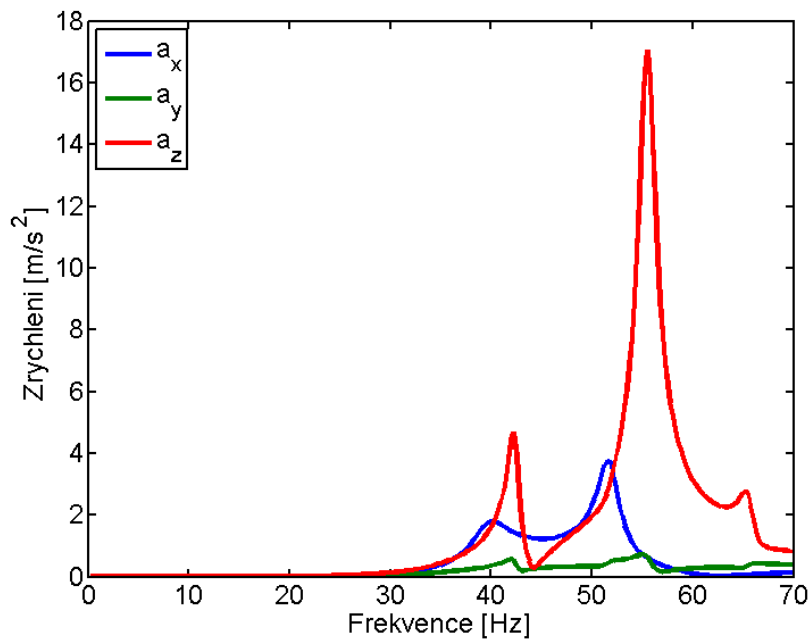
Obr. 71 Rychlost levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII



Obr. 72 Rychlost pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII

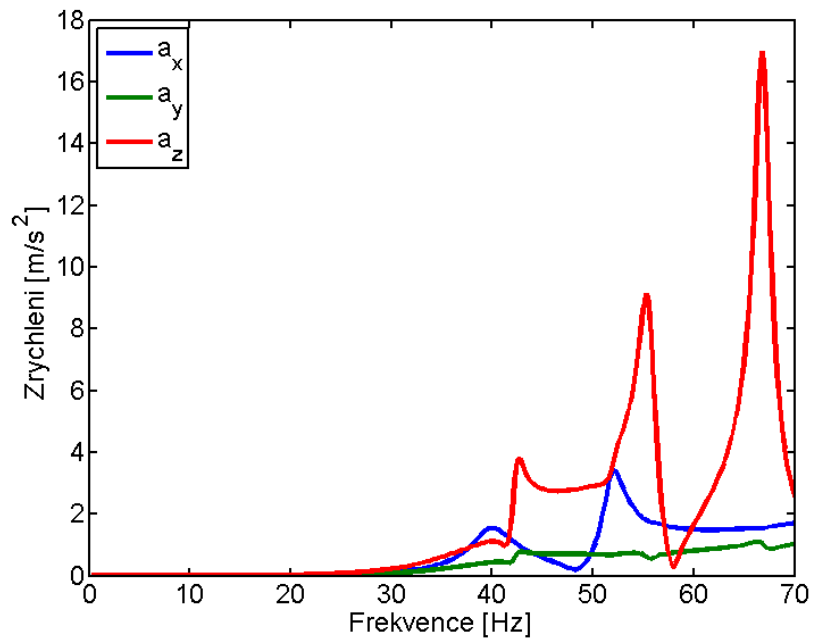
**Zrychlení pro variantu I**

Obr. 73 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I

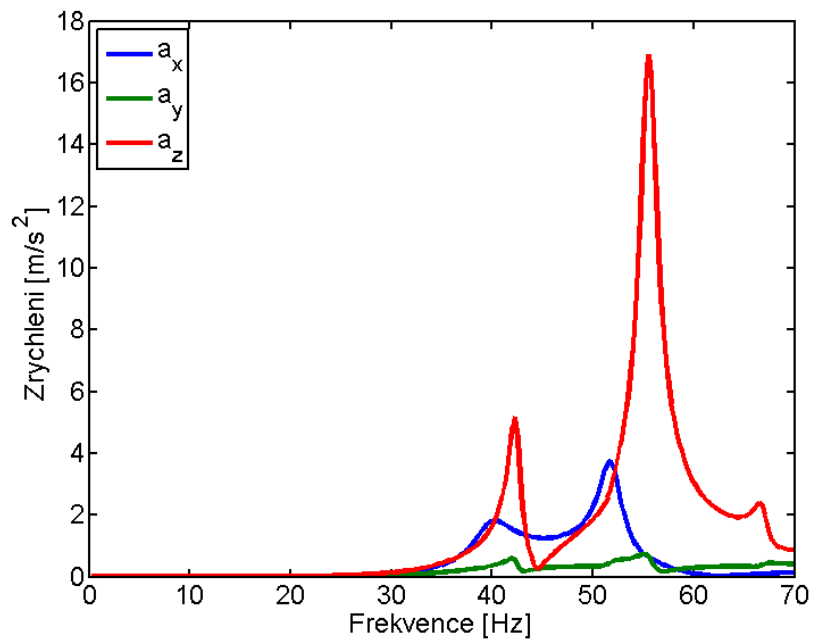


Obr. 74 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu I

## Zrychlení pro variantu II

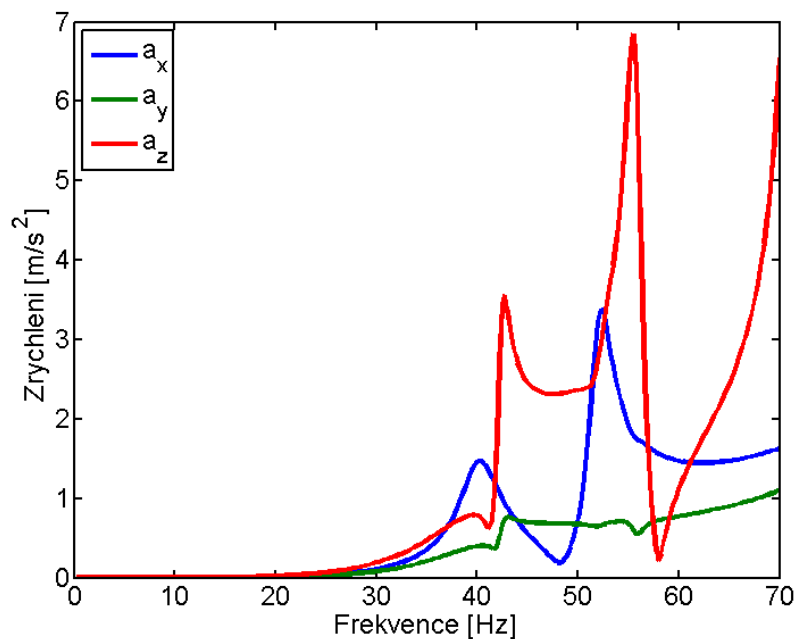


Obr. 75 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II

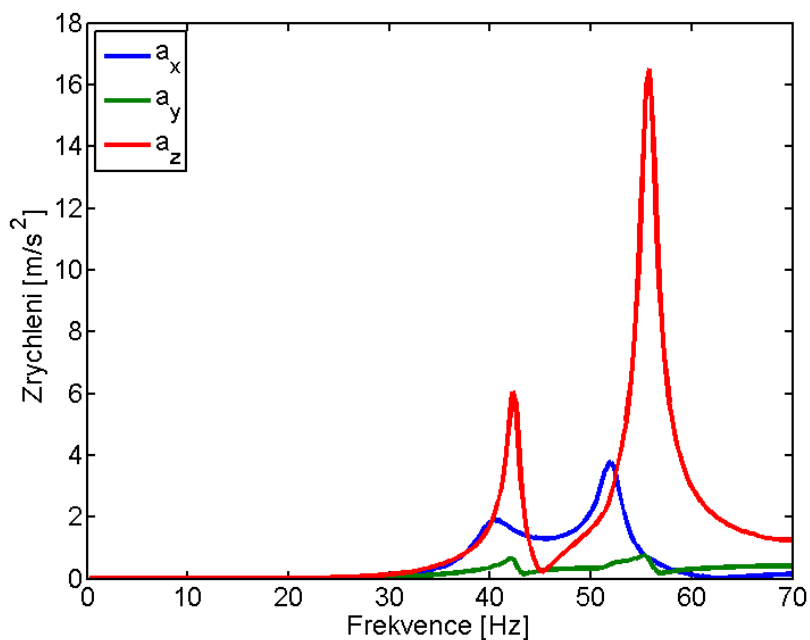


Obr. 76 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu II

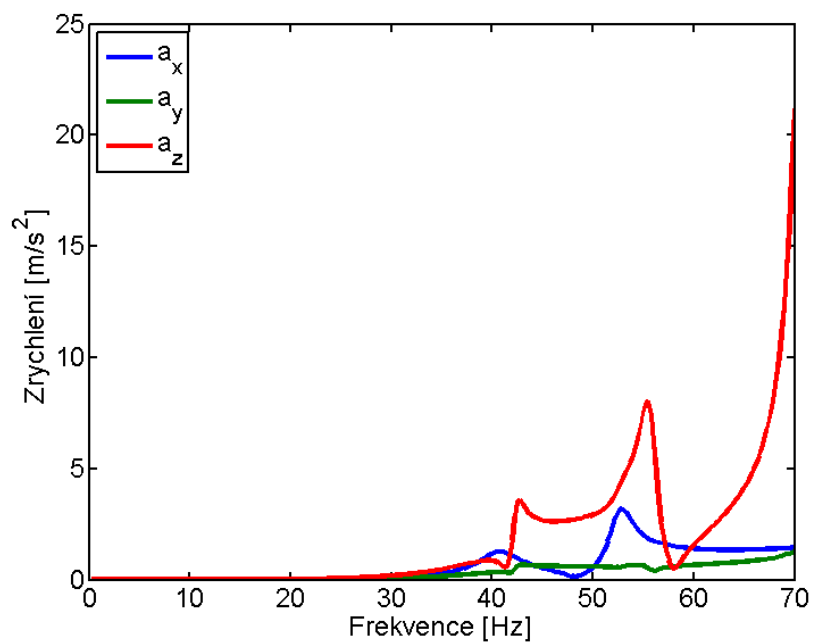
### Zrychlení pro variantu III



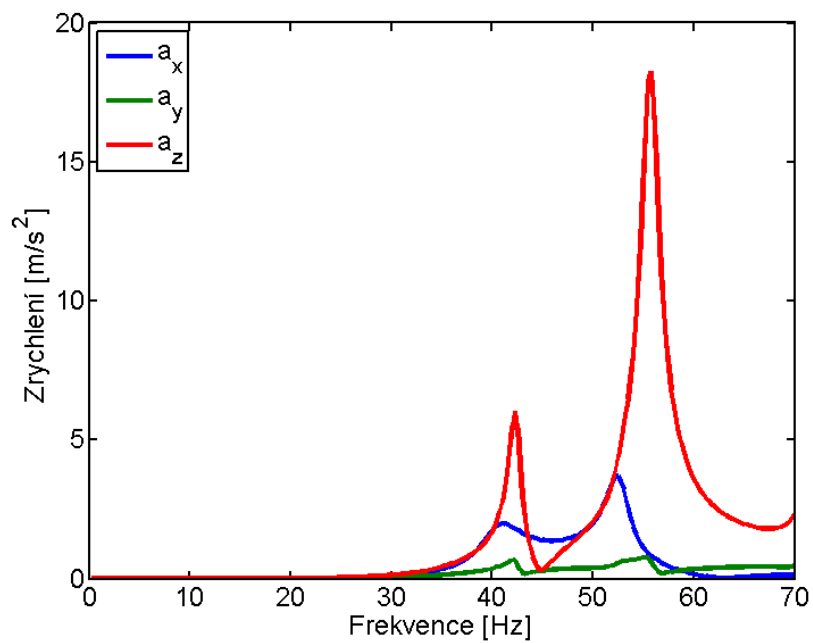
Obr. 77 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III



Obr. 78 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu III

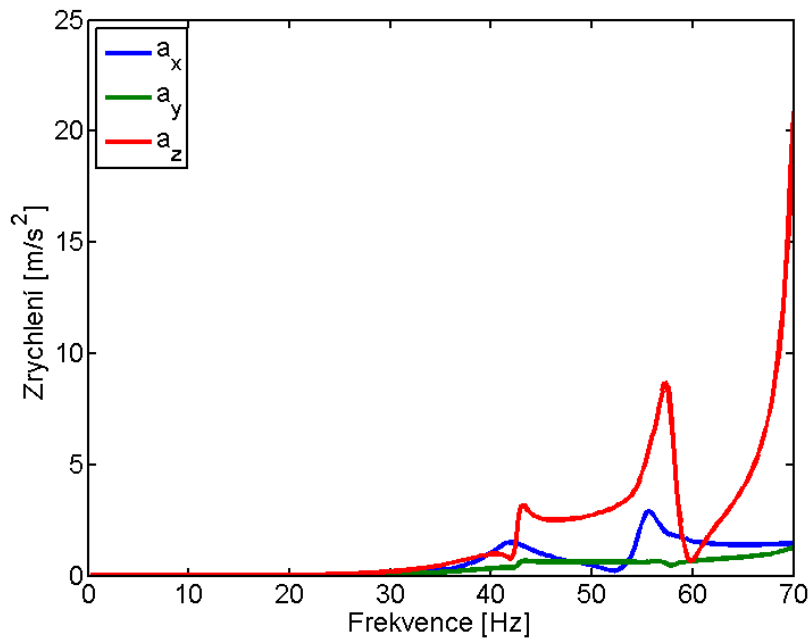
**Zrychlení pro variantu IV**

Obr. 79 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV

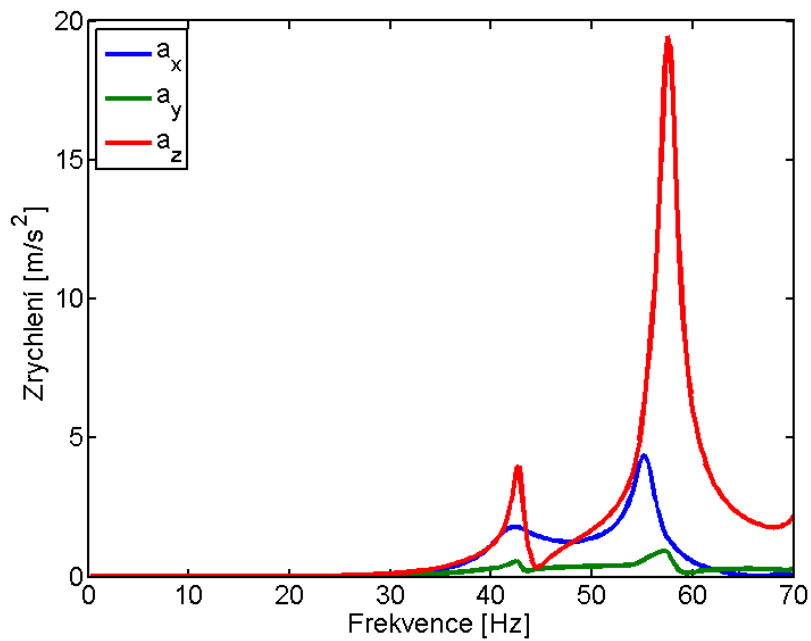


Obr. 80 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu IV

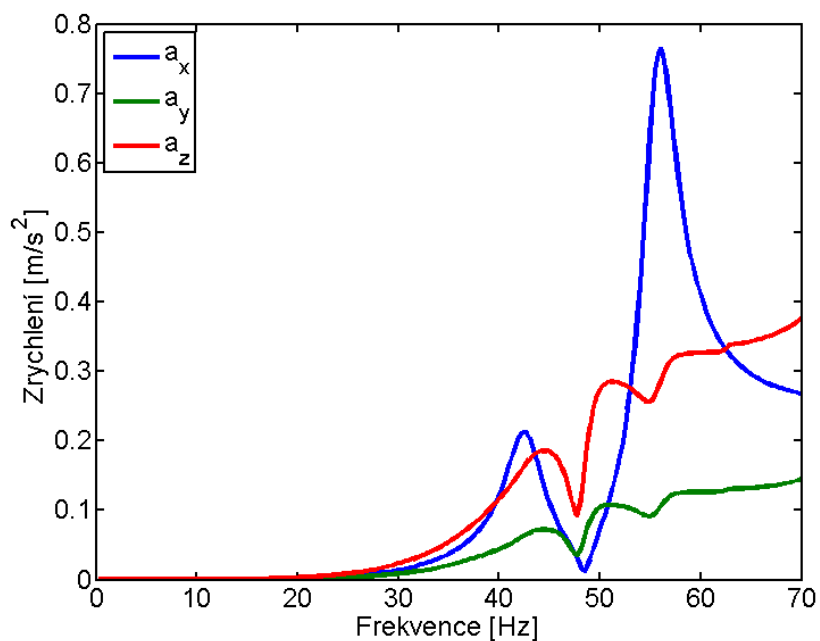
## Zrychlení pro variantu V



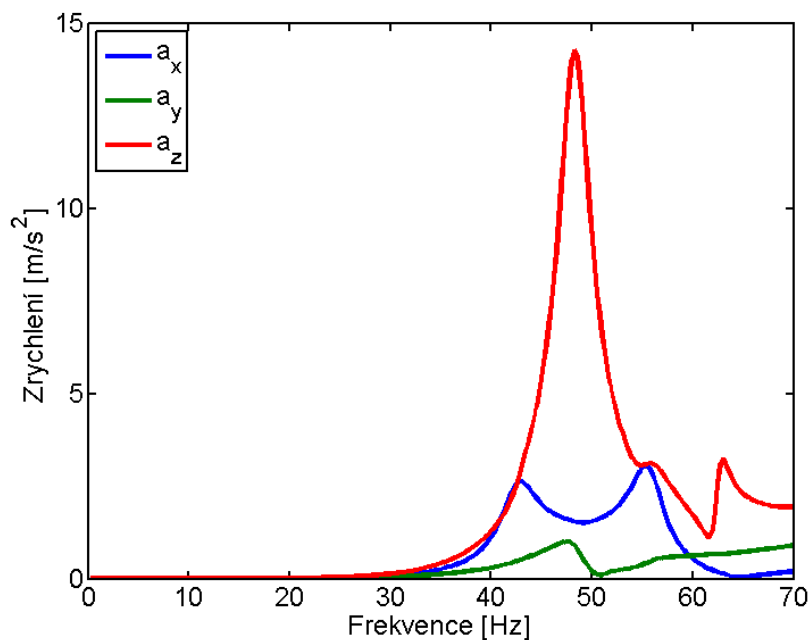
Obr. 81 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V



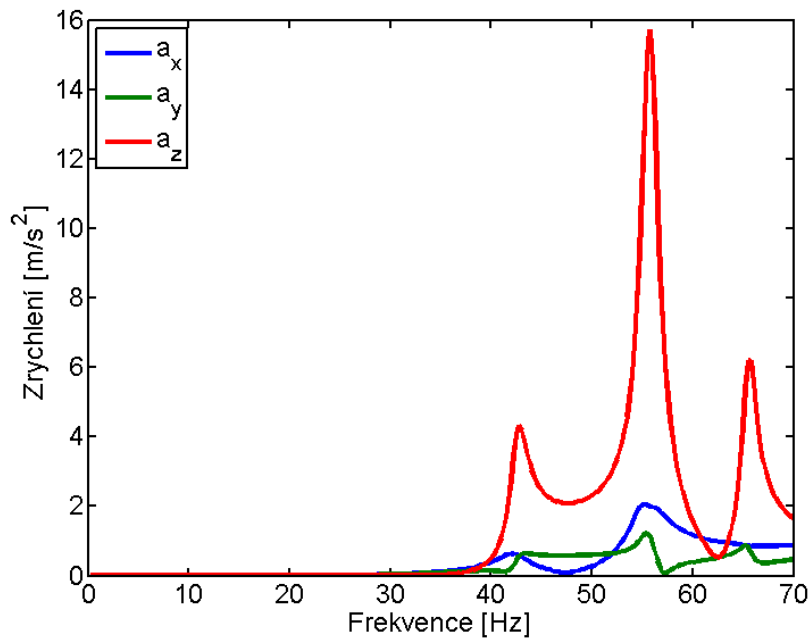
Obr. 82 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu V

**Zrychlení pro variantu VI**

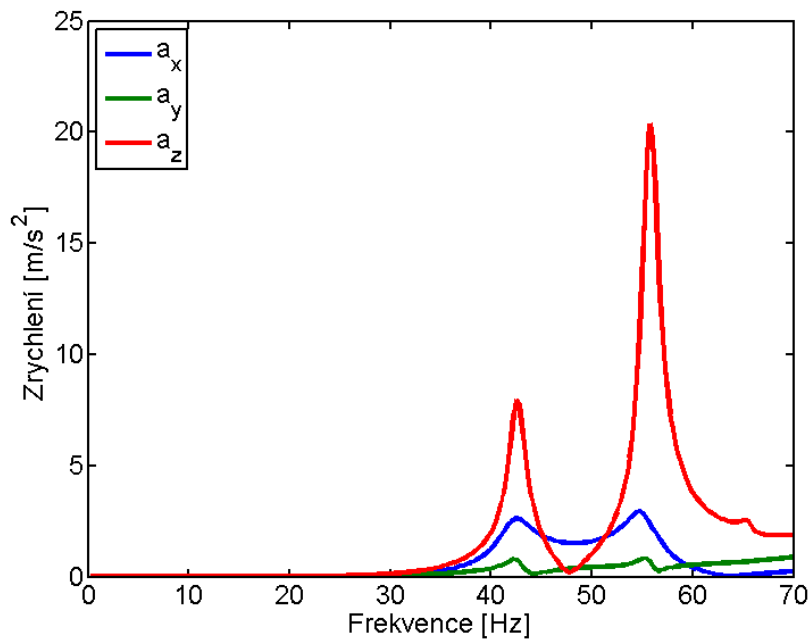
Obr. 83 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI



Obr. 84 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VI

**Zrychlení pro variantu VII**

Obr. 85 Zrychlení levého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII



Obr. 86 Zrychlení pravého ložiska v závislosti na frekvenci pro variantu VII