

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Chvění asynchronního stroje

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef VESELÝ**
Osobní číslo: **E10N0037K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Chvění asynchronního stroje**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište síly působící na statorové jádro asynchronního stroje.
2. Vytvořte 3D model asynchronního stroje.
3. Proveďte analýzu vlastních frekvencí jednotlivých částí stroje.
4. Porovnejte vliv konstrukčních částí asynchronního stroje na jeho vlastní frekvence.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lukáš Bouzek

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

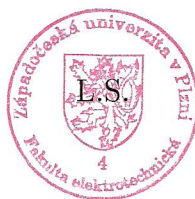
Datum zadání diplomové práce:


1. července 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

26. srpna 2013


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. července 2013

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o chvění asynchronního stroje. Zohledňuje vliv sil působících na statorové jádro. Dále popisuje vliv vlastních frekvencí na konstrukční části stroje a zobrazuje modální analýzu se zobrazením deformací a vlastních tvarů při vlastních frekvencích.

Klíčová slova

Asynchronní stroj, síla, chvění, analýza, vlastní frekvence, deformace

Astract

This thesis deals with the vibration induction machine. It takes into account the influence of the forces acting on the stator core. It also describes the effect of natural frequencies on the design of the machine and displays a modal analysis showing the deformation and custom shapes with natural frequencies.

Key words

Induction machine, force, vibration, analysis, natural frequency, deformation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 26.8.2013

Bc. Josef Veselý

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Lukášovi Bouzkovi za podnětné návrhy stran diplomové práce a za ochotu a trpělivost, se kterou tuto diplomovou práci vedl.

Obsah

Obsah	7
Úvod	9
1. Síly působící na statorové jádro asynchronního stroje	9
1.1 Asynchronní stroj	9
1.1.1 Princip funkce asynchronního stroje.....	9
1.2 Chvění	10
1.2.1 Zdroje chvění v elektrických strojích.....	10
1.2.1.1 Elektromagnetické zdroje vibrací.....	11
1.2.1.2 Mechanické zdroje vibrací	12
1.3 Přeměna energií.....	13
1.4 Radiální síly.....	13
1.4.1 Vznik radiálních magnetických sil.....	13
1.4.2 Amplituda magnetického tlaku.....	16
2. Model asynchronního stroje	17
2.1 Referenční typ motoru.....	17
2.2.1 2D model motoru	18
2.2.2 3D modely částí motoru	20
3. Analýza vlastních frekvencí	24
3.1 Deformace statorového jádra	24
3.1.1 Mód vibrací $r = 0$	24
3.1.2 Mód vibrací $r = 1$	24
3.1.3 Mód vibrací $r = 2, 3, 4$	25
3.2 Frekvence a řady magnetických tlaků	25
3.3 Zjednodušený výpočet vlastních frekvencí statorového systému	26
3.4 Přesnější výpočet vlastních frekvencí	28
3.4.1 Vlastní frekvence statorového jádra.....	28
3.4.2 Vlastní frekvence kostry s ložiskovými štíty	30
3.4.3 Vlastní frekvence statorového jádra a kostry	32
3.4.4 Vliv vinutí statoru a zuby	33
3.5 Jednotlivé části a soubory podrobené analýze	34
3.5.1 Statorové jádro	34

3.5.2 Statorové jádro s vodiči v drážkách	36
3.5.3 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí.....	37
3.5.4 Statorové jádro vložené v kostře	39
3.5.5 Statorové jádro s vodiči v drážkách vložené v kostře	40
3.5.6 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí vložené v kostře	41
3.5.7 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí vložené v kostře se štíty	42
4. Vliv konstrukčních částí asynchronního stroje na jeho vlastní frekvence.....	43
4.1 Porovnání	43
Závěr.....	47
Seznam použité literatury.....	48
Přílohová část.....	49

Úvod

Asynchronní stroje, jsou nejpoužívanější stroje v průmyslu. Jsou vyráběny v rozličných škálách velikostí, provedení, výkonů, atd. Problémy s vibracemi asynchronních motorů mohou být velmi nepříjemné a mohou vést k výraznému snížení jejich spolehlivosti. Během výrobního procesu je nezbytně nutné problémům předcházet nebo je minimalizovat. Pokud se problém vyskytne je nutné jeho zdroj urychleně identifikovat a příčinu odstranit. Při potřebných znalostech a správném diagnostickém postupu je obvykle možné příčinu vibrací určit. Bohužel často je dosaženo chybných závěrů z důvodu nepochopení příčin vibrací a to může vést k pokusu o opravu chybně diagnostikovaného problému, což stojí značné množství peněz a času při výrobním procesu. Při využití vhodné analýzy a sběru dat, může být objeven skutečný zdroj vibrací.

1. Síly působící na statorové jádro asynchronního stroje

1.1 Asynchronní stroj

Asynchronní stroj se skládá ze dvou hlavních částí: statorového a rotorového jádra. Obě mohou být s vícefázovým vinutím. Magnetické obvody rotoru a statoru jsou složeny z tenkých ocelových plechů. Vinutí jsou umístěna ve statorových a rotorových drážkách nebo mohou být vyrobena jako bezdrážková vinutí. Vícefázová statorová vinutí, ve většině případů třífázová, mají samostatná fázová vinutí, která jsou spojena do hvězdy (Y), nebo do trojúhelníku (D) a jsou připojena na napájení třífázovým proudem. Každá fáze vinutí se skládá z vícezávitových cívek zapojených do série. Cívky zapojené do série lze také seskupit ve dvou nebo více paralelních větvích. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem je velmi malá. Pro moderní indukční motory s malým a středním výkonem je obvykle menší než 1 mm.

Rotorová vinutí mohou být vyrobena jako tři jednofázová vinutí spojená do hvězdy (méně často do trojúhelníku) a vyvedena na svorky, které jsou propojeny na tři sběrací kroužky, nebo jako klecová vinutí složená z axiálních tyčích spojených na koncích rotorovými kruhy. V prvním případě je asynchronní stroj nazýván s vinutou kotvou, nebo kroužkový motor a v druhém případě je nazýván s kotvou nakrátko [4].

1.1.1 Princip funkce asynchronního stroje

Při napájení statorového vinutí proudem, je ve vzduchové mezeře vytvářeno magnetické

točivé pole. Statorové pole indukuje napětí do rotorového vinutí. Rotorovým vinutím poté začne protékat proud, který tvoří rotorové magnetické pole. Vzájemným působením obou polí vzniká elektromagnetický moment [3]. Statorové pole se otáčí synchronní rychlostí:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1)$$

kde f je frekvence proudu a p je počet pólů.

Asynchronní motor má tento název proto, protože rychlost, kterou se otáčí pole statoru, je různá než rychlost pole rotoru. Rozdíl mezi rychlostí otáčení rotorového a statorového pole se nazývá skluz:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2)$$

kde n_m je mechanická rychlost rotoru.

1.2 Chvění

Chvění je omezený vratný pohyb částice pružného objektu nebo média ve střídavě opačných směrech svého rovnovážného postavení, kdy byla tato rovnováha narušena. Aby došlo k vibraci, musí mít subjekt nebo systém dvě charakteristické vlastnosti: pružnost a hmotnost. Amplituda vibrací je maximální výchylka vibrující částice nebo subjektu z jeho klidové polohy.

1.2.1 Zdroje chvění v elektrických strojích

Frekvence vibrací je obecně v rozmezí 0 až 1000 Hz, a pro hluk nad 1000 Hz. Vibrace produkované elektrickými stroji lze rozdělit do dvou kategorií [2]:

a) Elektromagnetické vibrace spojené s parazitními jevy – mohou být způsobeny:

- vyššími prostorovými a časovými harmonickými
- excentricitou
- fázovou nesymetrií
- vlivem drážek
- magnetickým sycením
- magnetostrikční expanzí jádrových plechů

b) mechanické vibrace spojené s mechanickými částmi – mohou být způsobeny:

- vlivem ložisek (nejčastěji)
- mechanickými nepřesnostmi
- nevyvážeností rotoru

1.2.1.1 Elektromagnetické zdroje vibrací

Elektromagnetické vibrace jsou způsobeny generováním elektromagnetických polí. Stator i rotor budí magnetickou indukci ve vzduchové mezeře.

Pokud stator vytváří magnetickou indukci:

$$B_{m1} \cos(\omega_1 t + k\alpha + \phi_1) \quad (3)$$

a rotor produkuje magnetickou indukci:

$$B_{m2} \cos(\omega_2 t + l\alpha + \phi_2) \quad (4)$$

pak kombinací těchto rovnic vznikne:

$$0,5B_{m1}B_{m2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (k+l)\alpha + (\phi_1 + \phi_2)] + \quad (5)$$

$$+ 0,5B_{m1}B_{m2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (k-l)\alpha + (\phi_1 - \phi_2)]$$

kde B_{m1} a B_{m2} jsou amplitudy magnetické indukce statoru a rotoru, ω_1 a ω_2 jsou úhlové frekvence magnetického pole statoru a rotoru, ϕ_1 a ϕ_2 jsou fáze magnetické indukce statoru a rotoru, $k = 1, 2, 3, \dots$ a $l = 1, 2, 3, \dots$. Výsledek vyjádřený rovnicí (5) je přímo úměrný magnetické rázové vlně ve vzduchové mezeře s amplitudou:

$$P_{mr} \approx 0,5B_{m1}B_{m2} \quad (6)$$

úhlovou frekvencí:

$$\omega_r = \omega_1 \pm \omega_2 \quad (7)$$

řádem:

$$r = k \pm l \quad (8)$$

a fází:

$$\phi_r = \phi_1 \pm \phi_2 \quad (9)$$

Magnetické napětí, působící v radiálních směrech na aktivním povrchu statoru a rotoru, je příčinou deformace, a tím i vibrací.

K vibracím a mechanické deformaci může vést nesprávné rozložení vinutí v drážkách, zkreslení průběhu vstupního proudu, kolísání prostupu vzduchovou mezerou, excentricita rotoru, a fázové nesymetrie. Magnetomotorická síla prostorových harmonických, časových harmonických, drážkových harmonických, harmonických excentricity a harmonických sycení, produkují vyšší harmonické síly a momenty, které mají vliv na vznik vibrací a deformace.

Ve střídavých strojích mají na deformaci magnetického obvodu největší vliv radiální síly, které působí na stator i rotor.

Vibrace jsou přenášeny především z konstrukce kostry statoru. Je-li frekvence radiální síly blízká nebo rovná některé z přirozených frekvencí kostry, nastane její rezonance. Rezonance vede rovněž k deformaci statoru a vibracím.

V motorech napájených měniči, jsou vytvářeny parazitní oscilační momenty. Ty jsou vytvářeny z důvodu vyšších časových harmonických obsažených v proudu vinutí statoru. Tyto parazitní momenty jsou obecně vyšší než oscilační momenty vytvářené prostorovými harmonickými. Navíc zvlněné napětí usměrňovače je přenášeno přes meziobvod do měniče a vytváří další druh oscilačního momentu.

1.2.1.2 Mechanické zdroje vibrací

Mechanické vibrace jsou způsobeny především ložisky a jejich vadami. Dále pak kluznými kontakty, deformací hřídele, nevyvážeností rotoru, nesouosostí hřídele, spojkou, ozubenými koly, atd.. Pro snížení vibrací by měl být rotor přesně vyvážený. Nevyváženost rotoru způsobuje rotorové vibrace a excentricitu, které vedou ke zvýšení chvění statoru, rotoru a nosné konstrukce

rotoru.

V elektrických strojích se používají valivá i kluzná ložiska. Chvění vlivem valivých ložisek závisí na přesnosti ložiskových částí, dále pak na mechanické rezonanční frekvenci vnějšího kroužku, rychlosti otáčení, vhodném mazání, toleranci, zarovnání, zatížení, teplotě a přítomnosti cizích materiálů. Vibrace způsobené kluznými ložisky jsou obecně nižší než u valivých ložisek. Vibrace produkované kluznými ložisky závisí na drsnosti povrchu kluzných ploch, mazání, stabilitě a víření olejového filmu v ložisku, procesu výroby, kvalitě a instalaci.

1.3 Přeměna energií

Vstupní proud interaguje s magnetickým polem a jsou produkovány vysokofrekvenční síly, které působí na vnitřním povrchu statorového jádra. Tyto síly vybudí statorové jádro a kostru v příslušném frekvenčním rozsahu a vytváří mechanické vibrace. V důsledku vibrací je povrch statorového jádra a rámu vytlačován s frekvencí odpovídající frekvenci síly.

Stator a statorový rám je mechanický systém. Je charakterizován hmotností M , tlumením C a tuhostí K . Elektromagnetická síla vybudí mechanický systém pro generování vibrací. Amplituda vibrací je funkce velikosti a frekvence těchto sil. Mechanický systém může být jednoduše popsán jako model se soustředěnými parametry s N stupni volnosti v maticovém tvaru:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t)\} \quad (10)$$

kde q je vektor $(N, 1)$ vyjadřující posunutí o N stupňů volnosti, $\{F(t)\}$ je vektor síly vztahující se ke stupňům volnosti, $[M]$ je matice hmotnosti, $[C]$ je matice tlumení a $[K]$ je matice tuhosti. Rovnice může být řešena pomocí strukturální metody konečných prvků (FEM). V praxi jsou ale problémy s predikcí matice $[C]$ pro laminované materiály, dále s fyzikálními vlastnostmi materiálů, a chybami ve výpočtu magnetických sil [2].

1.4 Radiální síly

1.4.1 Vznik radiálních magnetických sil

Prostorové a časové rozdělení magnetomotorických sil vícefázového elektrického stroje napájeného sinusovým a vyváženým proudovým systémem můžeme vyjádřit následujícími rovnicemi [2].

Pro stator:

$$F_1(\alpha, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} F_{m\nu} \cos(\nu p \alpha \mp \omega t) \quad (11)$$

Pro rotor:

$$F_2(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{m\mu} \cos(\mu p \alpha \mp \omega_{\mu} t + \phi_{\mu}) \quad (12)$$

Kde α je úhlová vzdálenost od počátku souřadného systému, p je počet pól párů, ϕ_{μ} je úhel mezi vektory statoru a rotoru harmonických stejného pořadí, ν a μ jsou počty prostorových harmonických statoru a rotoru v příslušném pořadí, $\omega = 2\pi f$ je pulsace vstupního proudu a $F_{m\nu}$ a $F_{m\mu}$ jsou maximální hodnoty ν -tých a μ -tých harmonických. $p\alpha = \pi x / \tau$, kde τ je pólová rozteč a x je lineární vzdálenost od dané osy.

Okamžitá hodnota normálové složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře v bodě určeném úhlem α lze vypočítat pomocí rovnice:

$$\mathbf{b}(\alpha, t) = [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)] \Lambda_g(\alpha, t) = \mathbf{b}_1(\alpha, t) + \mathbf{b}_2(\alpha, t) \quad (13)$$

kde $\Lambda_g(\alpha, t)$ je relativní průstup vzduchovou mezerou závislý na úhlu α .

Pro stator platí:

$$\mathbf{b}_1(\alpha, t) = F_1(\alpha, t) \Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{m\nu} \cos(\nu p \alpha \mp \omega t) \quad (14)$$

pro rotor:

$$\mathbf{b}_2(\alpha, t) = F_2(\alpha, t) \Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{m\mu} \cos(\mu p \alpha \mp \omega_{\mu} t + \phi_{\mu}) \quad (15)$$

Podle Maxwellova napětřového tenzoru, radiální magnetická síla na jednotku plochy nebo magnetický tlak v každém bodě vzduchové mezery je:

$$\mathbf{p}_r(\alpha, t) = \frac{1}{2\mu_0} [\mathbf{b}^2(\alpha, t) - b_t^2(\alpha, t)] \quad (16)$$

Vzhledem k tomu, že magnetická permeabilita feromagnetického jádra je mnohem vyšší, než permeabilita vzduchové mezery, jsou čáry magnetického toku prakticky kolmé na statorové a rotorové jádro. To znamená, že tečná složka $b_t(\alpha, t)$ hustoty magnetického toku je mnohem menší, než normálová složka $b_n(\alpha, t)$ a platí:

$$\begin{aligned} p_r(\alpha, t) &\approx \frac{b^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \\ \frac{b^2(\alpha, t)}{2\mu_0} &= \frac{1}{2\mu_0} [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)]^2 \Lambda_g^2(\alpha, t) = \\ &= \frac{1}{2\mu_0} [F_1^2(\alpha, t) \Lambda_g^2(\alpha, t) + 2F_1(\alpha, t)F_2(\alpha, t)\Lambda_g(\alpha, t) + F_2^2(\alpha, t)\Lambda_g^2(\alpha, t)] = \\ &= \frac{[b_1(\alpha, t)]^2 + 2b_1(\alpha, t)b_2(\alpha, t) + [b_2(\alpha, t)]^2}{2\mu_0} \end{aligned} \quad (17)$$

K dispozici jsou tři skupiny radiálních sil:

a) Dosazením za člen rovnice $[b_1(\alpha, t)]^2$ statorových harmonických řádu v získáme:

$$p_{rv}(\alpha, t) = \frac{[B_{mv} \cos(vp\alpha \mp \omega t)]^2}{2\mu_0} = \frac{B_{mv}^2}{4\mu_0} [1 + \cos(2vp\alpha \mp 2\omega t)] \quad (18)$$

b) Dosazením za člen rovnice $2b_1(\alpha, t)b_2(\alpha, t)$ harmonických statoru v a rotoru μ

$$\begin{aligned} p_{r\mu}(\alpha, t) &= \frac{2B_{mv} \cos(vp\alpha \mp \omega t) B_{m\mu} \cos(\mu p\alpha \mp \omega_\mu t + \phi_\mu)}{2\mu_0} = \\ &= \frac{1}{2\mu_0} B_{mv} B_{m\mu} \{ \cos[(vp\alpha \mp \omega t) - (\mu p\alpha \mp \omega_\mu t + \phi_\mu)] + \\ &\quad + \cos[(vp\alpha \mp \omega t) + (\mu p\alpha \mp \omega_\mu t + \phi_\mu)] \} \\ &= \frac{1}{2\mu_0} B_{mv} B_{m\mu} \{ \cos[p\alpha(v - \mu) \mp (\omega - \omega_\mu)t - \phi_\mu] + \\ &\quad + \cos[p\alpha(v + \mu) \mp (\omega + \omega_\mu)t + \phi_\mu] \} \end{aligned} \quad (19)$$

c) Dosazením za člen rovnice $[b_1(\alpha, t)]^2$ rotorových harmonických řádu μ získáme:

$$p_{r\mu}(\alpha, t) = \frac{[B_{m\mu} \cos(\mu p\alpha \mp \omega_\mu t + \phi_\mu)]^2}{2\mu_0} = \frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0} [1 + \cos(2\mu p\alpha \mp 2\omega_\mu t + 2\phi_\mu)] \quad (20)$$

$$\text{Konstanty} \quad \frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0} \quad \frac{B_{mv}^2}{4\mu_0}$$

v rovnicích (18) a (20) nemají význam pro vibrace a lze je zanedbat, protože statický magnetický tlak je rovnoměrně rozmístěn podél vzduchové mezery.

V souladu s rovnicemi magnetické síly na jednotku plochy (18), (19) a (20) může být vyjádřena následující obecná rovnice:

$$p_r(\alpha, t) = P_{mr} \cos(r\alpha - \omega_r t) \quad (21)$$

P_{mr} je amplituda magnetického tlaku, ω_r je úhlová frekvence a řád $r = 0, 1, 2, 3, \dots$ je pořadí odpovídající radiálním magnetickým silám. Radiální síly obíhají kolem statoru s úhlovou rychlostí ω_r / r a frekvence $f_r = \omega_r / (2\pi)$. Při malém počtu pólpárů statoru mohou radiální síly způsobit jeho vibrace.

1.4.2 Amplituda magnetického tlaku

Amplituda P_{mr} radiálního magnetického tlaku r -tého řádu závisí na harmonických magnetické indukce, která působí při jeho vzniku.

- vybuzení statorových harmonických stejného řádu v

$$P_{mr} = \frac{B_{mv}^2}{4\mu_0} \quad \text{N/m}^2 \quad (22)$$

- vybuzení statorových v a rotorových harmonických μ

$$P_{mr} = \frac{B_{mv} B_{m\mu}}{2\mu_0} \quad \text{N/m}^2 \quad (23)$$

- vybuzení rotorových harmonických stejného řádu μ

$$P_{mr} = \frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0} \quad \text{N/m}^2 \quad (24)$$

Chceme-li získat amplitudu radiální síly, musíme vynásobit amplitudu magnetického tlaku P_{mr} π , D_{lin} a L_i , kde D_{lin} je vnitřní rozměr statoru a L_i je efektivní délka statorového jádra.

2. Model asynchronního stroje

Pro tuto diplomovou práci byl vytvořen 3D model asynchronního stroje, aby mohla být provedena analýza vlastních frekvencí jednotlivých částí stroje. Pro vytvoření modelu stroje byly použity programy AutoCad a SolidWorks. Program SolidWorks posléze posloužil pro analýzu vlastních frekvencí stroje. Model byl samozřejmě patřičně zjednodušen, aby bylo možné analýzy provést.

2.1 Referenční typ motoru

Jako podklad pro tvorbu modelu byl použit motor SIEMENS 1LA7 163-4AA10

Štítkové hodnoty:

$$P_n=11\text{kW}$$

$$U_n=400/230\text{V}$$

$$I_n=21.5\text{A}$$

$$M_n=72\text{Nm}$$

$$n_n=1460\text{rpm}$$

$$\cos \varphi=0.84$$

$$\eta=88.5\%$$

Kódování typového čísla:

1. - 4. místo: 1LA7 - 3-fázový asynchronní motor s kotvou nakrátko
5. - 6. místo: 16 - osová výška 160mm,
7. místo: 3 - délka kostry (svazku) = střední "M"
8. místo: 4 - počet pólů = 4
9. místo: A - základní provedení, motor s hliníkovou kotrrou
10. místo: A - třída rotoru = 16
11. místo: 1 - D/Y230/400V, 50Hz
12. místo: 0 - tvar = IM B

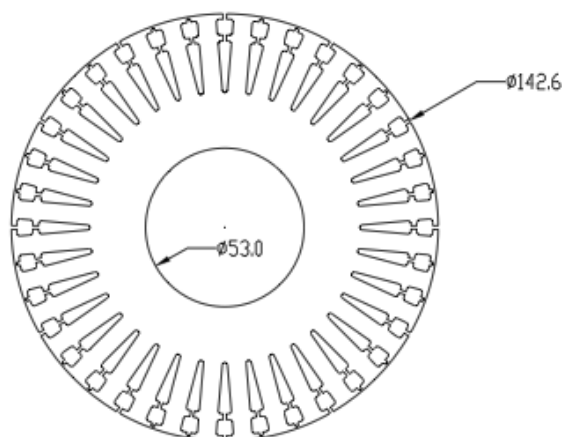
2.2 Vytvoření modelu

Při tvorbě modelu posloužil program AutoCAD jako pre-processor. V programu byly vytvořeny 2D modely částí stroje, které byly posléze převedeny programem SolidWorks na 3D. Jako podklady pro vytvoření modelu posloužily rozměrové výkresy stroje ve formátu pdf, které

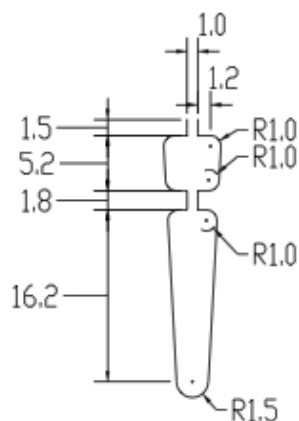
jsou publikovány přímo výrobcem. Dále byl použit výkres rotorového a statorového plechu ve formátu dwg, který poskytl vedoucí diplomové práce. Výkres rotorového a statorového plechu poskytnutý ve formátu dwg byl překreslen a upraven, protože pro možnost vytvoření modelu nemohl být použit z důvodu nepřesného zakreslení. Z nově vytvořeného výkresu pro rotorový a statorový plech byly použity křivky drážek, pro vytvoření 2D výkresu vinutí. Program AutoCad byl použit hlavně z důvodu jeho snadného ovládání. Ostatní části stroje, jako je kostra, hřídel, víko svorkovnice a ložiskový štít, byly vytvořeny přímo v programu SolidWorks.

2.2.1 2D model motoru

Z podkladů pro vytvoření modelu, byl nejprve vytvořen rotorový plech. Jak je patrné z *obr. 1.*, rotorové vinutí tohoto stroje je tvořeno dvojitou klecí, tzv. Boucherotovo vinutí. Boucherotovo vinutí má velký vliv na rozběh asynchronního stroje. Z rozměrů drážky bylo vytvořeno rotorové vinutí.

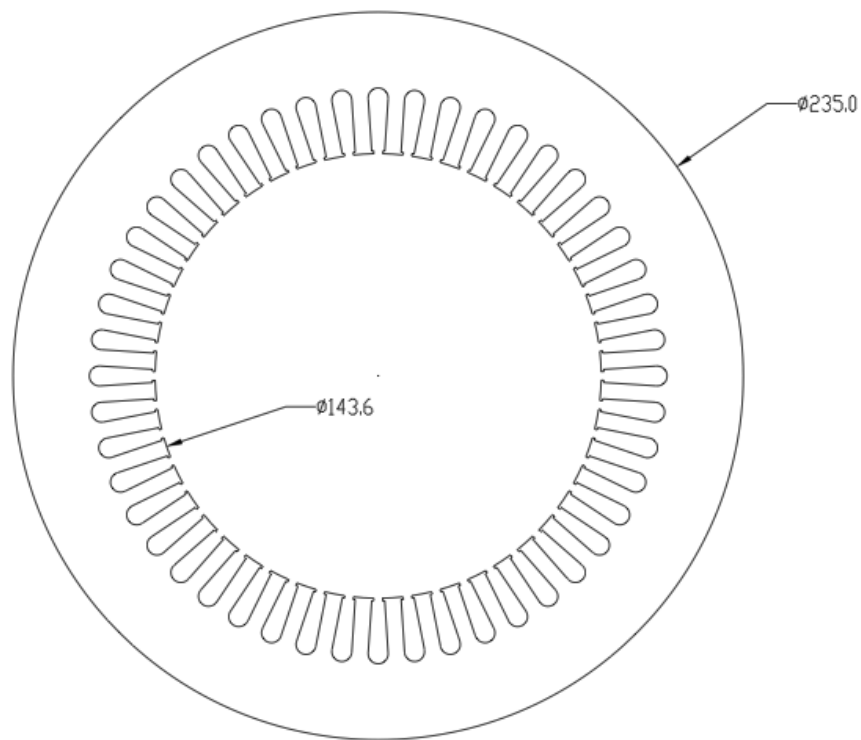


Obr. 1. - 2D model rotoru asynchronního stroje

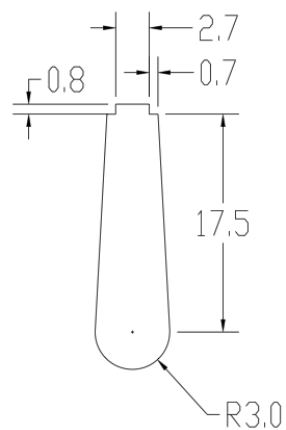


Obr. 2. - Rozměrový náčrt rotorové drážky

Dále byl podle podkladů vytvořen 2D model statorového plechu a z rozměrů drážky statorové vinutí.



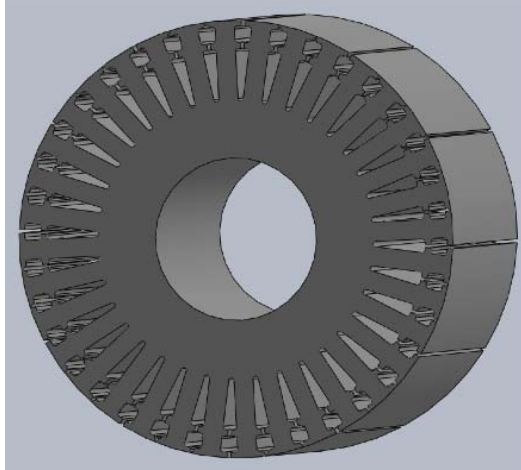
Obr. 3. - 2D model statoru asynchronního stroje



Obr. 4. - Rozměrový náčrt statorové drážky

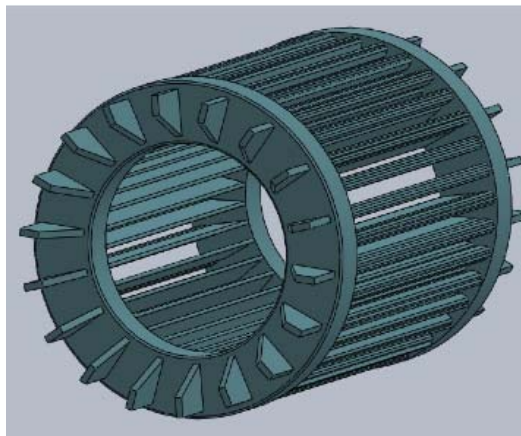
2.2.2 3D modely částí motoru

Části stroje, které byly vlivem své složitosti vytvořeny jako 2D modely v programu AutoCAD, byly posléze převedeny programem SolidWorks na 3D modely.

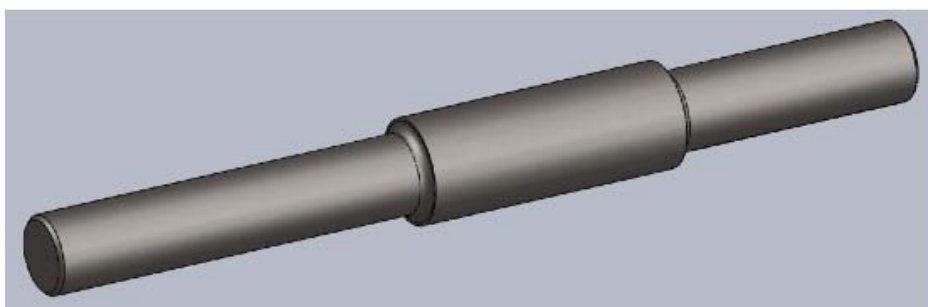


Obr. 5. - 3D model paketu rotoru

Jednotlivé díly asynchronního stroje byly při modelování patřičně zjednodušeny, aby výsledné sestavy nebyly nepřiměřeně obsáhlé.

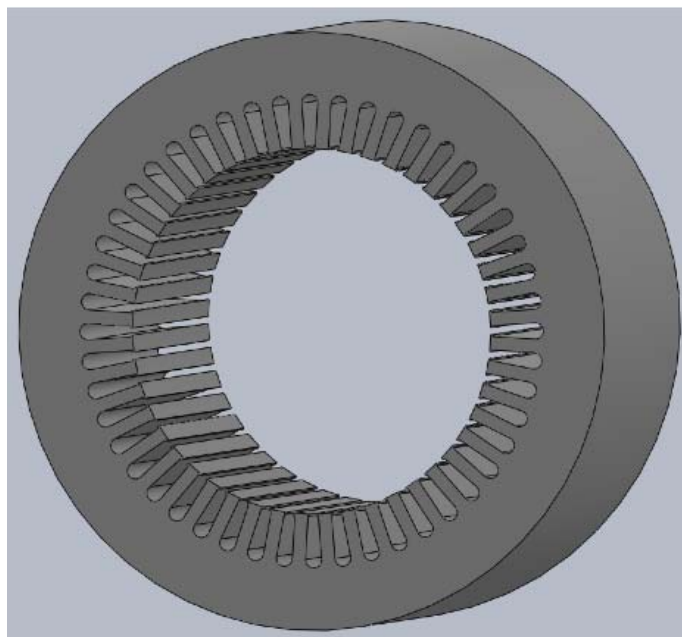


Obr. 6. - 3D model klecového vinutí rotoru



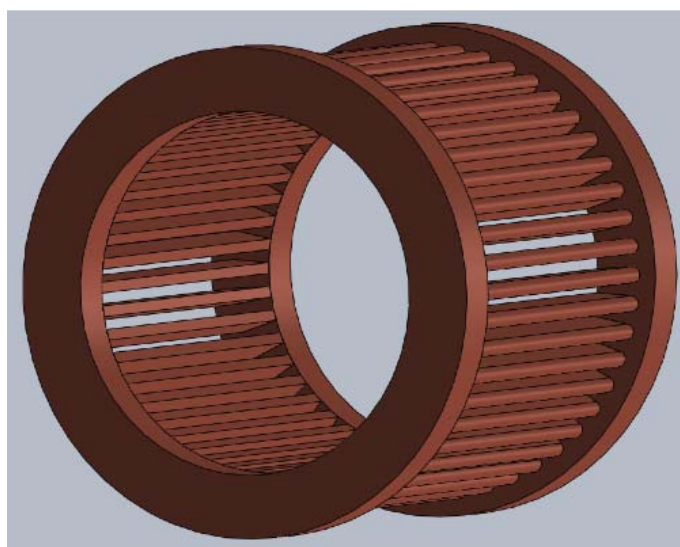
Obr. 7. - 3D model hřídele

Části rotoru nebyly pro analýzu použity a jejich vyobrazení je pouze ilustrativní pro celkový pohled na model v rozloženém stavu.



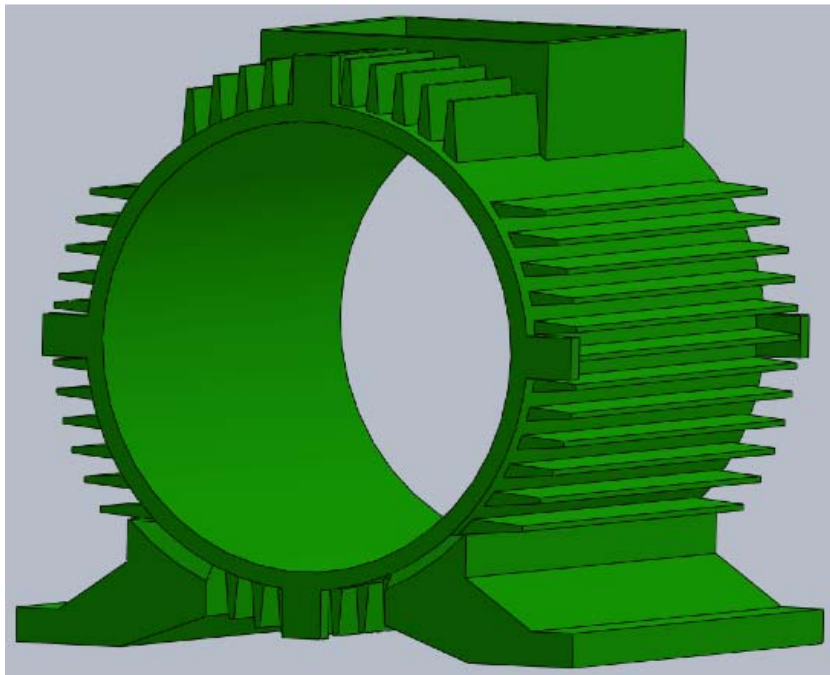
Obr. 8. - 3D model paketu statoru

Statorový paket byl pro možnost provedení analýzy složen pouze z jednoho plechu. Při reálném sestavení paketu by byl model tvořen velkým počtem plechů a sestava by byla velmi obsáhlá. Tím pádem by i prováděná analýza byla časově velice náročná. Vytvoření paketu statoru z jednoho dílu má na analýzu minimální dopad protože izolace mezi plechy je velice tenká a plechy jsou lisovány natěsno. Tím pádem je možné brát paket jako jednu část.



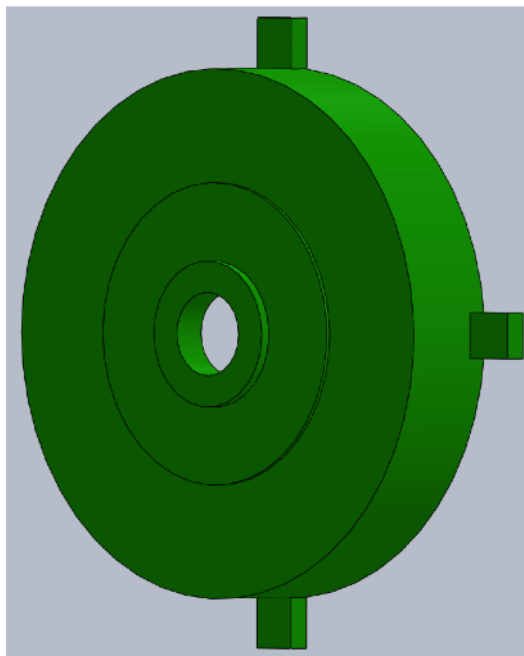
Obr. 9. - 3D model vinutí statoru

Zjednodušeno bylo i statorové vinutí. V reálném stroji je vinutí tvořeno jednotlivými vodiči ve formě drátků kruhového průřezu, které jsou vsypávány do předem připravené drážky (drážka je vyložena izolací). Čela vinutí jsou při výrobním procesu bandážována a potom je stator i s vinutím ponořen do lázně s elektroizolačním lakem. Po vyjmutí z lázně je lak vysoušen a tím i vytvrzován. Předpokládá se, že lakem je vyplněn veškerý prostor mezi vodiči. Z tohoto důvodu bylo možné provést zjednodušení vytvořením plných prstenců, které nahrazují čela vinutí a tyčí mající tvar drážek statoru, které nahrazují jednotlivé vodiče v drážkách.

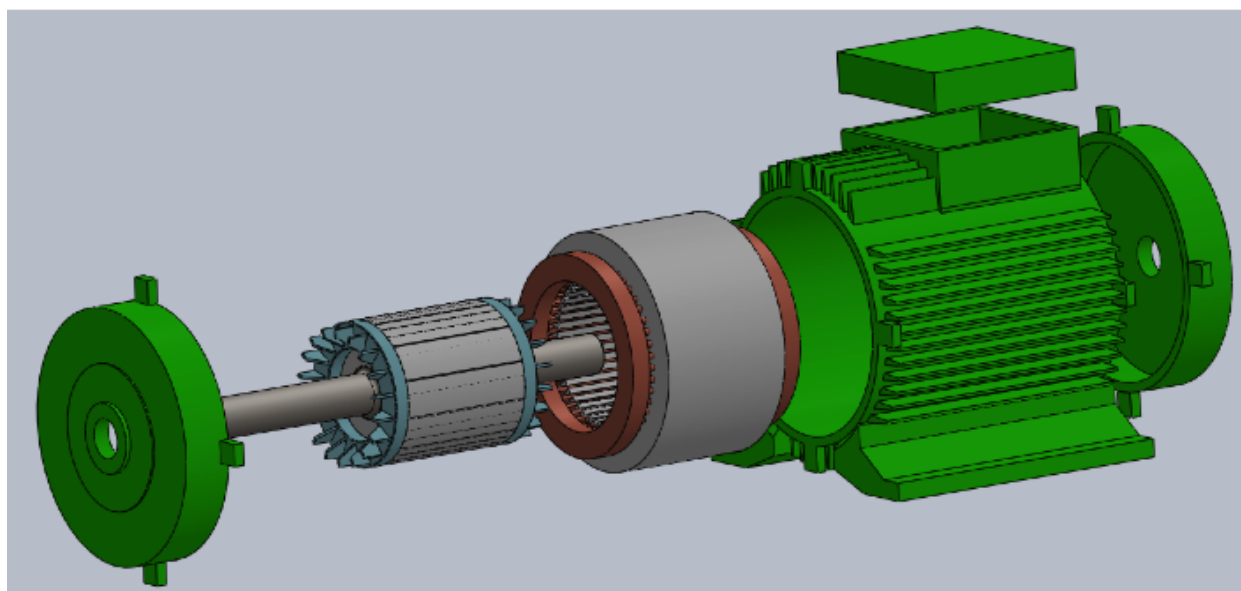


Obr. 10. - 3D model kostry stroje

Kostra stroje byla vytvořena přímo v programu SolidWorks. U tohoto modelu nebylo dle skutečné kostry vytvořeno vybrání pro osazení ložiskových štítů. Dále nebyly vytvořeny montážní plochy pro možné osazení patek na boky stroje. Toto zjednodušení bylo provedeno převážně z důvodu zmenšení rozsahu sestavy pro umožnění plynulejšího průběhu analýzy.



Obr. 11. - 3D model ložiskového štítu



Obr. 12. - 3D model rozložené sestavy asynchronního stroje

3. Analýza vlastních frekvencí

3.1 Deformace statorového jádra

Vzhledem k tomu, že obvodové vibrace působí na jádro statoru, průhyb jádra statoru Δd je inverzní funkcí čtvrté mocniny r -tého řádu síly [1],[2].

$$\Delta d \propto \frac{1}{r^4} \quad (25)$$

Vzhledem k tomu, že součin statorových harmonických stejného počtu v je podle rovnice (18), je nejnižší frekvence magnetické síly $f_r = 2f$ rovna dvojnásobku kmitočtu sítě a řádu $r = 2p$. Protože řád síly $r = 2$ je pro dvoupólový motor a $r = 4$ pro čtyřpólový motor, bude magnetická síla u čtyřpólového motoru 1/16 dvoupólového motoru.

K největší deformaci j_{ha} statoru dochází při frekvenci f_r , která je v blízkosti přirozených frekvencí statorového systému. Z hlediska vibrací, jsou nejzajímavější módy $r = 0, 1, 2, 3$ a 4.

3.1.1 Mód vibrací $r = 0$

Pro pulsační vibrační mód tzv. „dýchání“ je $r = 0$. Hustota radiální magnetické síly je rozložena po celém obvodu statoru a mění se periodicky s časem. To způsobuje radiální vibrace jádra statoru. Toto může být srovnáno s válcovou nádobou s proměnným vnitřním přetlakem.

$$p_0 = P_{mr=0} \cos \omega_0 t \quad (26)$$

Rovnice popisuje interference dvou vln magnetické indukce o stejných délkách (stejných počtech pólů) a různé rychlosti (frekvenci).

"Dýchání" mód $r = 0$ může způsobit nízké vlnové číslo vibrace, a to i s vysokým počtem pólů a sinusovým proudem statoru. Tato situace může nastat, pokud jsou v blízkosti nízkých vlnových čísel, daných vysokou admitancí strukturální nespojitosti.

3.1.2 Mód vibrací $r = 1$

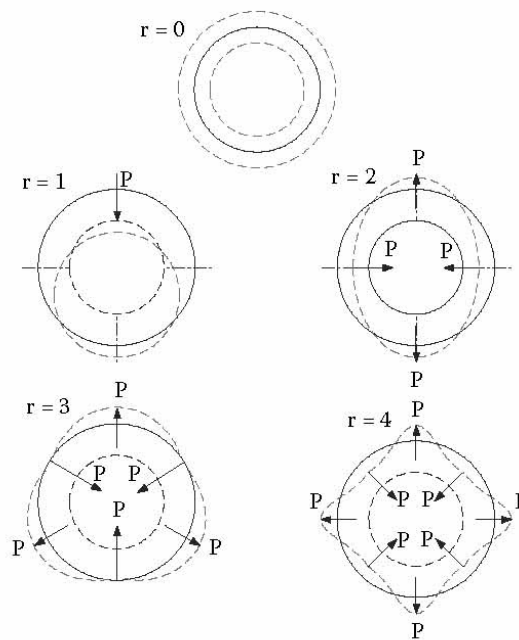
Pro mód „ohybu nosníku“ $r = 1$ radiální tlak vytváří jednostranný magnetický tah na rotor.

Úhlová rychlost rotace tahu je ω_1 . Fyzicky tato rovnice popisuje interferenci dvou vln magnetické indukce, pro které je počet pólových párů rozdílný o jedničku.

$$\mathbf{p}_1 = P_{mr=1} \cos(\alpha - \omega_1 t) \quad (27)$$

3.1.3 Mód vibrací $r = 2, 3, 4$

Pro „oválový vibrační mód“ je $r = 2$ a při $r = 3, 4, \dots$ dojde k deformaci statorového jádra ve vlnovém tvaru.



Obr. 13. - Rozměrové deformace vlivem radiálních sil.

3.2 Frekvence a řády magnetických tlaků

Úhlové frekvence a řády radiálního magnetického tlaku vychází z rovnic 18, 19 a 20:

- vybuzení statorových harmonických stejného řádu v

$$\omega_r = 2\omega \quad f_r = 2f \quad r = 2vp \quad (28)$$

- vybuzení statorových v a rotorových harmonických μ

$$\omega_r = \omega \pm \omega_\mu \quad f_r = f \pm f_\mu \quad r = (v \pm \mu)p \quad (29)$$

- vybuzení rotorových harmonických stejného řádu μ

$$\omega_r = 2\omega_\mu \quad f_r = 2f_\mu \quad r = 2\mu p \quad (30)$$

Pro základní prostorové harmonické $v = 1$ je frekvence radiálního magnetického tlaku a řád (obvodový vibrační mód) podle vzorce 28. Rotační součásti se dvěma pólpáry a frekvencí $2f$,

mohou způsobit značné vibrace. Zejména u velkých strojů s $B_{mv} = 1 = 0,8T$ je velikost radiálního magnetického tlaku roven $127,4 \text{ kN/m}^2$. I pro vyšší prostorové harmonické $v > 1$ platí stále vzorec (28).

3.3 Zjednodušený výpočet vlastních frekvencí statorového systému

Výpočet vlastních frekvencí statorového systému je velice důležitý při analýzách elektrických strojů. V klasickém postupu je brán statorový systém, který se skládá ze statorového jádra, vinutí a kostry, jako jeden silný prstenec s vloženými zuby a vinutím. Obvodové vibrační módy mohou být zobrazeny, jak je uvedeno na obrázku 13. Vlastní frekvence m -tého obvodového vibračního módu mohou být vyjádřeny jako [2]:

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} \quad (31)$$

Kde K_m je soustředěná tuhost a M_m je soustředěná hmotnost statorového systému. Pro statorové jádro s tloušťkou h_c , hmotností M_c a středním průměrem D_c , mohou být určeny pro obvodový vibrační mód $m=0$ hodnoty soustředěné tuhosti a soustředěné hmotnosti jako:

$$K_0 = 4\pi \frac{E_c h_c L_i}{D_c} \quad M_0 = M_c k_{md} = \pi D_c h_c L_i \rho_c k_i k_{md} \quad (32)$$

Kde ρ_c je hustota statorového jádra, k_i je faktor překlady a k_{md} je faktor hmotnostního přídatku pro posunutí, který je definován jako:

$$k_{md} = 1 + \frac{M_t + M_w + M_i}{M_c} \quad (33)$$

V uvedené rovnici je M_t hmotnost všech statorových zubů, M_w je hmotnost vinutí statoru, M_i je hmotnost izolace a M_c je hmotnost statorového jádra.

Dosazením soustředěné tuhosti a soustředěné hmotnosti do obecného vzorce pro vlastní frekvence, můžeme psát vzorec pro vlastní frekvence obvodového vibračního módu $m=0$ jako:

$$f_0 = \frac{1}{\pi D_c} \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c k_i k_{md}}} \quad (34)$$

Pro laminované obvody jsou typické tyto hodnoty:

Modul pružnosti $E_c = 200 \times 10^9$ Pa, hustota $\rho_c = 7700 \text{ kg/m}^3$ a faktor překlady $k_i = 0,96$. Těmito hodnotami je potom dána fázová rychlost $c_c = 6090$ m/s.

Pro obvodový vibrační mód $m=1$ se určí soustředěná tuhost a soustředěná hmotnost jako:

$$K_1 = 4\pi \frac{E_c h_c L_i}{D_c} \quad M_1 = 4\pi \frac{M_c k_{md}}{F_1^2} = \frac{M_0}{F_1^2} \quad (35)$$

kde:

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{1 + \kappa^2 k_{mrot}/k_{md}}} \quad \kappa = \frac{h_c}{\sqrt{3} D_c} \quad (36)$$

kde k_{mrot} je hmotnostní přídavek pro rotaci, který se určí:

$$\begin{aligned} k_{mrot} &= 1 + \frac{s_1 c_t L_i h_t^2}{\pi D_c I_c} \left(1 + \frac{M_w + M_i}{M_t} \right) \left[\frac{1}{3} + \frac{h_c}{2h_t} + \left(\frac{h_c}{2h_t} \right)^2 \right] \\ &= 1 + \frac{s_1 c_t L_i h_t^2}{\pi D_c I_c} \left(1 + \frac{M_w + M_i}{M_t} \right) (4h_t^2 + 6h_c h_t + 3h_c^2) \end{aligned} \quad (37)$$

kde

$$I_c = \frac{h_c^3 L_i}{12} \quad (38)$$

je plocha momentu setrvačnosti okolo neutrální osy, která je paralelní s osou statoru.

Potom pro vlastní frekvenci pro obvodový vibrační mód $m=1$ můžeme psát:

$$f_1 = \frac{1}{\pi D_c} \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c k_i k_{md}}} \sqrt{\frac{2}{1 + \kappa^2 k_{mrot}/k_{md}}} = f_0 F_1 \quad (39)$$

Obecně pro obvodové vibrační módy $m \geq 2$ platí:

$$\begin{aligned}
 K_m &= 16\pi \frac{E_c I_c}{D_c^3} (m^2 - 1)^2 k_a^2 \\
 M_m &= M_c \frac{k_{md}}{F_m^2} \frac{m^2 + 1}{m^2} = \pi D_c h_c L_i \rho_c k_i \frac{k_{md}}{F_m^2} \frac{m^2 + 1}{m^2} \\
 F_m &= \left\{ 1 + \frac{\kappa^2 (m^2 - 1) [m^2 (4 + k_{mrot}/k_{md}) + 3]}{m^2 + 1} \right\}^{-1/2}
 \end{aligned} \tag{40}$$

kde součinitel $k_a > 1$ je pro ložiskové štíty a podstavce (patkové nebo přírubové upevnění).

Vlastní frekvence statorového systému pro obvodové vibrační módy $m \geq 2$ lze odvodit jako:

$$f_m = \frac{2}{\pi} \frac{1}{D_c^2} \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c k_i k_{md}}} \sqrt{\frac{I_c}{h_c L_i}} \frac{m(m^2 - 1)}{\sqrt{m^2 + 1}} k_a F_m = f_0 \kappa \frac{m(m^2 - 1)}{\sqrt{m^2 + 1}} k_a F_m \tag{41}$$

Mnoho vědeckých článků doporučuje předchozí vzorce pro výpočty vlastních frekvencí. Tyto vzorce bohužel nezaručují dobrou přesnost výpočtu, protože statorový systém je komplexní struktura, která se skládá z různých vrstev. Tyto rovnice mohou být použity při výpočtu vlastní frekvence samostatného statorového jádra bez kostry a ložiskových štítů a pouze s částečným vlivem zubů a vinutí.

3.4 Přesnější výpočet vlastních frekvencí

V této části je uveden přesnější výpočet vlastních frekvencí, který bere v úvahu účinky vinutí, zubů a zejména kostry na vlastní frekvence statorového systému. Statorové jádro, vinutí, zuby a kostra jsou modelovány odděleně a výsledný vzorec je potom navržen na celý systém [2].

3.4.1 Vlastní frekvence statorového jádra

V případě, že poměr délky statoru k_u ku jeho střednímu průměru $L_i/D_c \leq 1$, je možné považovat statorové jádro za prsteneček a lze použít následující vzorec pro $m \geq 2$:

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \frac{m(m^2 - 1)}{\sqrt{m^2 + 1}} \sqrt{\frac{E_c I_c}{\rho_l (0.5 D_c)^4}} = \frac{2}{\pi} \frac{m(m^2 - 1)}{D_c^2 \sqrt{m^2 + 1}} \sqrt{\frac{E_c I_c}{\rho_c L_i h_c}} \tag{42}$$

Kde plocha momentu setrvačnosti okolo neutrální osy, která je paralelní s osou statoru I_c , byla určena v předchozí kapitole, h_c je tloušťka jha statoru a hmotnost na jednotku obvodu je:

$$\rho_l = \frac{M_c}{\pi D_c} = \rho_c(\pi D_c)L_i h_c \frac{1}{\pi D_c} = \rho_c L_i h_c \quad (43)$$

Soustředěná tuhost a hmotnost válce s konečnou délkou jsou:

$$K_m = \frac{16\pi E_c I_c m^2(m^2 - 1)^2}{D_c^3 m^2 + 1} \quad (44)$$

$$M_m = M_c = \pi \rho_c D_c L_i h_c \quad (45)$$

Výpočet ale není přesný při poměru $L_i/D_c \geq 1$. Lepší výsledky budou dosaženy, když bude stator brán jako válcový plášť s nekonečnou délkou. Ve velkém množství literatury na téma mechaniky, je přirozená frekvence nekonečně dlouhého válcového pláště vyjádřena pro obvodový vibrační mód $m \geq 0$ jako:

$$f_m = \frac{\Omega_m}{\pi D_c} \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c(1 - \nu_c^2)}} \quad (46)$$

Kde ν_c je Poissonovo číslo pro statorové jádro. Na základě Donnel-Mushtariho teorie, byl zaveden parametr Ω_m . Kořeny charakteristické rovnice pro pohyb jsou:

- pro obvodový mód $m=0$

$$\Omega_0 = 1 \quad (47)$$

- pro obvodový mód $m \geq 1$

$$\Omega_m = \frac{1}{2} \sqrt{(1 + m^2 + \kappa^2 m^4) \pm \sqrt{(1 + m^2 + \kappa^2 m^4)^2 - 4\kappa^2 m^6}} \quad (48)$$

kde bezrozměrný parametr tloušťky je:

$$\kappa^2 = \frac{h_c^2}{3D_c^2} \quad (49)$$

K vyjádření rovnice (46) ve formě rovnice (31) může být koncentrovaná tuhost zapsána jako:

$$K_m = \frac{4\Omega_m^2 \pi L_i h_c E_c}{D_c (1 - \nu_c^2)} \quad (50)$$

Protože ze vzorce (45) plyne že $M_m = M_c$, je doporučeno použít rovnici (46) i když platí, že $L_i/D_c < 1$.

Statorové jádro se zuby dvoupólového stroje je silnější v radiálním směru než u vícepólového stroje. Z toho plyne že tuhost podle rovnice (50) u dvoupólového stroje je vyšší a průhyb jádra statoru je menší než u strojů s větším počtem pólů. Vícepólové stroje proto mohou být často náchylnější pro vznik vibrací.

3.4.2 Vlastní frekvence kostry s ložiskovými štíty

Kostra s ložiskovými štíty se chová jako válcový plášť mechanicky omezený na obou koncích. Matematicky je toto možné popsat tak, že je plášť na obou koncích podepřen nebo sevřen. Typické axiální modální modely pro válcové skořepiny s podepřením na obou koncích, jsou znázorněny na obrázku 14. Axiální vibrační módy jsou $n = 1, 2, 3, \dots$ [2]

Pro uzavřené válcové skořepiny s konečnou délkou L_f s podmínkou podpory na obou koncích je charakteristická následná pohybová rovnice:

$$\Omega_{mn}^6 - (C_2 + \kappa \Delta C_2) \Omega_{mn}^4 + (C_1 + \kappa \Delta C_1) \Omega_{mn}^2 - (C_0 + \kappa \Delta C_0) = 0 \quad (51)$$

Jedná se vlastně o rovnici třetího řádu s respektováním bezrozměrného parametru frekvence Ω_m . Tři kořeny odpovídají vibracím ve třech kolmých směrech, ve kterých je nejmenší reálný kořen spojen s vlastní frekvencí ohybového kmitání kostry. Na základě Donnel-Mushtariho teorie jsou konstanty z rovnice (51) vyjádřeny jako:

$$C_2 = 1 + \frac{1}{2}(3 - \nu_f)(m^2 + \lambda^2) + \kappa^2(m^2 + \lambda^2)^2 \quad (52)$$

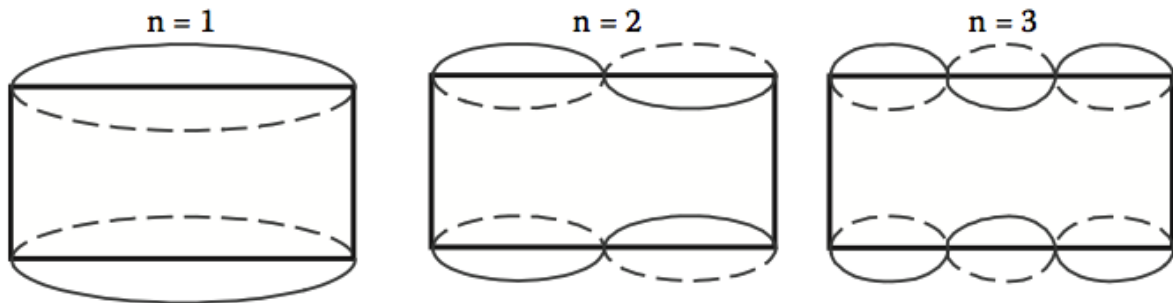
$$C_1 = \frac{1}{2}(1 - \nu_f) \left[(3 + 2\nu_f)\lambda^2 + m^2 + (m^2 + \lambda^2)^2 \frac{3 - \nu_f}{1 - \nu_f} \kappa^2(m^2 + \lambda^2)^2 \right] \quad (53)$$

$$C_0 = \frac{1}{2}(1 - \nu_f) [(1 - \nu_f^2)\lambda^4 + \kappa^2(m^2 + \lambda^2)^4] \quad (54)$$

$$\Delta C_2 = \Delta C_1 = \Delta C_0 = 0 \quad (55)$$

$$\lambda = n\pi \frac{R_f}{L_f} \quad R_f = 0.5(D_f - h_f) \quad \kappa^2 = \frac{h_f^2}{12R_f^2} \quad (56)$$

Kde ν_f je Poissonovo číslo, R_f je střední poloměr kostry, D_f je vnější průměr kostry, h_f je tloušťka kostry a L_f je délka kostry.



Obr. 14. - Modální modely pro válcovou skořepinu podepřenou na obou koncích

Pokud jsou oba konce kostry sevřeny, stále platí rovnice (51) a konstanty z následných vzorců jsou stále platné. Rovnice (51) je řešena dále s parametrem λ , který je ale podle Arnolda a Warburtona nahrazen jako:

$$\lambda_e = n\pi \frac{R_f}{L_f - L_0} \quad L_0 = L_f \frac{0.3}{n + 0.3} \quad (56)$$

Kde L_0 je korekce délky oboustranně sevřené kostry, které závisí na axiálním modálním čísle n . Pro oboustranně sevřenou kostru, nebo kostru podepřenou n obou koncích by měly být obvodové vibrační módy $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ vypočteny pro každý axiální vibrační mód $n = 1, 2, 3, \dots$. Axiální mód $n = 0$ neexistuje.

Vlastní frekvence kostry potom je:

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Omega_{mn}}{R_f} \sqrt{\frac{E_f}{\rho_f(1 - \nu_f^2)}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{mn}}{M_f}} \quad (57)$$

Kde E_f je modul pružnosti materiálu kostry a ρ_f je hustota materiálu. Soustředěná tuhost kostry je:

$$K_{mn} = \frac{\Omega_{mn}^2 E_f V_f}{R_f^2 (1 - \nu_f^2)} = \frac{2\Omega_{mn}^2 \pi L_f h_f E_f}{R_f (1 - \nu_f^2)} \quad (58)$$

Hmotnost rámu se určí jako:

$$M_f = \rho_f V_f = \rho_f (2\pi R_f) L_f h_f \quad V_f = 2\pi R_f L_f h_f \quad (59)$$

3.4.3 Vlastní frekvence statorového jádra a kostry

Mnoho elektrických strojů má statorové jádro vlisované do kostry. Kostra zvyšuje tuhost a hmotnost statoru. V případě, že statorové jádro je kratší, vnější konstrukce vytváří tlak, který je přenášen rovnoměrně po celém jádře statoru. Vzhledem k tomu, že výsledný moment setrvačnosti souosých válců (kostra a statorového jádra) je roven součtu momentů setrvačnosti každého válce, je vlastní frekvence systému statorového jádra a kostry určena za předpokladu, že soustředěná tuhost statorového jádra $K_m^{(c)}$ a kostry $K_{mn}^{(f)}$ jsou rovnoběžné, to znamená, že ekvivalentní tuhost je $K_m^{(c)} + K_{mn}^{(f)}$. Stejný předpoklad platí i pro stanovení ekvivalentní hmotnosti systému statorového jádra a kostry $M_c + M_f$. Na základě těchto předpokladů lze vyjádřit vlastní frekvenci systému statorového jádra a kostry jako [2]:

$$f_{mn} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m^{(c)} + K_{mn}^{(f)}}{M_c + M_f}} \quad (60)$$

Kde $K_m^{(c)}$ může být stanoveno pomocí rovnice (44) nebo (50) a $K_{mn}^{(f)}$ vychází z rovnice (58). Soustředěné hmotnosti M_c a M_f se určí z rovnic (45) a (59).

U velkých strojů je průhyb statorového jádra většinou $\pm 0,25 \times 10^{-4}$ mm. Na druhé straně, výrobní tolerance mezi vnějším průměrem statorového jádra a vnitřním průměrem kostry jsou od $\pm 0,02$ do $\pm 0,1$ mm. To znamená, že mechanické spojení statorového jádra a kostry je malé pro nízké frekvence výchylek. Malé stroje se statorovými plechy z jednoho kusu mají lepší mechanické spojení než stroje s plechy, které jsou tvořeny segmenty. Mechanické spojení se zvýší vlivem radiální expanze při ohřátí stroje na pracovní teplotu. Při výpočtech vibrací pro většinu konstrukcí elektrických strojů lze zanedbat kostru u velkých strojů, ale u malých strojů

nesmí být kostra a její moment setrvačnosti zanedbán.

3.4.4 Vliv vinutí statoru a zuby

Vinutí je uloženo v drážkách, které jsou odizolovány od zubů. Drážky s vinutím představují další vnitřní válcovou část statorového jádra. Vlastní frekvence systému statorového jádra s kostrou a vinutím se určí [2]:

$$f_{mn} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m^{(c)} + K_{mn}^{(f)} + K_m^{(w)}}{M_c + M_f + M_w}} \quad (61)$$

Kde $K_m^{(w)}$ je soustředěná tuhost drážkové části s vloženým vinutím a M_w je hmotnost zubů, vinutí a izolace. Soustředěná tuhost může být stanovena pomocí metody v kapitole 3.4.1.

Pro krátké vinutí (konečná délka válce)

$$K_m^{(w)} = \frac{m^2(m^2 - 1)}{m^2 + 1} \frac{2\pi E_w I_w}{R_w^3} \quad (62)$$

Pro dlouhé vinutí (nekonečně dlouhý válec)

$$K_m^{(w)} = \frac{\Omega_m^2 E_w V_w}{R_w^2 (1 - \nu_w^2)} \quad (63)$$

Bezrozměrný frekvenční parametr Ω_m je určen z rovnic (47) a (48). Poloměr $R_w = R_c - h_{sl}$, kde h_{sl} je hloubka drážky.

Objem vinutí ve formě válcového tvaru se určí:

$$V_w = 2\pi R_w h_t (L_i + 2h_{ov}) \quad (64)$$

Kde L_i je efektivní délka statorového paketu, h_{ov} je axiální délka jednostranného koncového připojení, E_w je ekvivalentní modul pružnosti pro vinutí a izolaci a ν_w je Poissonovo číslo pro vinutí s izolací. Modul pružnosti pro měděné vinutí je 110 – 120 GPa. Pro polymerovou izolaci je 3 GPa. Ekvivalentní modul pružnosti pro měď s izolací je přibližně 9,4 GPa za předpokladu, že faktor plnění drážky je 0,5. Poissonovo číslo pro měď je v rozmezí 0,33 až 0,36. Pro polymerovou izolaci je toto číslo 0,36.

Hmotnost vinutí se určí ze vzorce:

$$M_w = m_1 \rho_w N_1 l_{turn} a_w a_p s_w \quad (65)$$

Kde m_1 je počet fází, ρ_w je hustota vinutí (pro měď 8890 kg/m^3 a pro hliník 2700 kg/m^3), N_1 je počet závitů na fázi, l_{turn} je průměrná délka jednoho závitu, a_p je počet paralelních větví, a_w je počet paralelních vodičů a s_w je průřez vodiče.

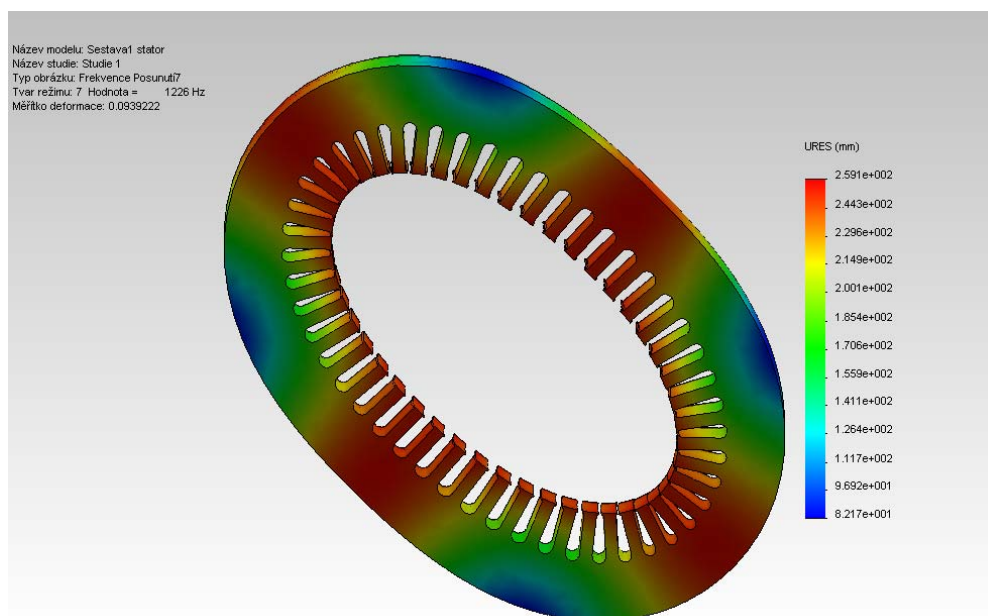
Podobně jako u satorového jádra, dává rovnice (63) přesnější výsledek než rovnice (62), i když platí, že $(L_i + 2h_{ov})/2R_w < 1$.

3.5 Jednotlivé části a soubory podrobené analýze

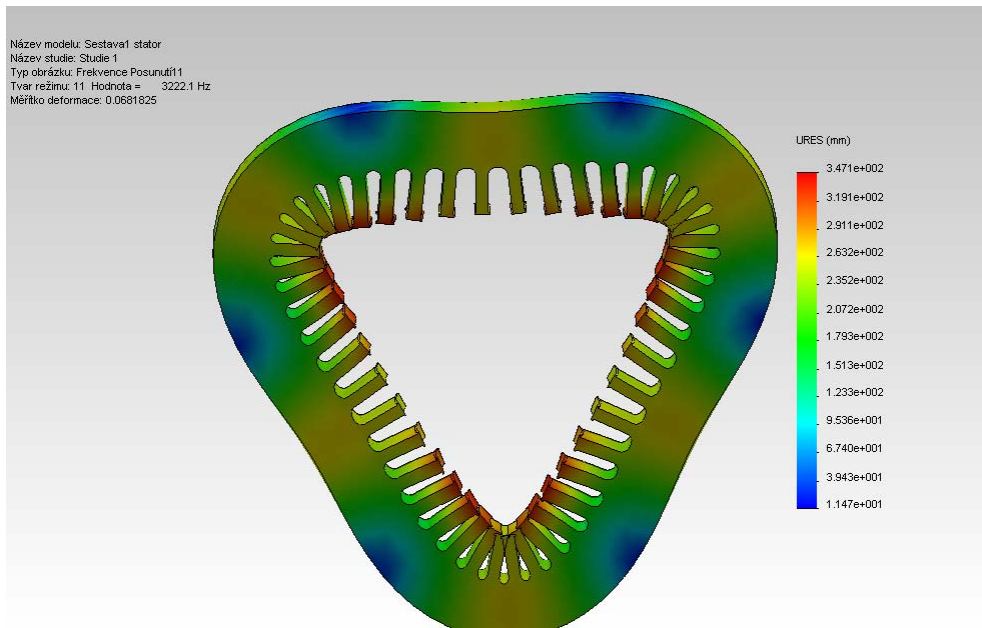
Jelikož je výčet všech vlastních tvarů a frekvencí nepřehledný, jsou v této části zahrnuty pouze základní tvary analyzovaných prvků. Další tvary a frekvence jsou v příloze.

3.5.1 Statorové jádro

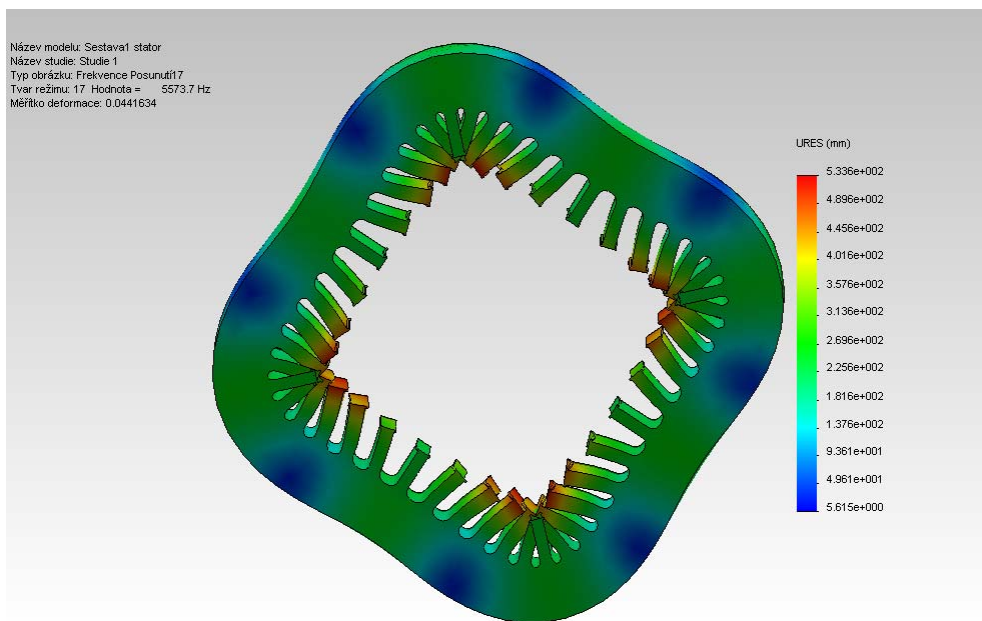
Jako první bylo analýze podrobeno statorové jádro.



Obr.15. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1226Hz



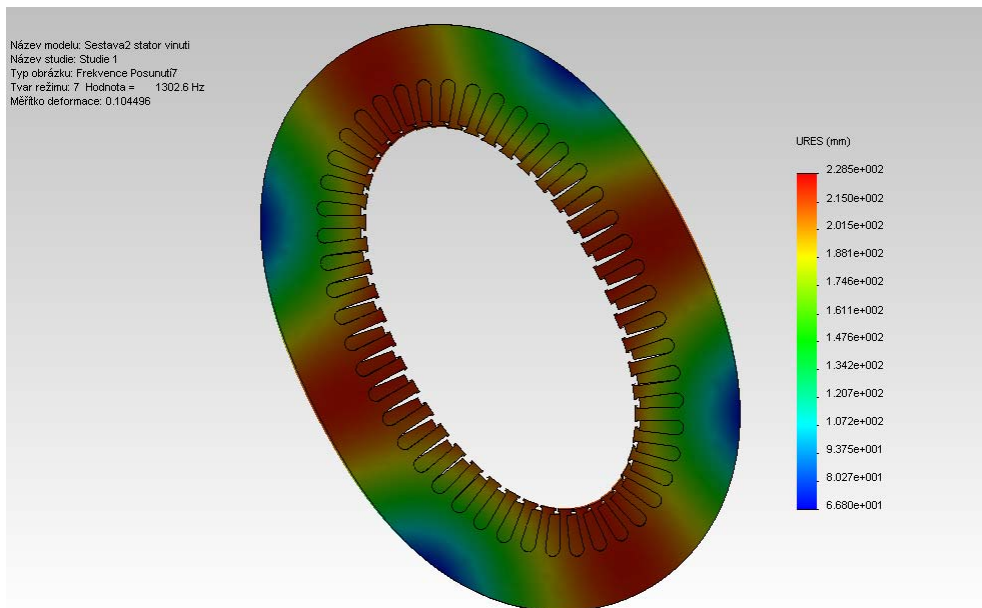
Obr.16. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3222,1Hz



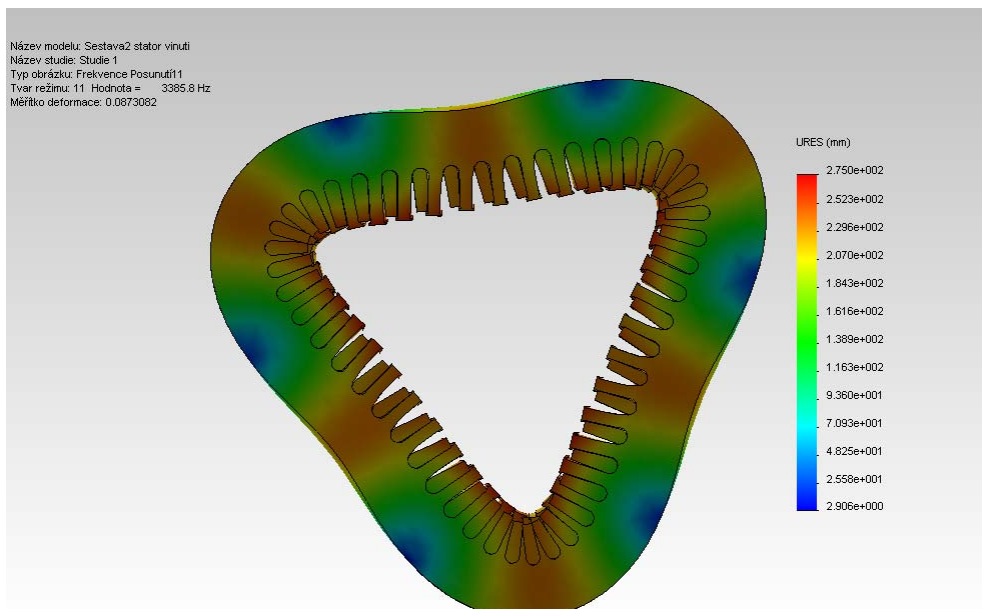
Obr.17. – Deformace pro $r=4$ při frekvenci 5573,7Hz

3.5.2 Statorové jádro s vodiči v drážkách

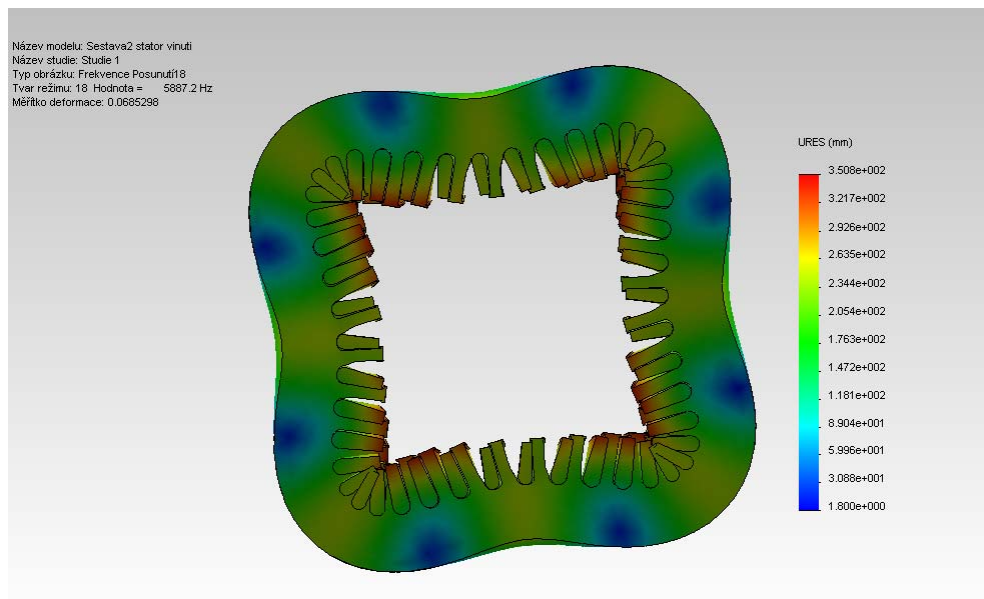
Jako další byla provedena analýza statorového jádra s vodiči v drážkách.



Obr.18. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1302,6Hz



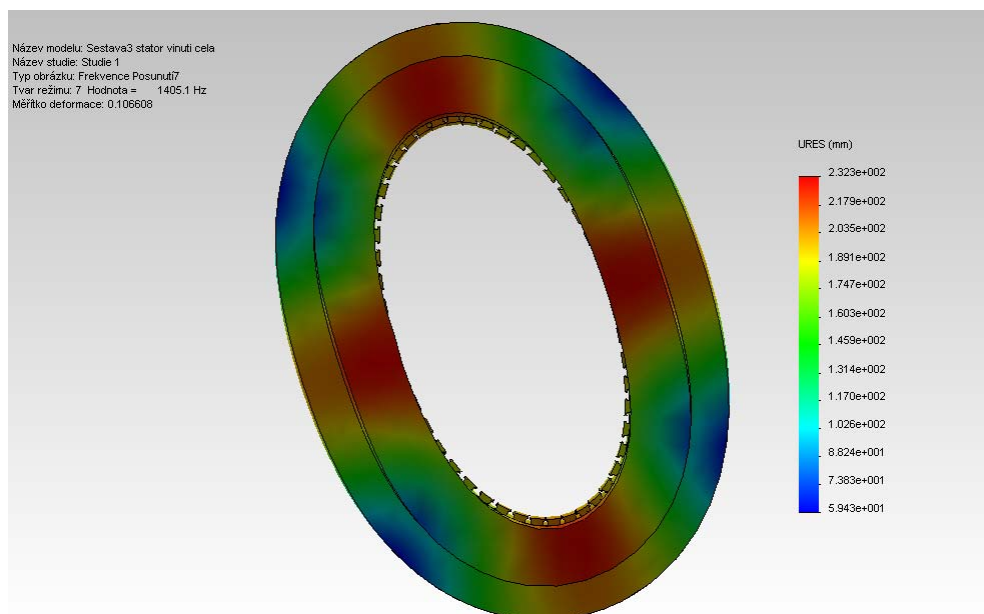
Obr.19. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3385,8Hz



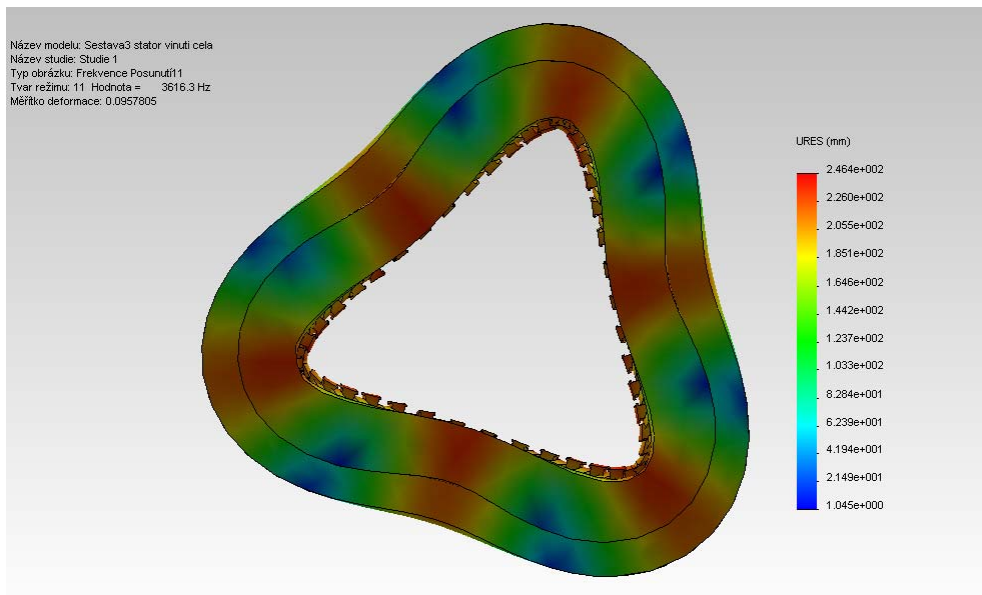
Obr.20. – Deformace pro $r=4$ při frekvenci 5887,2Hz

3.5.3 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí

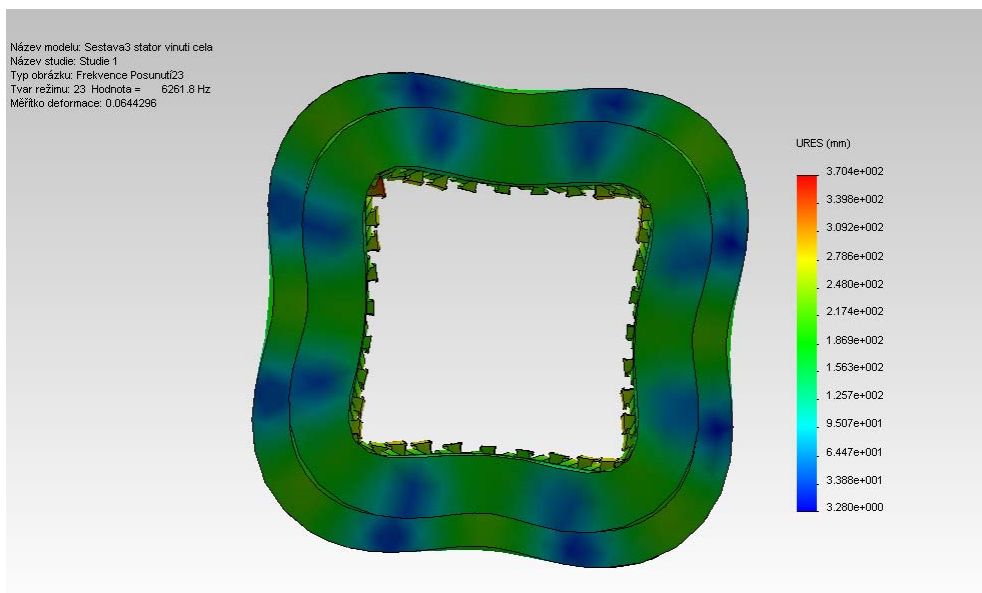
Jelikož je vinutí bez čel neúplné, bylo nutné provést analýzu statoru s vinutím se zahrnutím čel vinutí.



Obr.21. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1405,1Hz



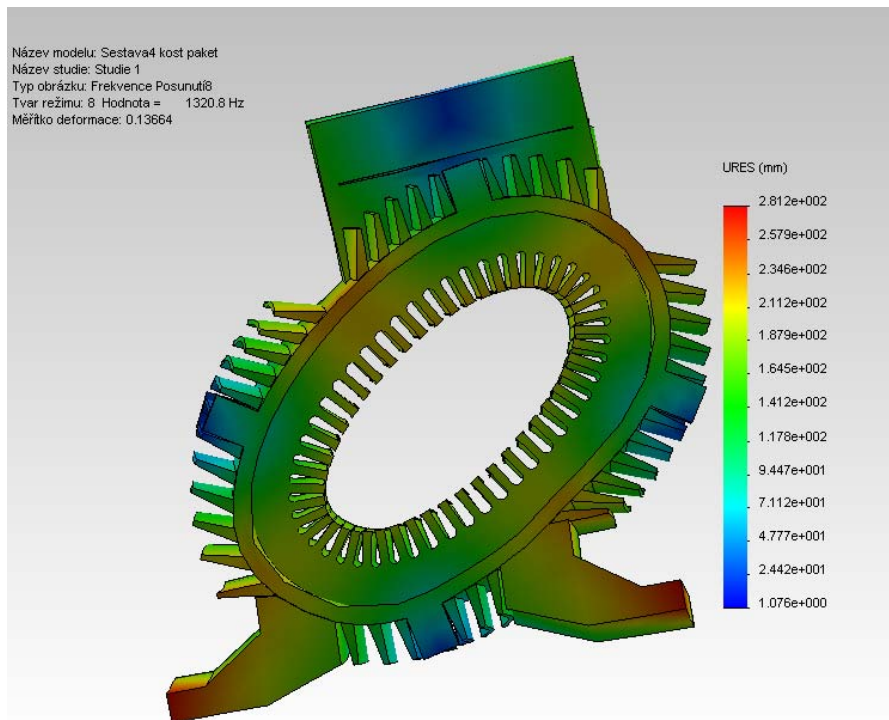
Obr.22. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3616,3Hz



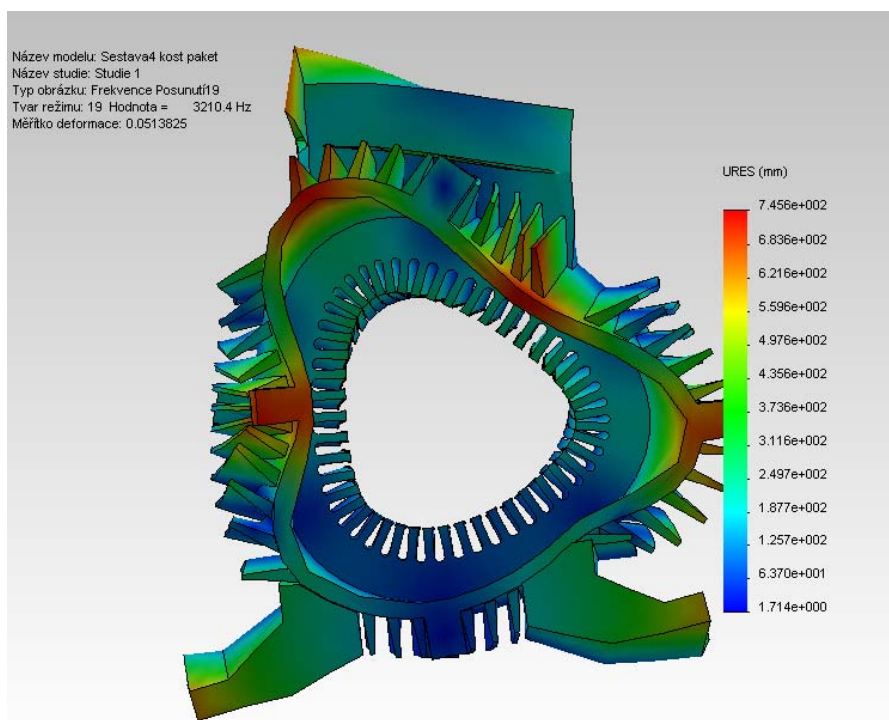
Obr.23. – Deformace pro $r=4$ při frekvenci 6261,8Hz

3.5.4 Statorové jádro vložené v kostře

Další analýzy jsou obdobné jako předchozí, pouze s tou obměnou, že analyzované součásti jsou v hliníkové kostře.



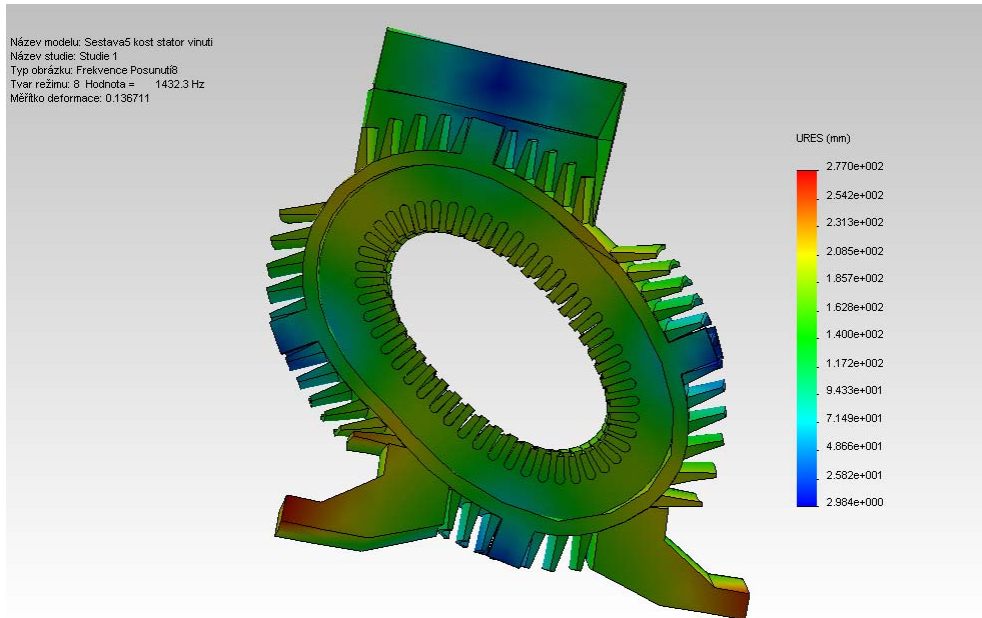
Obr.24. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1320,8Hz



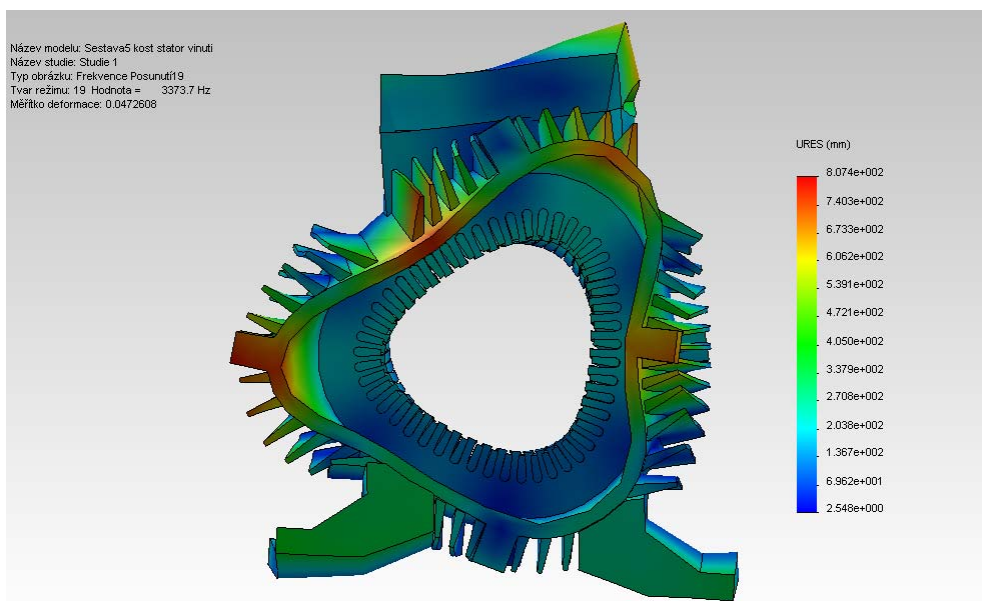
Obr. 25. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3210,4Hz

Z obrázků je patrné, že rozpoznat různé druhy deformací je dosti složité.

3.5.5 Statorové jádro s vodiči v drážkách vložené v kostře

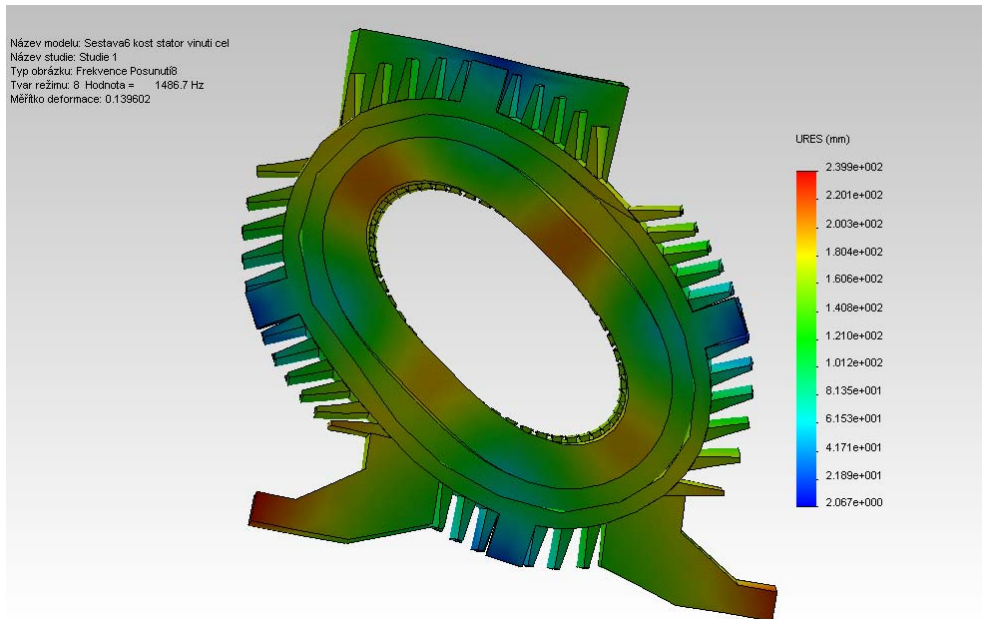
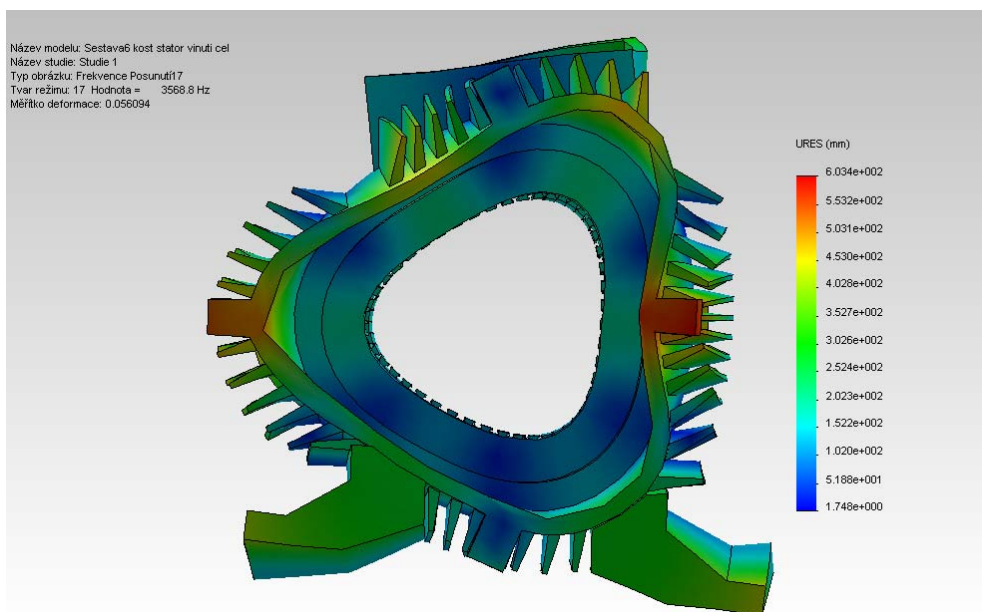


Obr. 26. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1432,3Hz

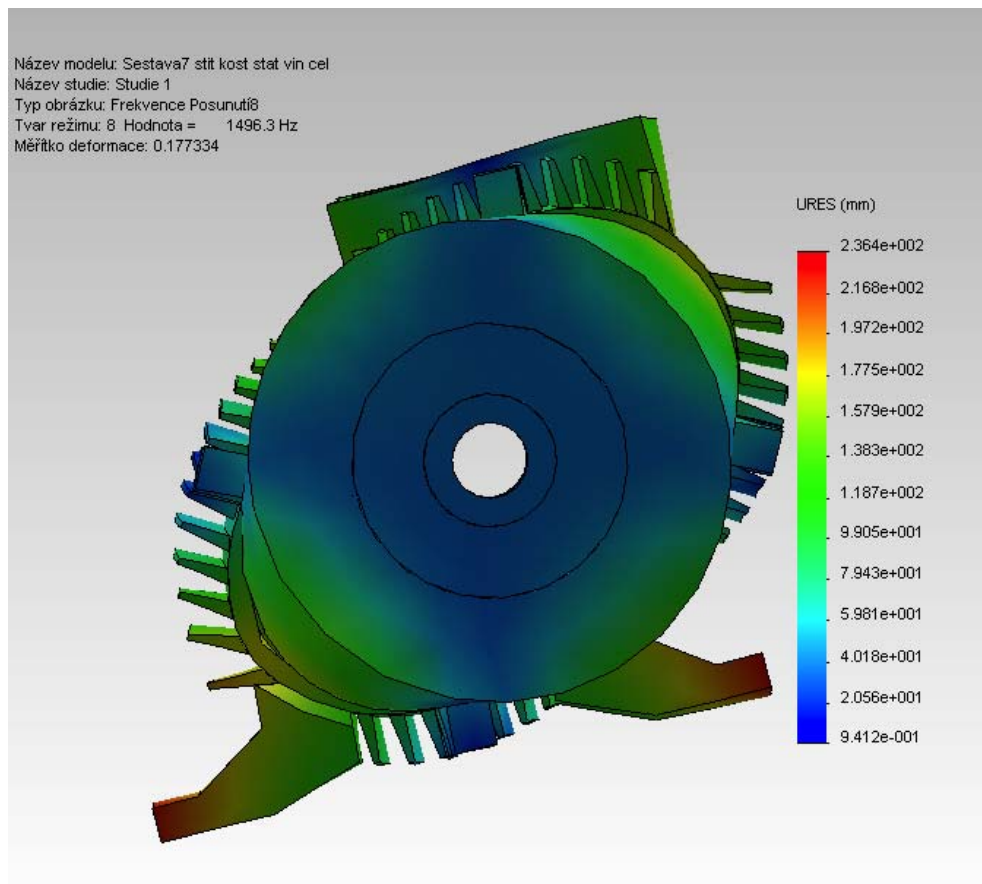


Obr. 27. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3373,7Hz

3.5.6 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí vložené v kostře

Obr. 28. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1486,7HzObr. 29. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3568,8Hz

3.5.7 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí vložené v kostře se štíty
Tato analýza byla jako poslední. Vlivem štítů je složité rozpoznat o jaký tvar se jedná.



Obr. 30. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1496,3Hz

4. Vliv konstrukčních částí asynchronního stroje na jeho vlastní frekvence

4.1 Porovnání

Všechny části a soustavy, které byly analyzovány mají různé vlastní frekvence a tvary. Různost vlastních frekvencí je dána vlastnostmi analyzovaných částí, zejména hmotností a tuhostí součástí nebo sestavy, které jsou dány různými materiály použitými při vytváření modelů. Pro úplnost jsou zde uvedeny tabulky jednotlivých analyzovaných sestav, ve kterých jsou uvedeny vlastní frekvence a vlastní tvary. První tři deformace pro každou analyzovanou část nejsou uvedeny, protože se jedná režim pevného tělesa, který má nulovou frekvenci a zobrazuje pouze posunutí v jedné ze tří os, nebo otočení kolem os.

Statorový paket		
Posunutí	Vlastní frekvence [Hz]	Mód deformace r
4	0,00041425	nespecifikovaný
5	0,0006319	nespecifikovaný
6	0,00063377	nespecifikovaný
7	1226	2
8	1226,4	2
9	1912,8	nespecifikovaný
10	1913,9	nespecifikovaný
11	3222,1	3
12	3225	3
13	4319,2	nespecifikovaný
14	4323,8	nespecifikovaný
15	5474,6	nespecifikovaný
16	5475,4	nespecifikovaný
17	5573,7	4
18	5578,6	4
19	6366,6	nespecifikovaný
20	6671,4	nespecifikovaný

Tab. 1. - Vlastní frekvence statorového paketu

Statorový paket s vinutím		
Posunutí	Vlastní frekvence [Hz]	Mód deformace r
4	0,0004071	nespecifikovaný
5	0,00060439	nespecifikovaný
6	0,00060983	nespecifikovaný
7	1302,6	2
8	1305	2
9	2026,3	nespecifikovaný
10	2028,4	nespecifikovaný
11	3385,8	3
12	3390,1	3
13	4476	nespecifikovaný
14	4478,1	nespecifikovaný
15	4942	nespecifikovaný
16	4955,7	nespecifikovaný
17	5710,2	nespecifikovaný
18	5887,2	4
19	5890,8	4
20	6236,1	nespecifikovaný

Tab.2. - Vlastní frekvence statorového paketu s vinutím

Statorový paket s vinutím a čely		
Posunutí	Vlastní frekvence [Hz]	Mód deformace r
4	0,00049573	nespecifikovaný
5	0,00065784	nespecifikovaný
6	0,00068421	nespecifikovaný
7	1405,1	2
8	1406,3	2
9	1954,2	nespecifikovaný
10	1955,4	nespecifikovaný
11	3616,3	3
12	3618,6	3
13	4451	nespecifikovaný
14	4457,5	nespecifikovaný
15	4461,5	nespecifikovaný
16	4484,2	nespecifikovaný
17	5713,8	nespecifikovaný
18	5766,9	nespecifikovaný
19	5791,8	nespecifikovaný
20	5893,3	nespecifikovaný
21	6117,3	nespecifikovaný
22	6258,1	nespecifikovaný
23	6261,8	4
24	6266,5	4

Tab.3. - Vlastní frekvence statorového paketu s vinutím a čely

Statorový paket v kostře		
Posunutí	Vlastní frekvence [Hz]	Mód deformace r
4	0,00070245	nespecifikovaný
5	0,00090755	nespecifikovaný
6	0,0011336	nespecifikovaný
7	1204,1	nespecifikovaný
8	1320,8	2
9	1374,6	2
10	1477,9	nespecifikovaný
11	2352	nespecifikovaný
12	2484,2	nespecifikovaný
13	2517,1	nespecifikovaný
14	2680,5	nespecifikovaný
15	2837,6	nespecifikovaný
16	2930,1	nespecifikovaný
17	2945,7	nespecifikovaný
18	3060,5	nespecifikovaný
19	3210,4	3
20	3384,9	nespecifikovaný

Tab.4. - Vlastní frekvence statorového paketu v kostře

Statorový paket s vinutím v kostře		
Posunutí	Vlastní frekvence [Hz]	Mód deformace r
4	0,0006751	nespecifikovaný
5	0,00094754	nespecifikovaný
6	0,0010537	nespecifikovaný
7	1326,7	nespecifikovaný
8	1432,3	2
9	1479,7	2
10	1589,3	nespecifikovaný
11	2381,2	nespecifikovaný
12	2481,3	nespecifikovaný
13	2616,3	nespecifikovaný
14	2808,3	nespecifikovaný
15	2880,5	nespecifikovaný
16	2981,5	nespecifikovaný
17	3005,9	nespecifikovaný
18	3130,1	nespecifikovaný
19	3373,7	3
20	3448,6	nespecifikovaný

Tab.5. - Vlastní frekvence statorového paketu s vinutím v kostře

Statorový paket s vinutím a čely v kostře		
Posunutí	Vlastní frekvence [Hz]	Mód deformace r
4	0,00056061	nespecifikovaný
5	0,00087785	nespecifikovaný
6	0,00092048	nespecifikovaný
7	1361	nespecifikovaný
8	1486,7	2
9	1525,1	2
10	1746,3	nespecifikovaný
11	2641,5	nespecifikovaný
12	2948,1	nespecifikovaný
13	3000,2	nespecifikovaný
14	3006	nespecifikovaný
15	3069,7	nespecifikovaný
16	3483,4	nespecifikovaný
17	3568,8	3
18	3871,8	nespecifikovaný
19	4029,2	nespecifikovaný
20	4145,1	nespecifikovaný

Tab.6. - Vlastní frekvence statorového paketu s vinutím a čely v kostře

Statorový paket s vinutím a čely v kostře se štíty		
Posunutí	Vlastní frekvence [Hz]	Mód deformace r
4	0,00070987	nespecifikovaný
5	0,0011478	nespecifikovaný
6	0,0013489	nespecifikovaný
7	1435,7	nespecifikovaný
8	1496,3	2
9	1581,4	2
10	1692,5	nespecifikovaný
11	1733,7	nespecifikovaný
12	1850,1	nespecifikovaný
13	1874,7	nespecifikovaný
14	2027,4	nespecifikovaný
15	2121,9	nespecifikovaný
16	2301,6	nespecifikovaný
17	2652,8	nespecifikovaný
18	2754,5	nespecifikovaný
19	2840,9	nespecifikovaný
20	2861,5	nespecifikovaný

Tab.7. - Vlastní frekvence statorového paketu s vinutím a čely v kostře se štíty

Z analýz je patrné, že každá přidaná součást v analyzované soustavě zvyšuje velikost vlastní frekvence pro jednotlivé módy deformace. Z tabulek je patrné, že největší vliv na zvýšení vlastní frekvence mají v tomto případě čela vinutí. Dále je patrné, že s obsáhlejší analyzovanou sestavou roste i množství vlastních frekvencí, u kterých ale není možné určit vlastní tvar. Z tabulek je patrné, že na chvění je nejvíce náchylná kostra s ložiskovými štíty. U této sestavy se podařilo rozpoznat pouze jediný vlastní tvar pro vlastní frekvenci.

Závěr

V první části této diplomové práce byl popsán asynchronní stroj, vibrace a síly, které působí na statorové jádro stroje. Ve druhé části byl popsán typ stroje, který byl namodelován a využit pro analýzy vlastních frekvencí konstrukčních částí stroje. V této části bylo dále specifikováno programové vybavení, které bylo použito pro tvorbu částí modelů analyzovaného stroje. V další části byl proveden rozbor vlastních frekvencí a byla provedena analýza vlastních frekvencí stroje a v poslední části je provedeno shrnutí analýz se zobrazením vlastních frekvencí. Škodlivým kmitáním a vibrováním strojů se zabývá vibrodiagnostika, nebo-li vibrační diagnostika. Pro určení příčin, které zvyšují vibrace jsou používány senzory výchylky, polohy a posuvu, senzory rychlosti pro určení rychlosti kmitání a senzory zrychlení, tzv. akcelerometry, pro měření zrychlení kmitání. Určení zdrojů chvění z hlediska elektrického i mechanického je po finanční i časové stránce velice náročné, ale tato náročnost znamená pouze zlomek z ceny, která by musela být vynaložena při stažení celé série strojů, které jsou vadné.

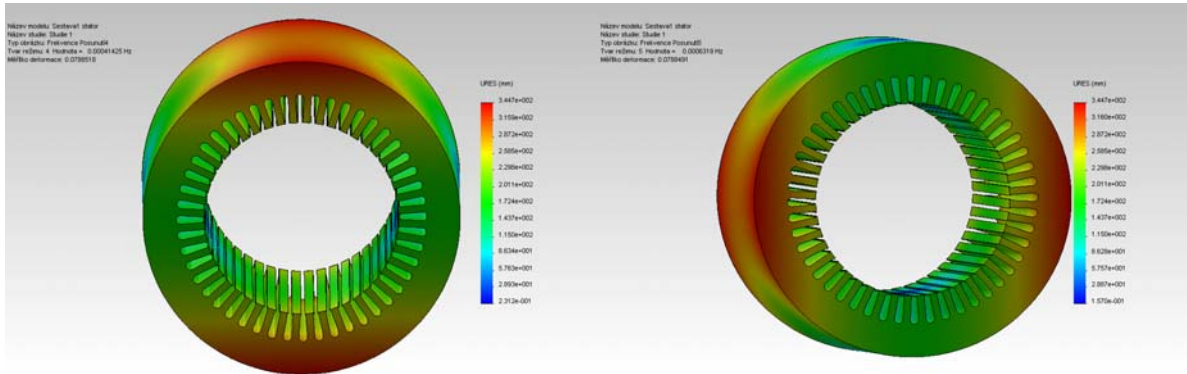
Seznam použité literatury

- [1] HELLER, B., HAMATA, V. Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji. Praha Nakladatelství Československé akademie věd, 1961
- [2] GIERAS, J. F., WANG, CH., LAI, J. CH. Noise of polyphase electric motors. CRC Press 2006
- [3] BARTOŠ, V. Elektrické stroje. Plzeň : ZČU FEL, 2006
- [4] PETROV, G. N. Elektrické stroje 1. Praha : Academia, 1980

Přílohová část

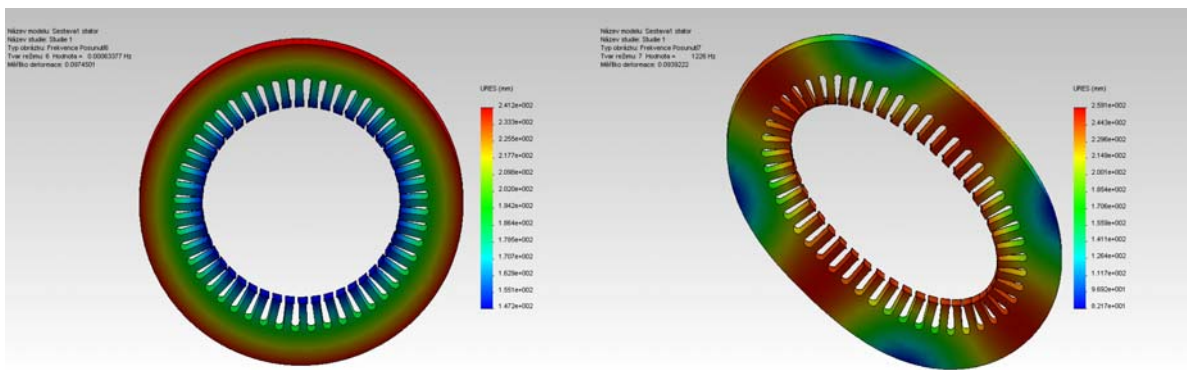
Tvary analyzovaných částí při vlastních frekvencích

Paket statoru



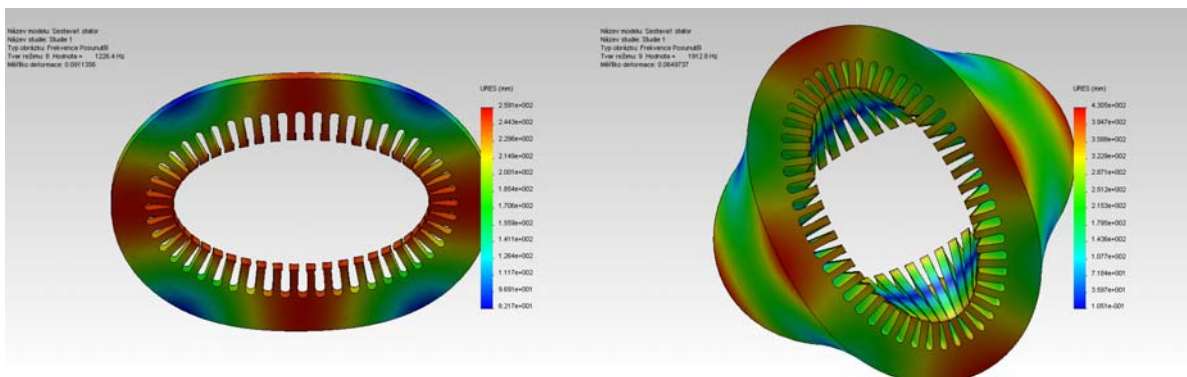
Obr. I- frekvence 0,00041425Hz

Obr. II- frekvence 0,0006319Hz



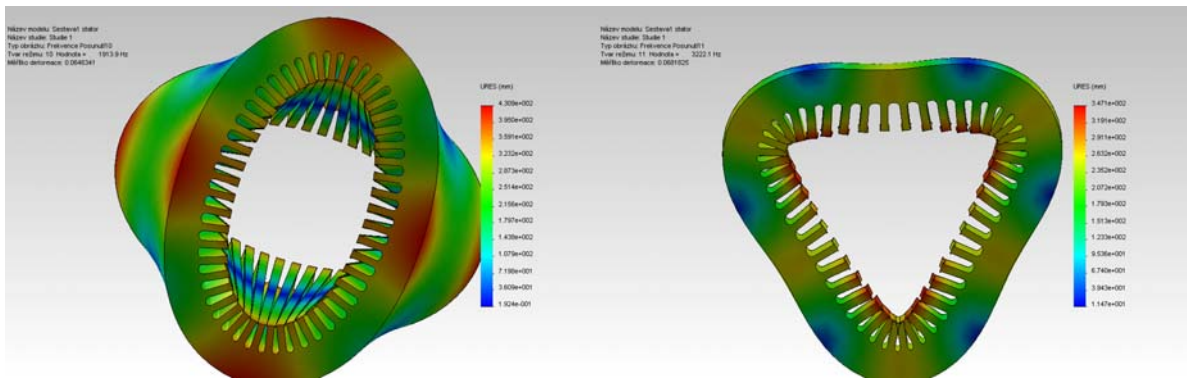
Obr. III- frekvence 0,00063377Hz

Obr. IV- frekvence 1226Hz



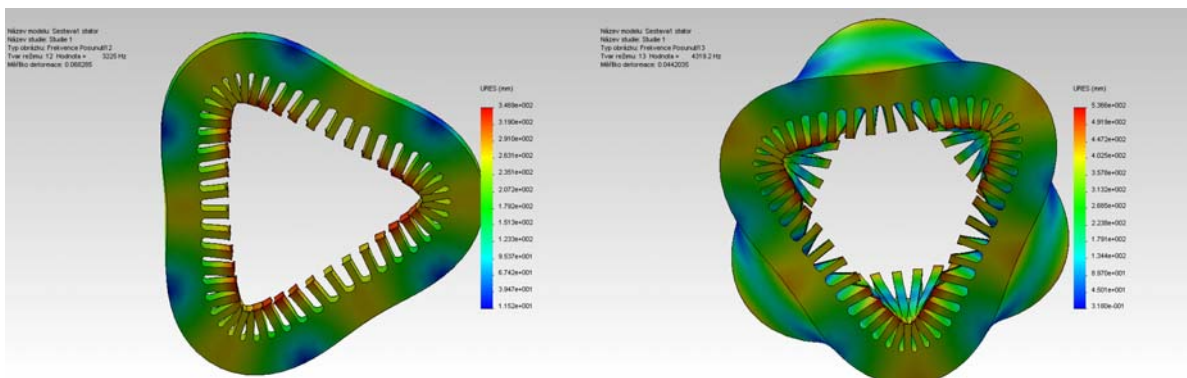
Obr. V- frekvence 1226,4Hz

Obr. VI- frekvence 1912,8Hz



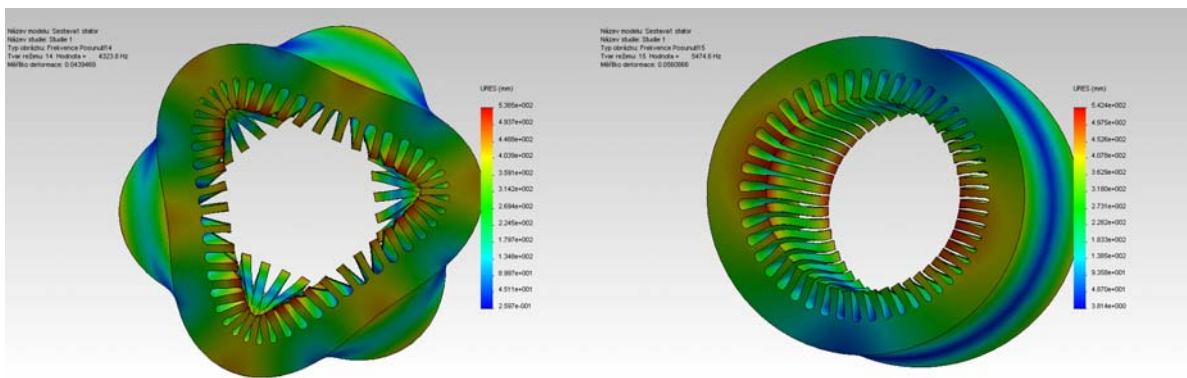
Obr. VII- frekvence 1913,9Hz

Obr. VIII- frekvence 3222,1Hz



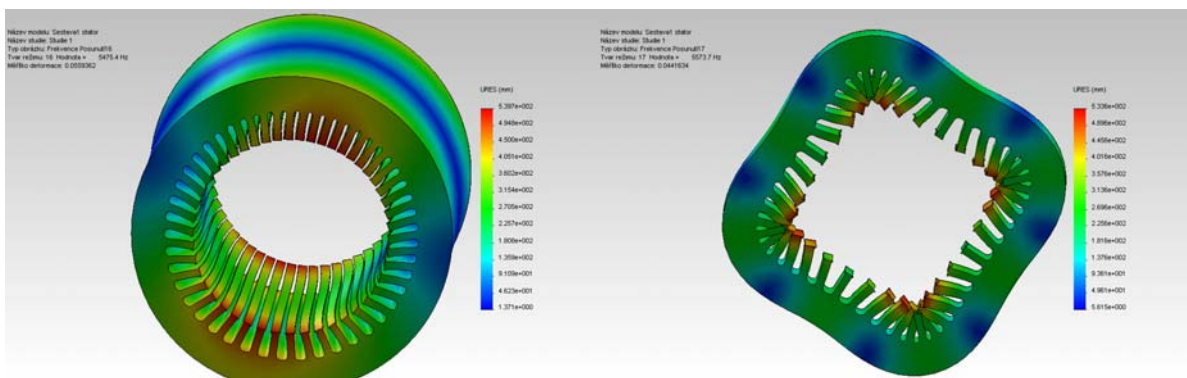
Obr. IX- frekvence 3225Hz

Obr. X- frekvence 4319,2Hz



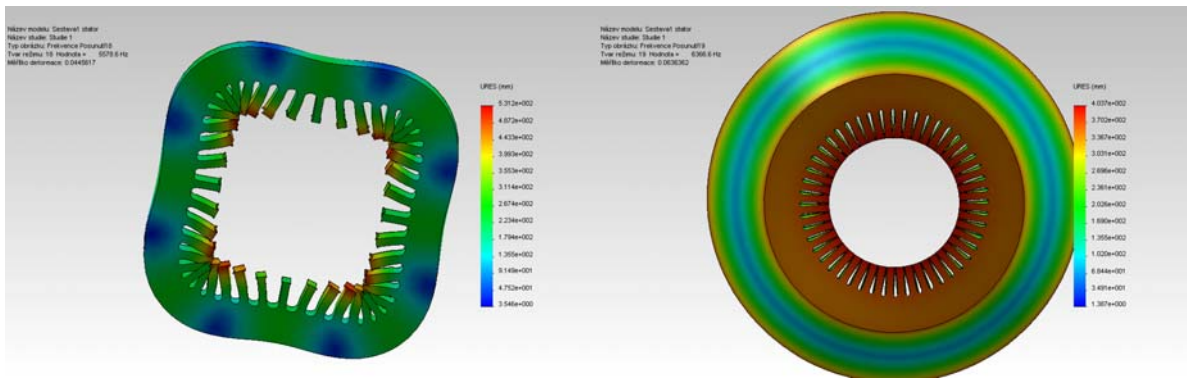
Obr. XI- frekvence 4323,8Hz

Obr. XII- frekvence 5474,6Hz



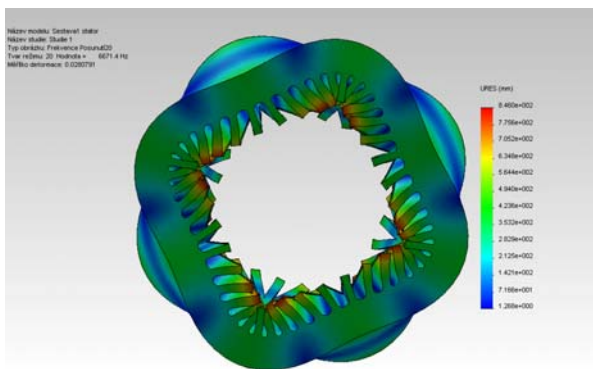
Obr. XIII- frekvence 5475,4Hz

Obr. XIV- frekvence 5573,7Hz



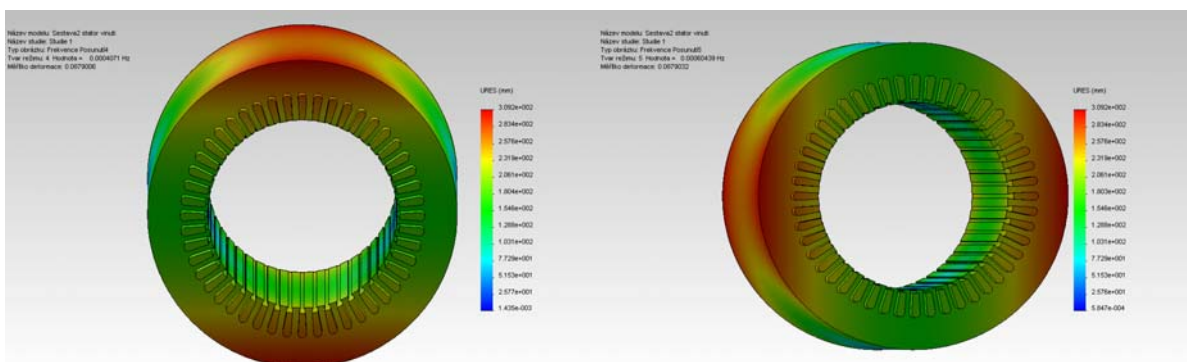
Obr. XV- frekvence 5578,6Hz

Obr. XVI- frekvence 6366,6Hz



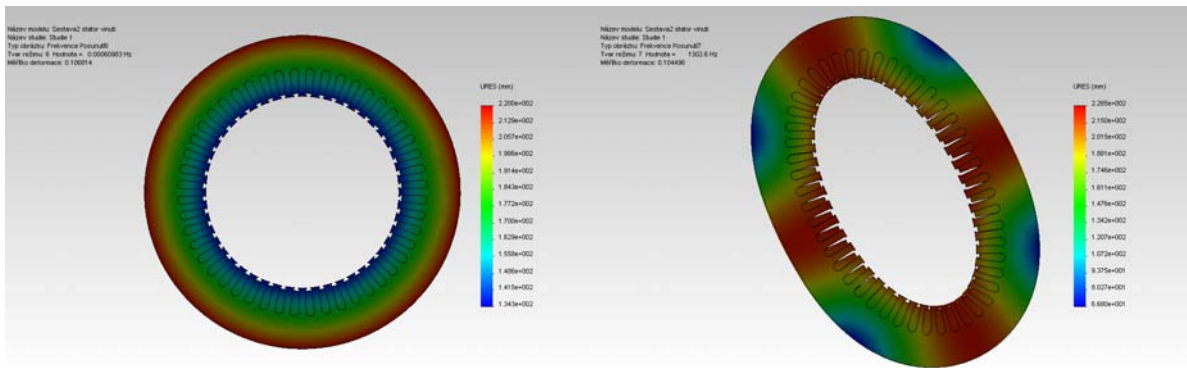
Obr. XVII- frekvence 6671,4Hz

Paket statoru s vinutím



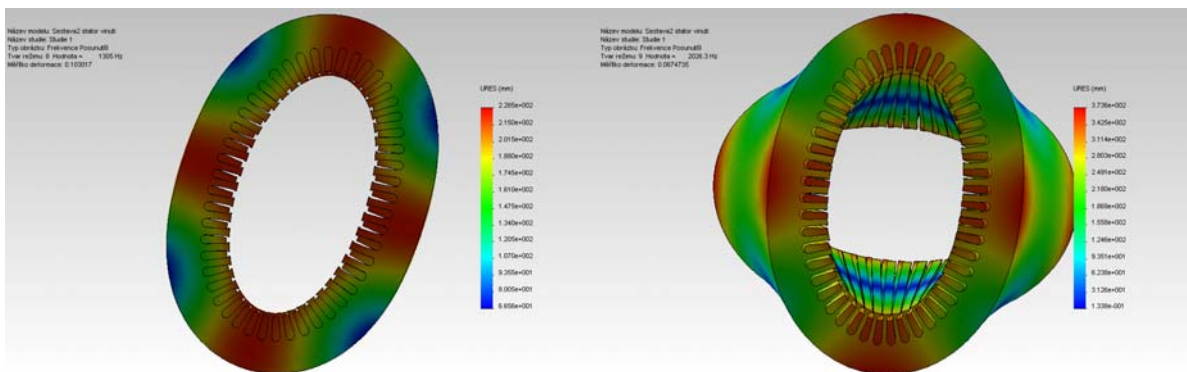
Obr. XVIII-frekvence 0,0004071Hz

Obr. XIX-frekvence 0,00060439Hz



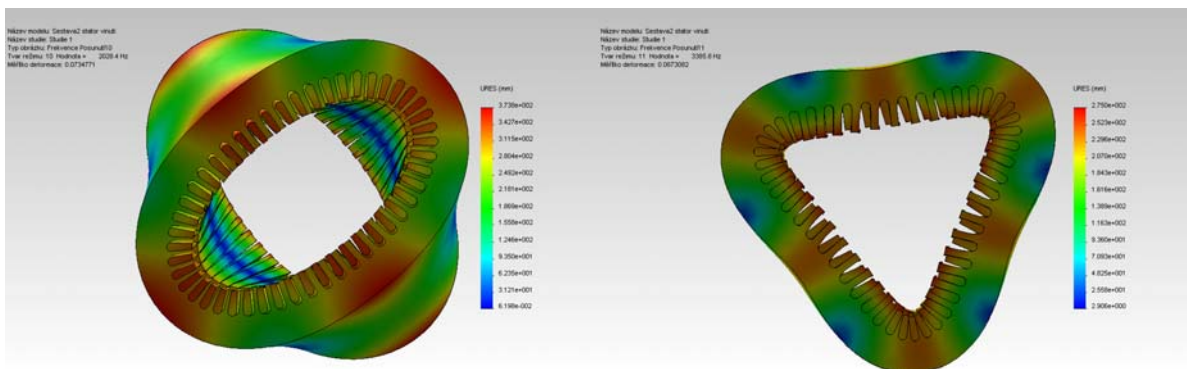
Obr. XX-frekvence 0,00060983Hz

Obr. XXI-frekvence 1302,6Hz



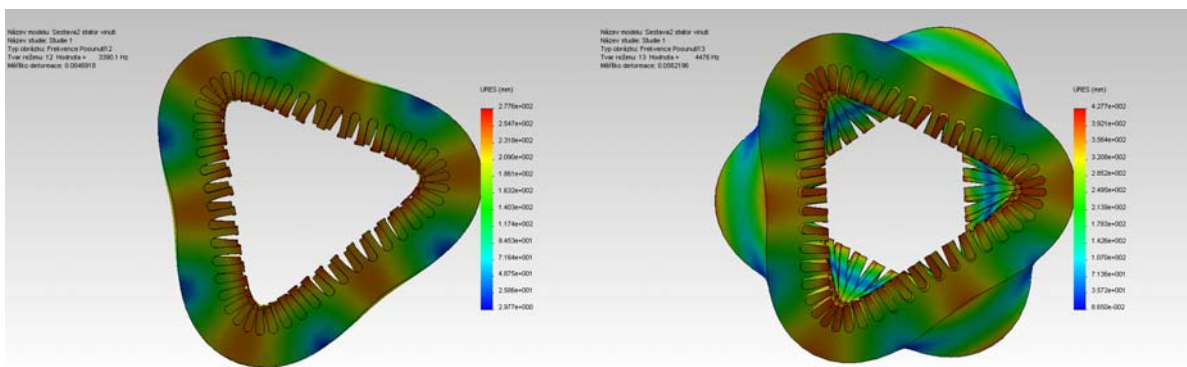
Obr. XXII-frekvence 1305Hz

Obr. XXIII-frekvence 2026,3Hz



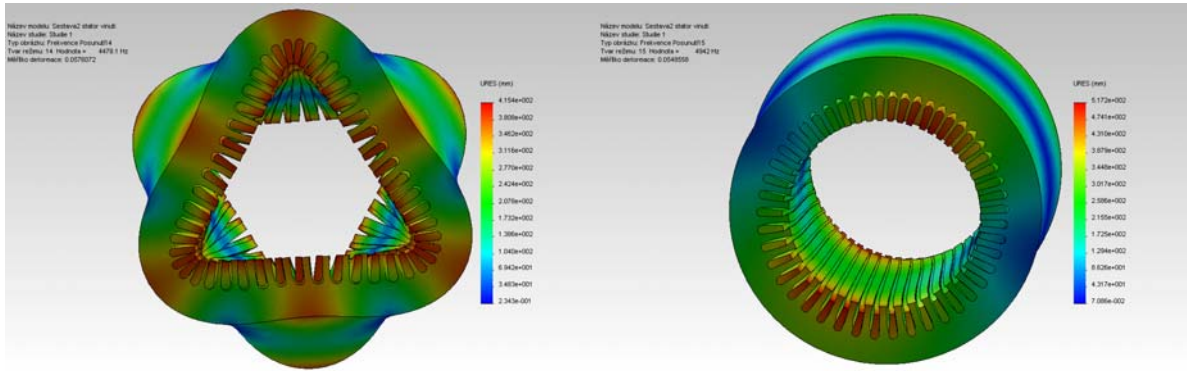
Obr. XXIV-frekvence 2028,4Hz

Obr. XXV-frekvence 3385,8Hz



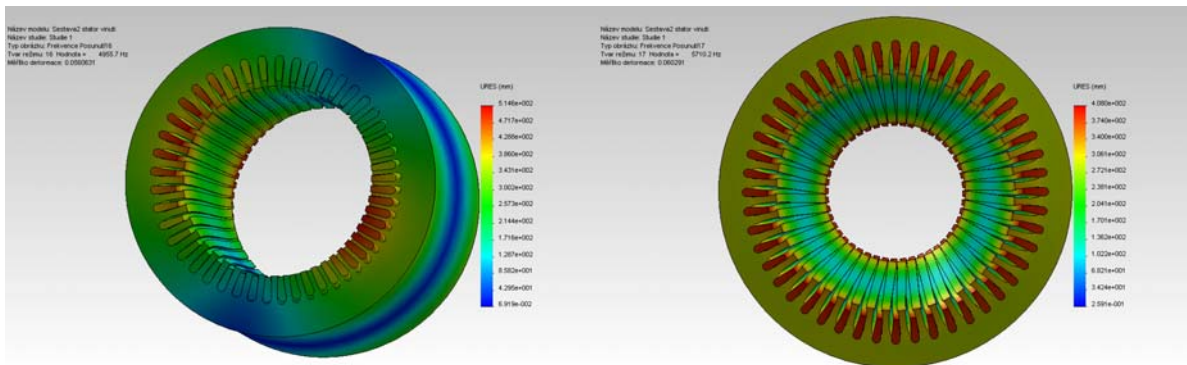
Obr. XXVI-frekvence 3390,1Hz

Obr. XXVII-frekvence 4476Hz



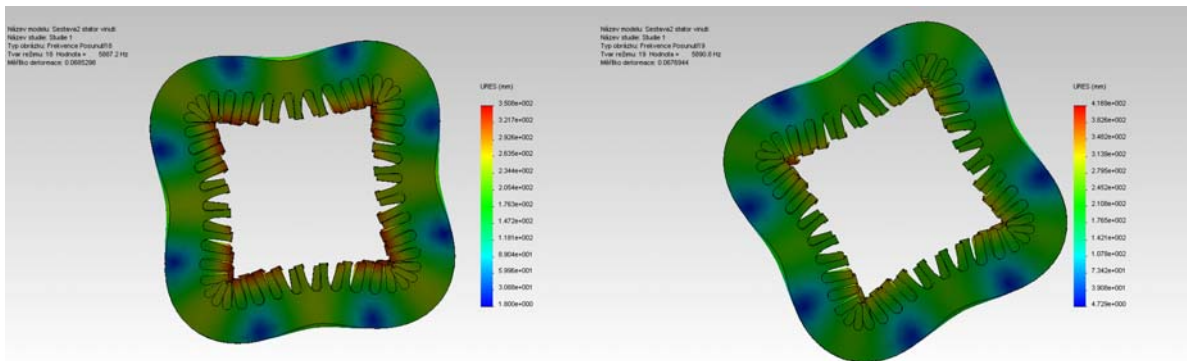
Obr. XXVIII-frekvence 4478,1Hz

Obr. XXIX-frekvence 4942Hz



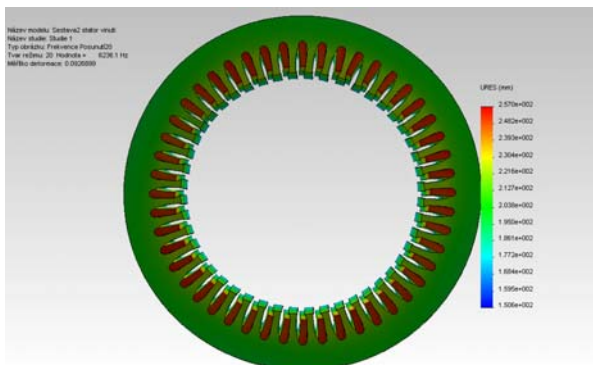
Obr. XXX-frekvence 4955,7Hz

Obr. XXXI-frekvence 5710,2Hz



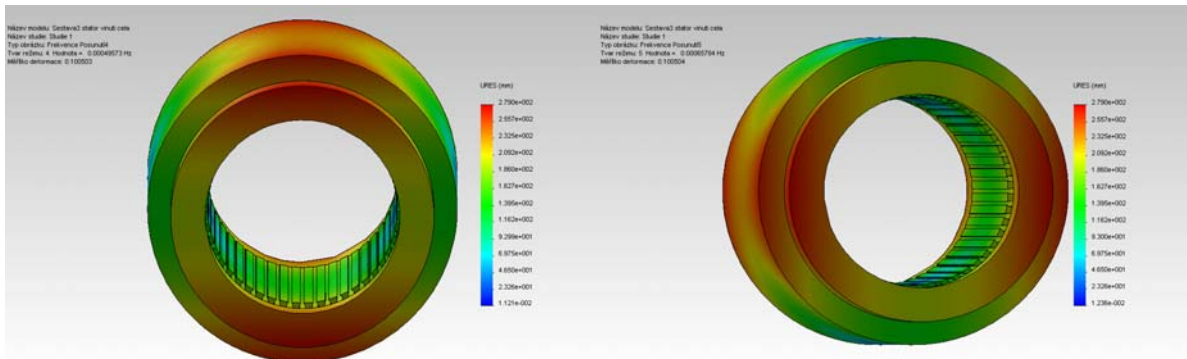
Obr. XXXII-frekvence 5887,2Hz

Obr. XXXIII-frekvence 5890,8Hz



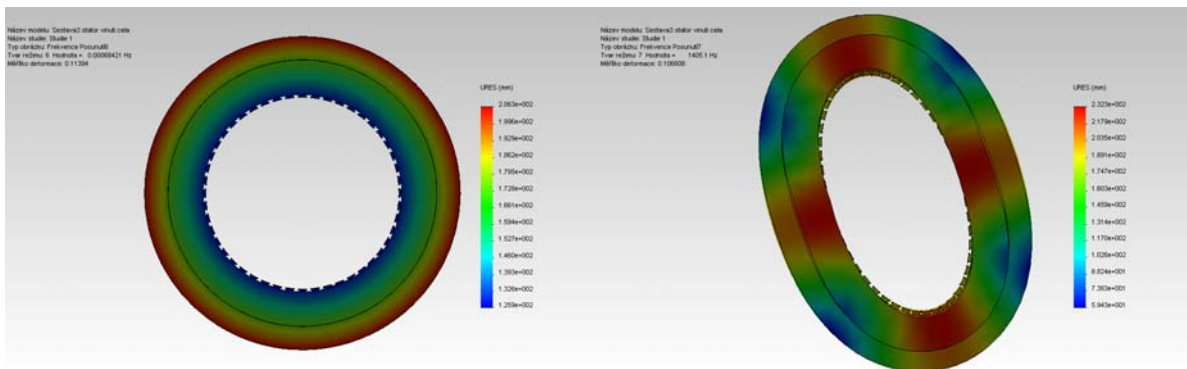
Obr. XXXIV-frekvence 6236,1Hz

Paket statoru s vinutím a čely cívek



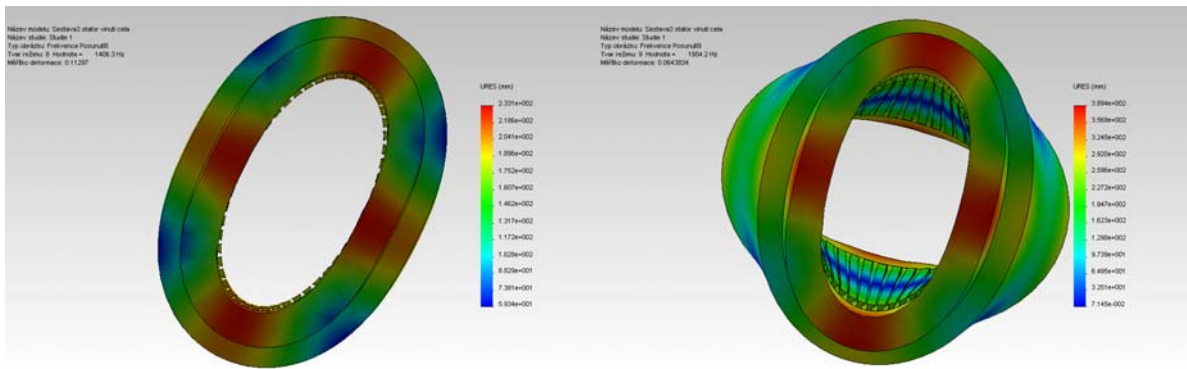
Obr. XXXV-frekvence 0,00049573Hz

Obr. XXXVI-frekvence 0,00065784Hz



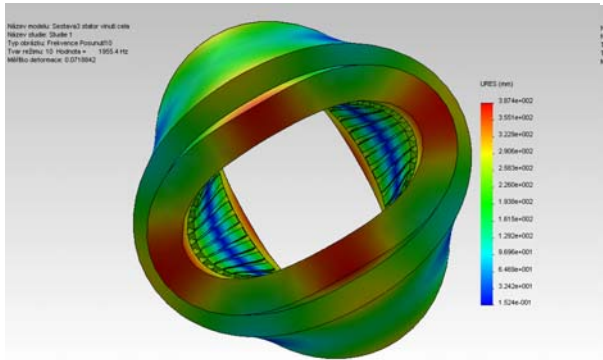
Obr. XXXVII-frekvence 0,00068421Hz

Obr. XXXVIII-frekvence 1405,1Hz

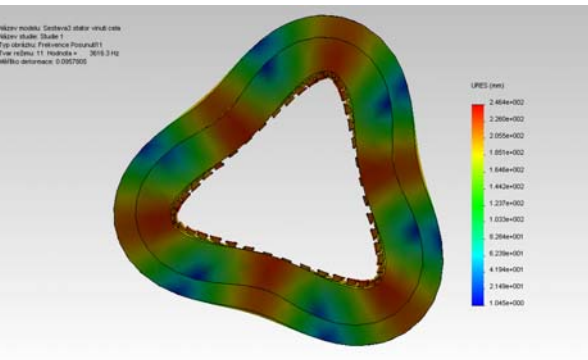


Obr. XXXIX-frekvence 1406,3Hz

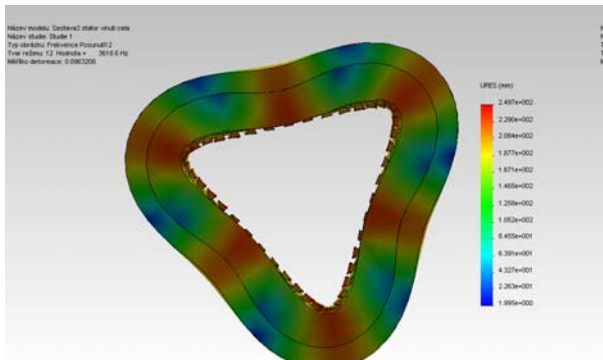
Obr. XL-frekvence 1954,2Hz



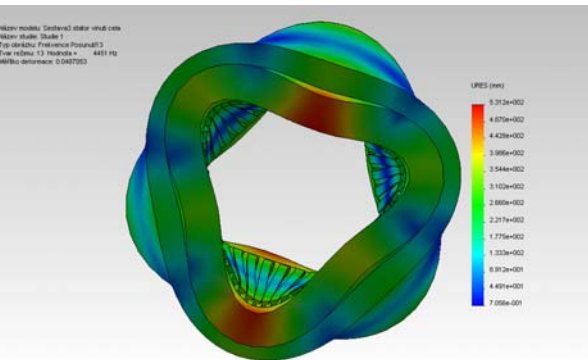
Obr. XLI-frekvence 1955,4Hz



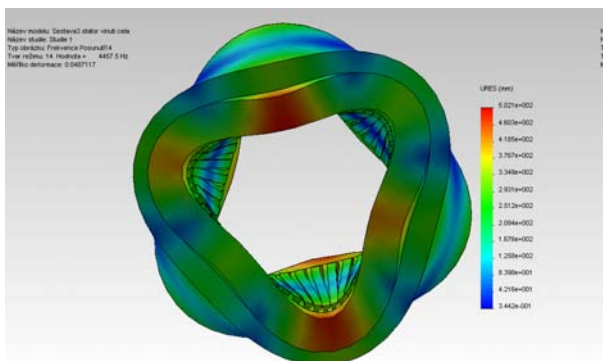
Obr. XLII-frekvence 3616,3Hz



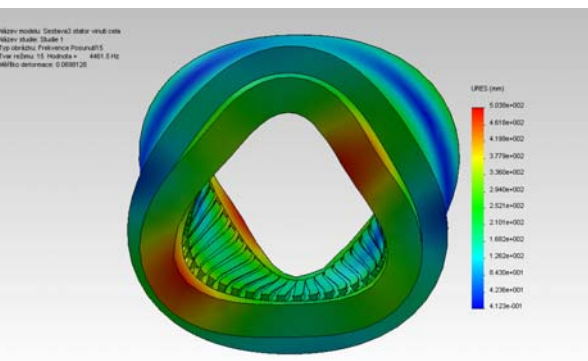
Obr. XLIII-frekvence 3618,6Hz



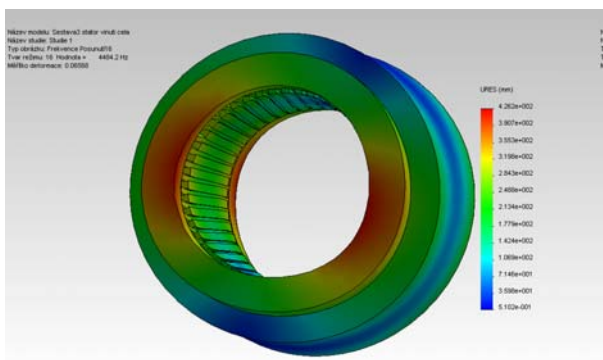
Obr. XLIV-frekvence 4451Hz



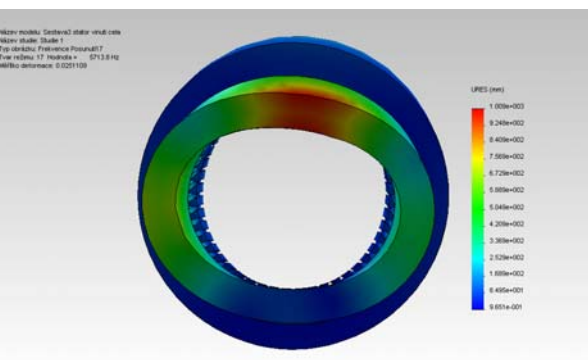
Obr. XLV-frekvence 4457,5Hz



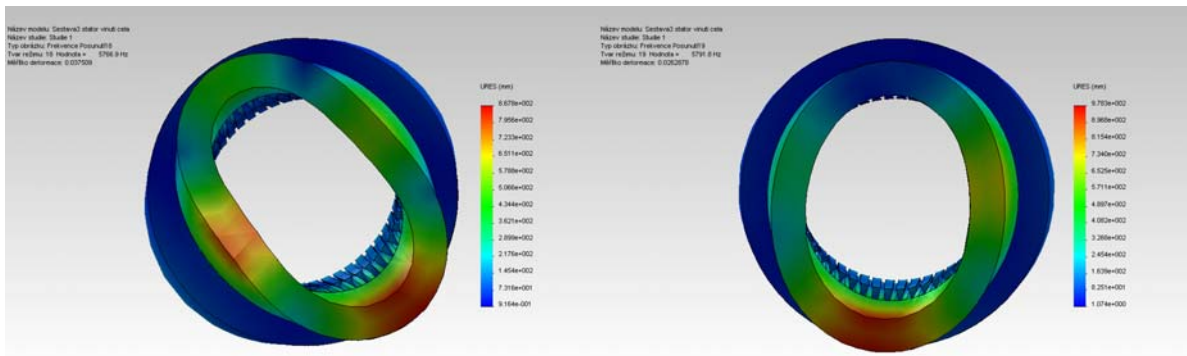
Obr. XLVI-frekvence 4461,5Hz



Obr. XLVII-frekvence 4484,2Hz

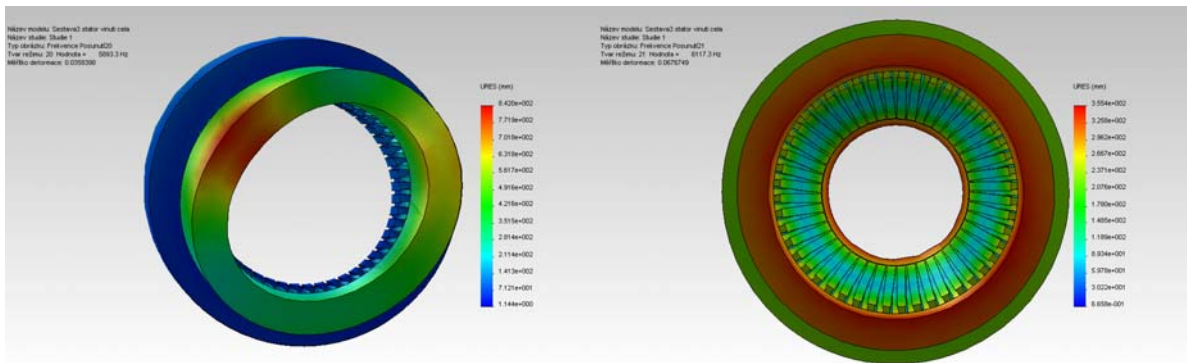


Obr. XLVIII-frekvence 5713,8Hz



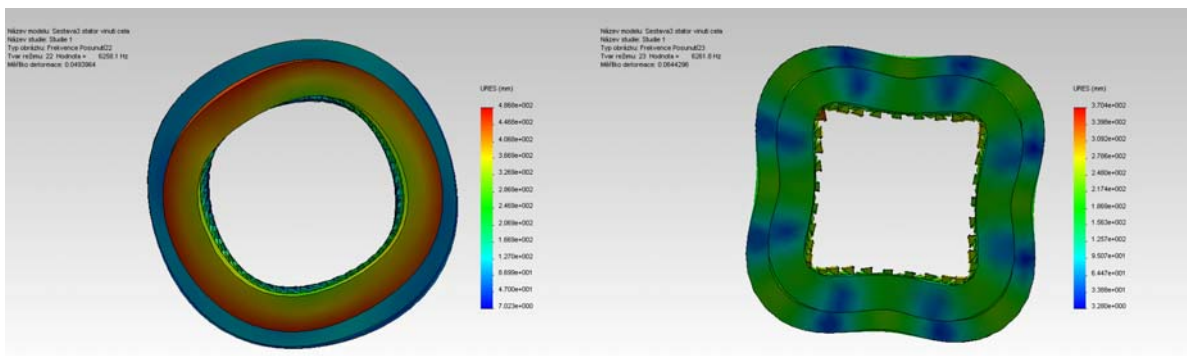
Obr. XLIX-frekvence 5766,9Hz

Obr. L-frekvence 5791,8Hz



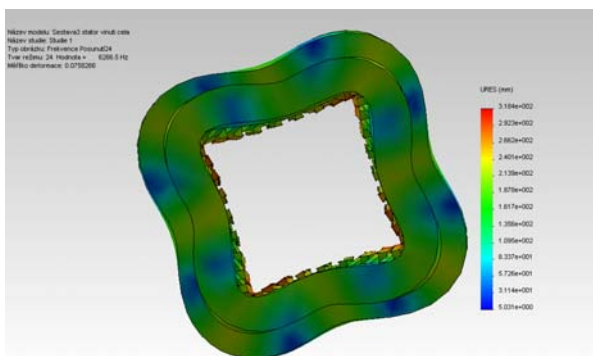
Obr. LI-frekvence 5893,3Hz

Obr. LII-frekvence 6117,3Hz



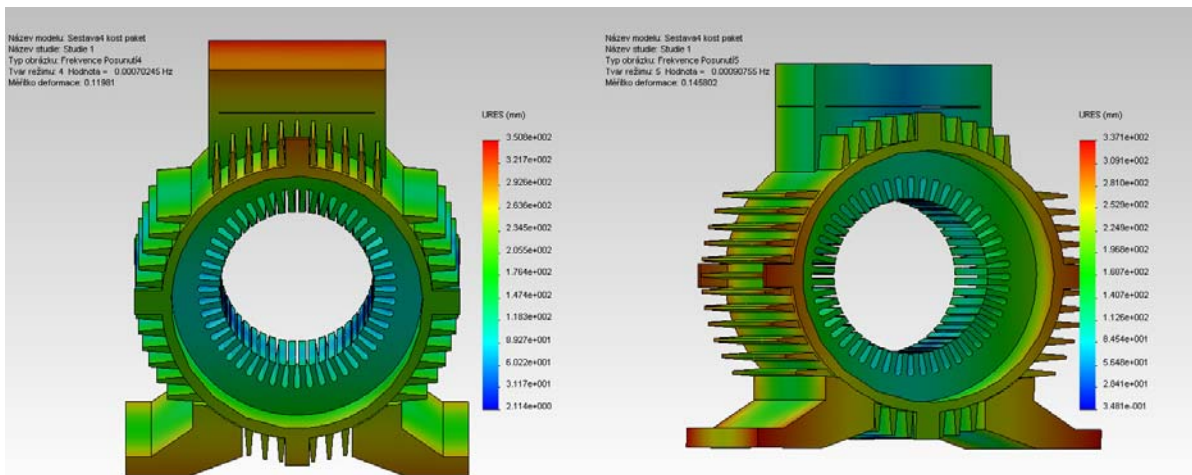
Obr. LIII-frekvence 6258,1Hz

Obr. LIV-frekvence 6261,8Hz



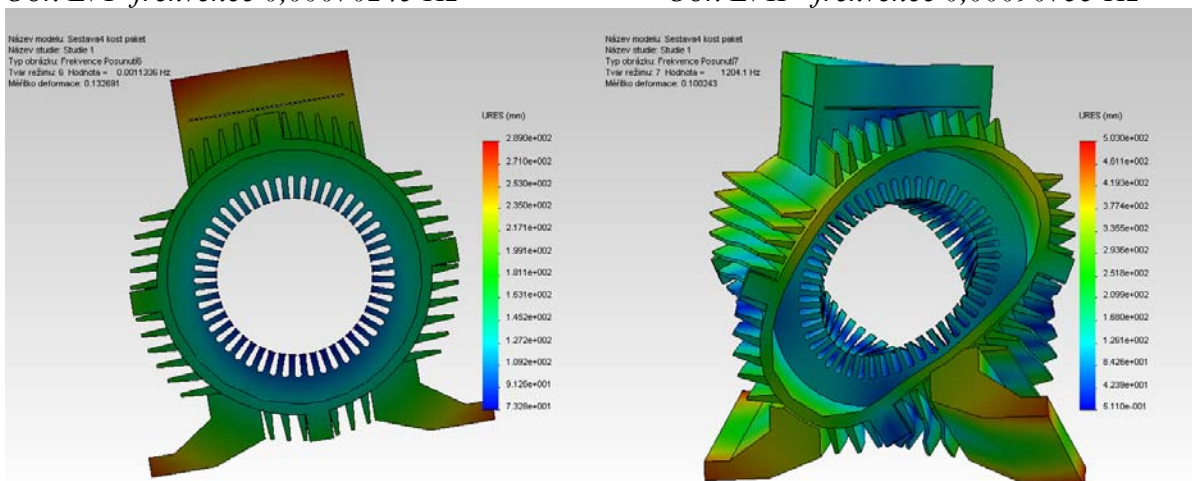
Obr. LV-frekvence 6266,5Hz

Paket statoru v kostře



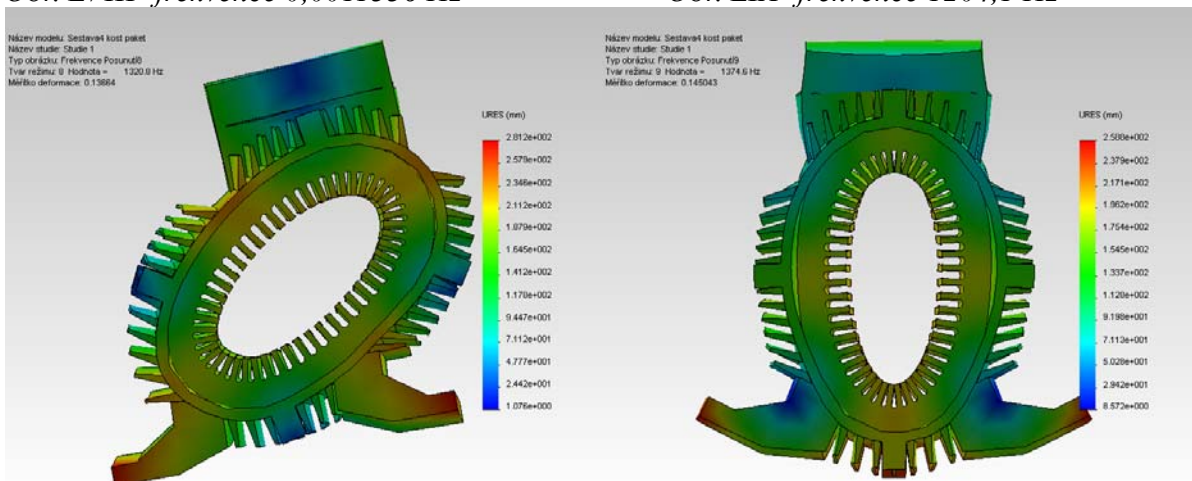
Obr. LVI- frekvence 0,00070245 Hz

Obr. LVII - frekvence 0,00090755 Hz



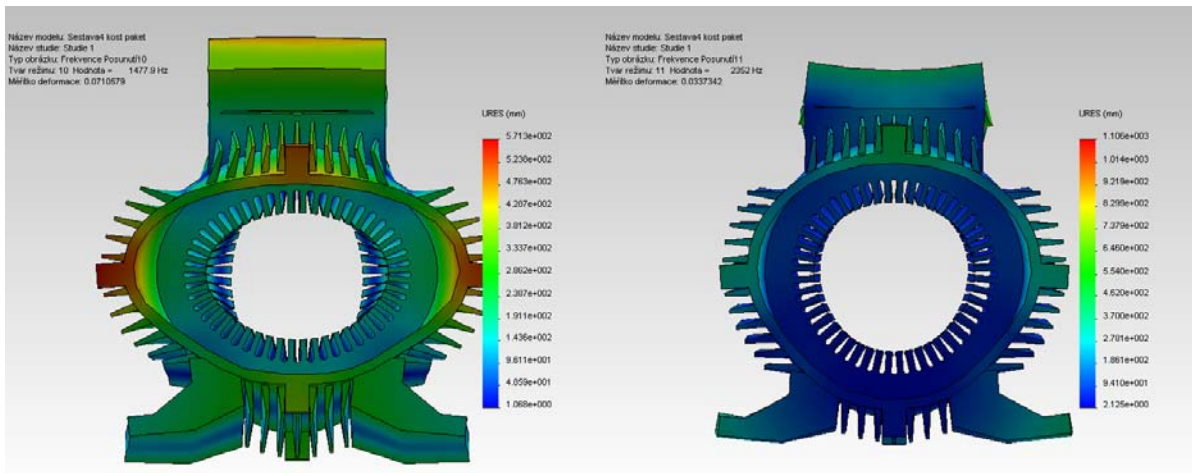
Obr. LVIII- frekvence 0,0011336 Hz

Obr. LIX- frekvence 1204,1 Hz



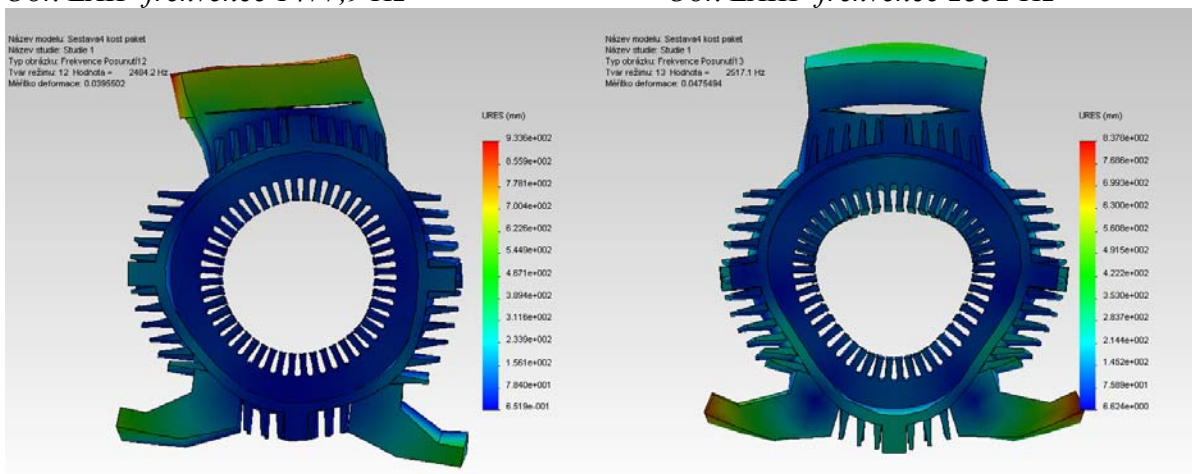
Obr. LX- frekvence 1320,8 Hz

Obr. LXI- frekvence 1374,6 Hz



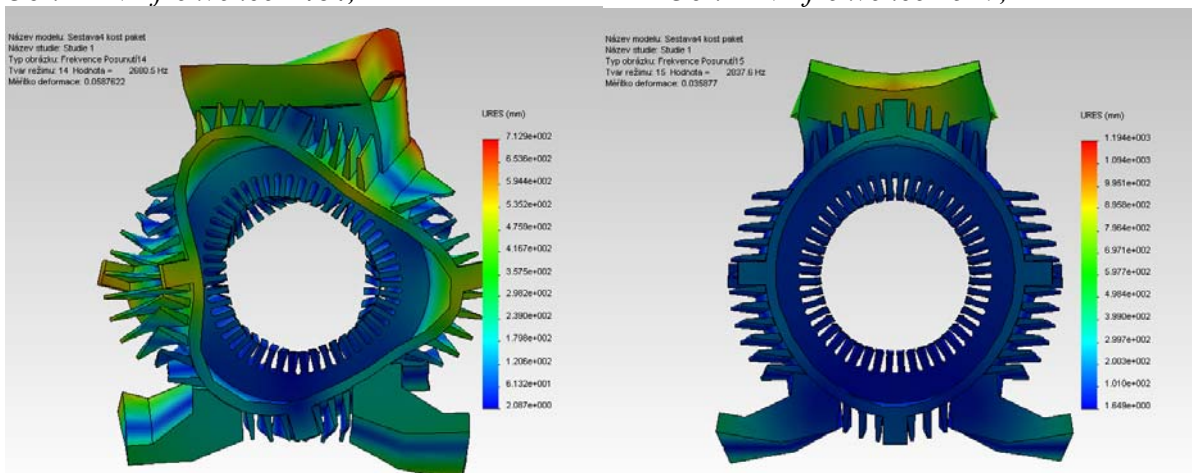
Obr. LXII- frekvence 1477,9 Hz

Obr. LXIII- frekvence 2352 Hz



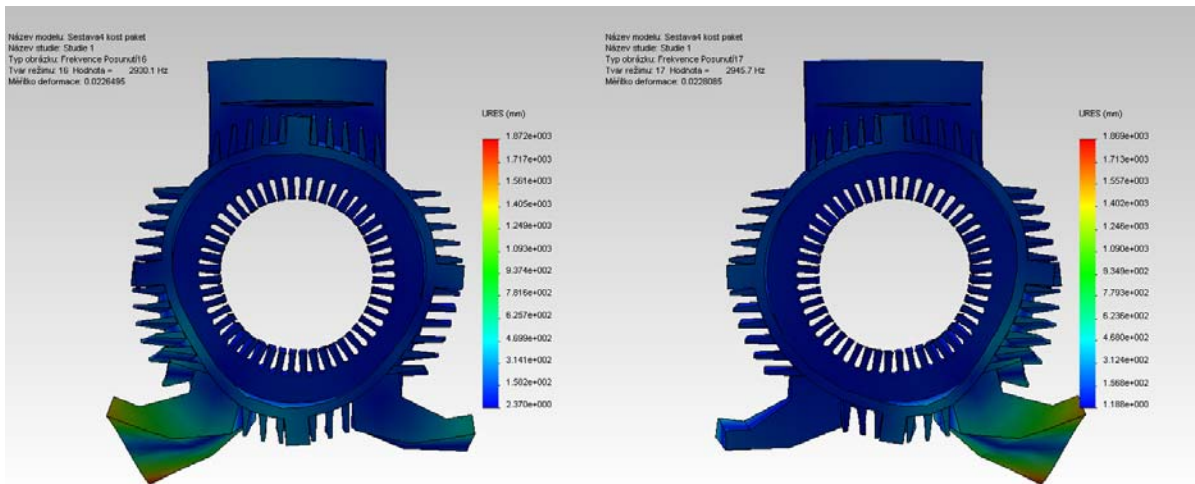
Obr. LXIV- frekvence 2484,2 Hz

Obr. LXV- frekvence 2517,1 Hz



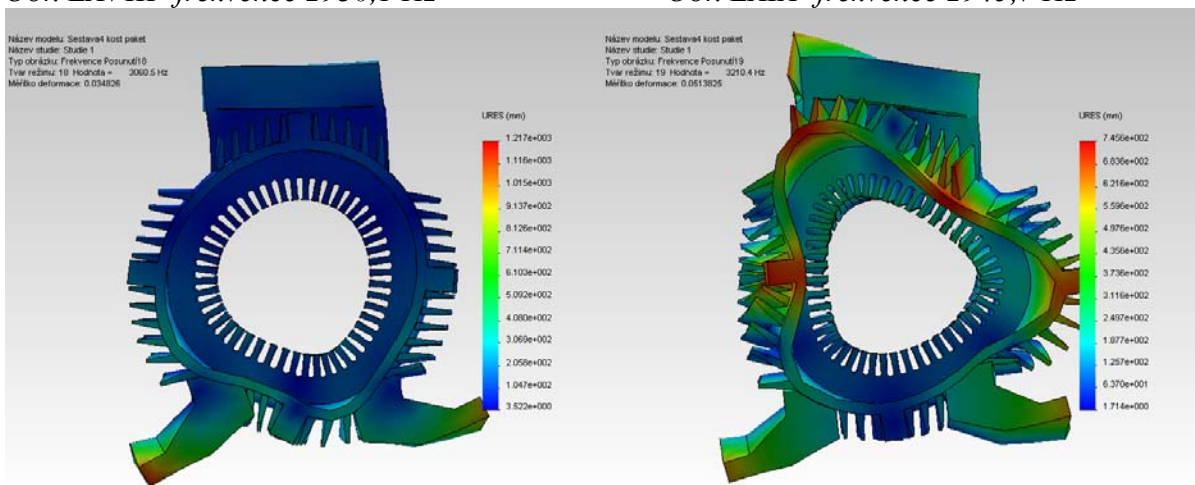
Obr. LXVI- frekvence 2680,5 Hz

Obr. LXVII- frekvence 2837,6 Hz



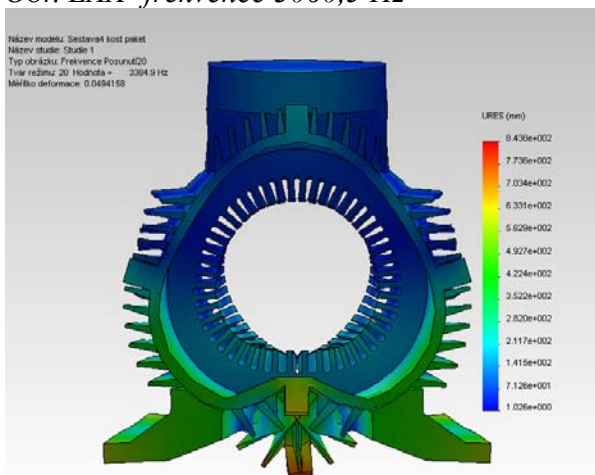
Obr. LXVIII- frekvence 2930,1 Hz

Obr. LXIX- frekvence 2945,7 Hz



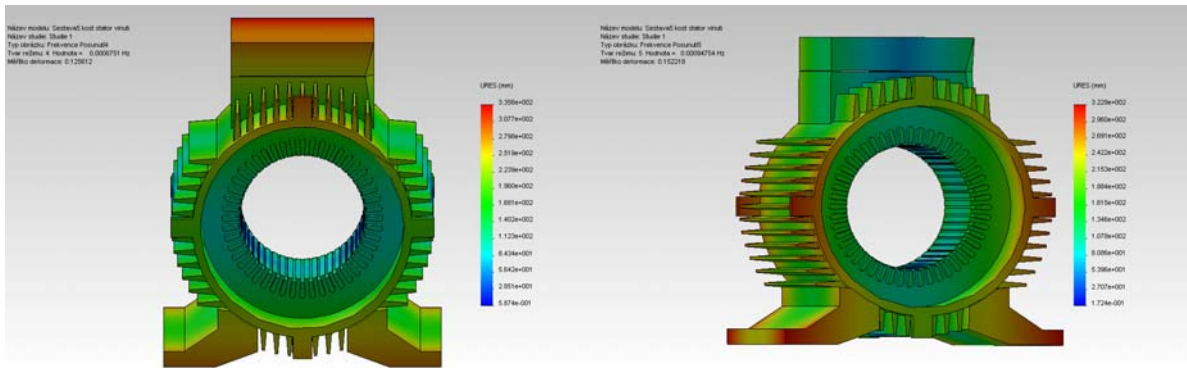
Obr. LXX- frekvence 3060,5 Hz

Obr. LXXI- frekvence 3210,4 Hz



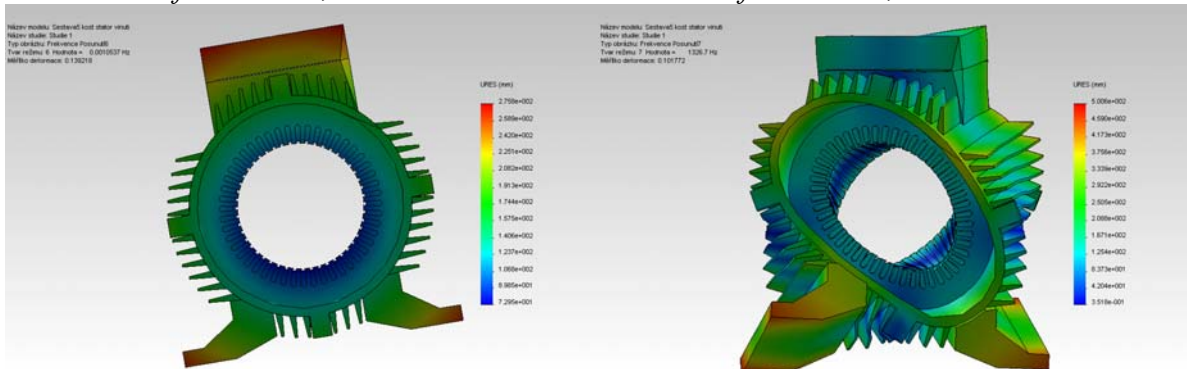
Obr. LXXII- frekvence 3384,9 Hz

Paket statoru s vinutím v kostře



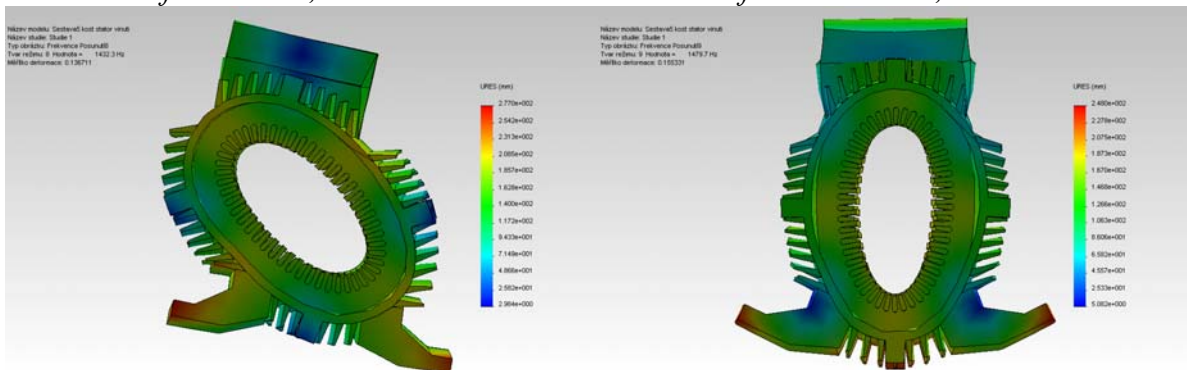
Obr. LXXIII- frekvence 0,0006751 Hz

Obr. LXXIV- frekvence 0,00094754 Hz



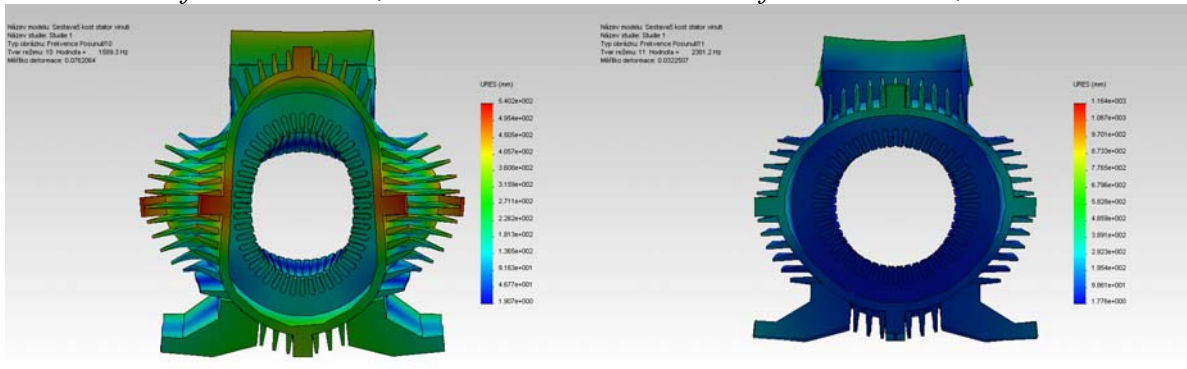
Obr. LXXV- frekvence 0,0010537 Hz

Obr. LXXVI- frekvence 1326,7 Hz



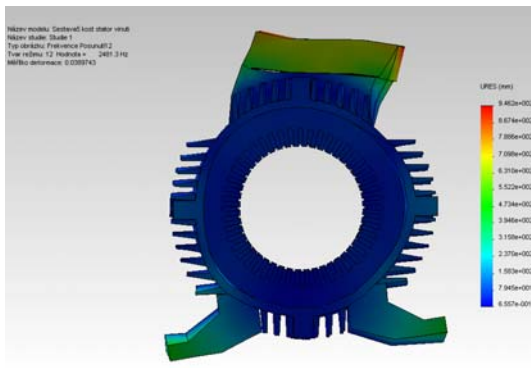
Obr. LXXVII- frekvence 1432,3 Hz

Obr. LXXVIII- frekvence 1479,7 Hz

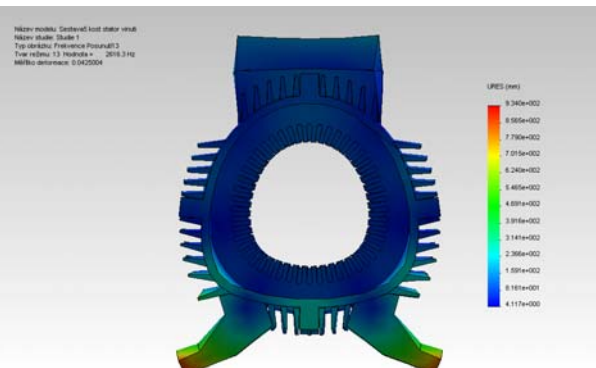


Obr. LXXIX- frekvence 1589,3 Hz

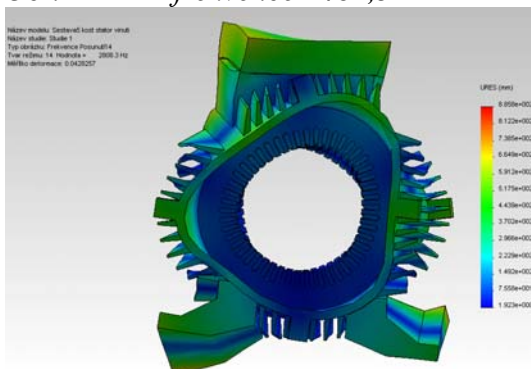
Obr. LXXX- frekvence 2381,2 Hz



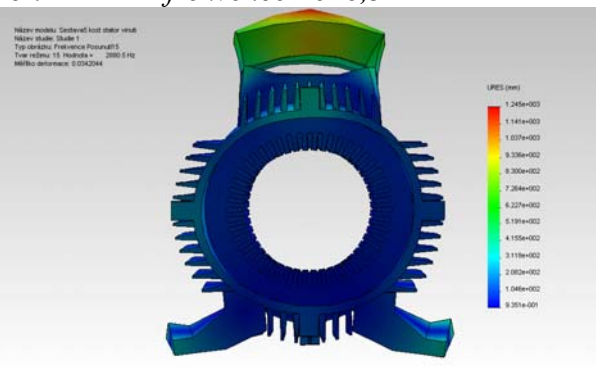
Obr. LXXXI- frekvence 2481,3 Hz



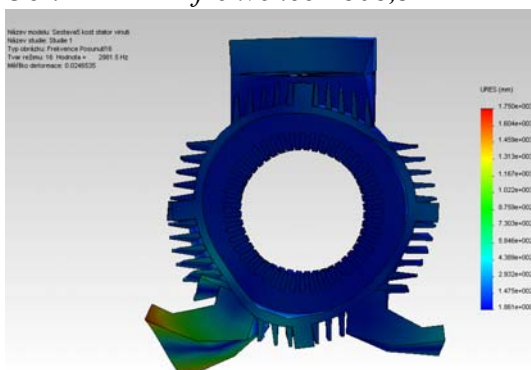
Obr. LXXXII- frekvence 2616,3 Hz



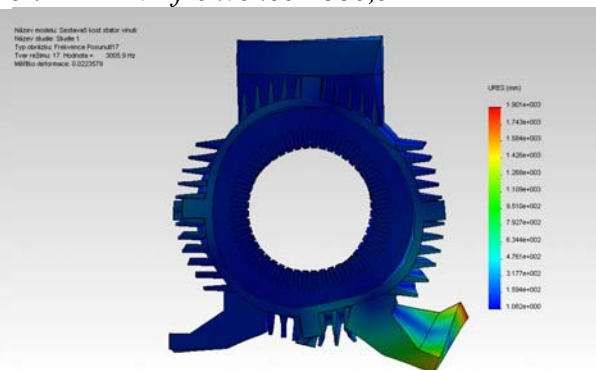
Obr. LXXXIII- frekvence 2808,3 Hz



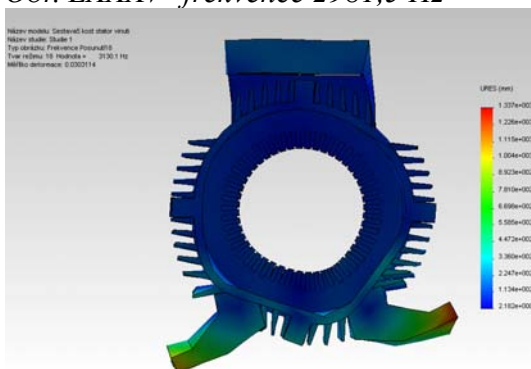
Obr. LXXXIV- frekvence 2880,5 Hz



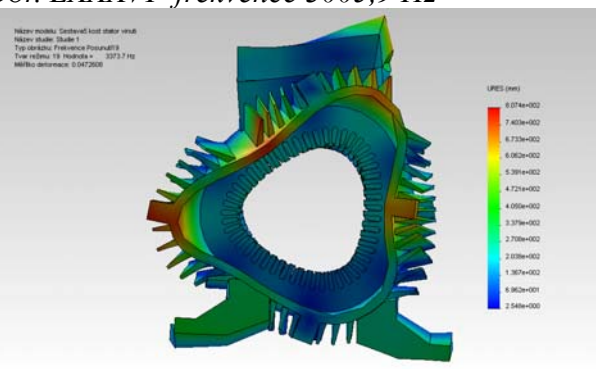
Obr. LXXXV- frekvence 2981,5 Hz



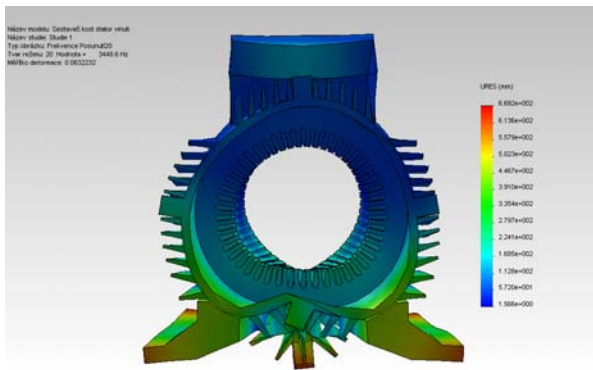
Obr. LXXXVI- frekvence 3005,9 Hz



Obr. LXXXVII- frekvence 3130,1 Hz

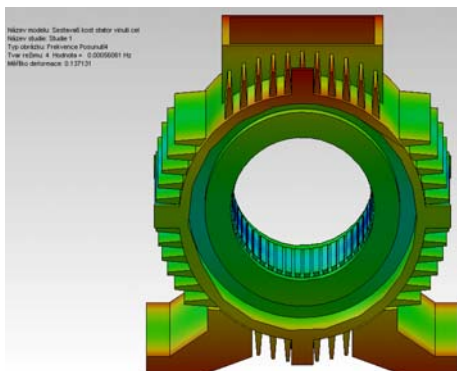


Obr. LXXXVIII- frekvence 3373,7 Hz

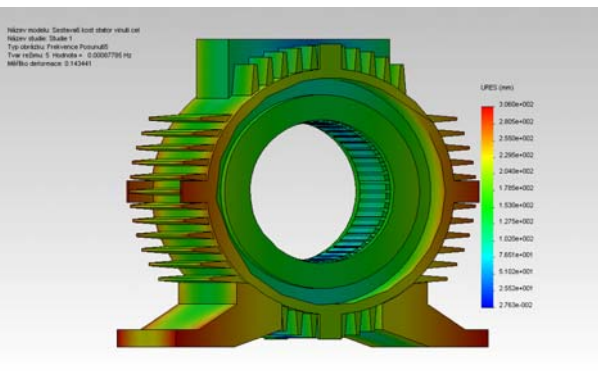


Obr. LXXXIX- frekvence 3448,6 Hz

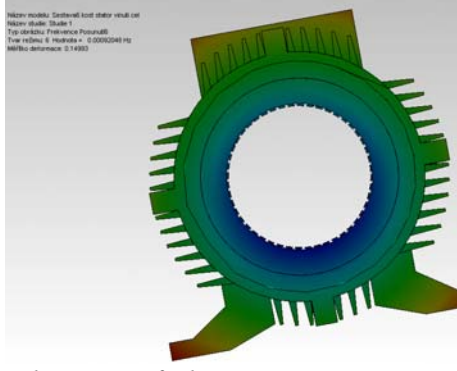
Paket statoru s vinutím a čely v kostře



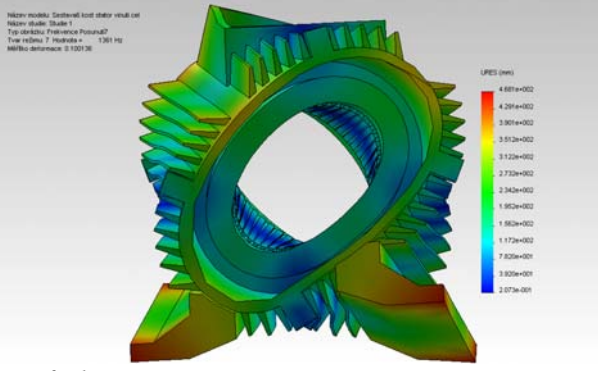
Obr. XC- frekvence 0,00056061 Hz



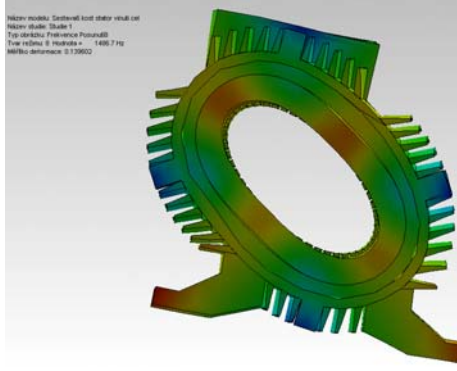
Obr. XCI- frekvence 0,00087785 Hz



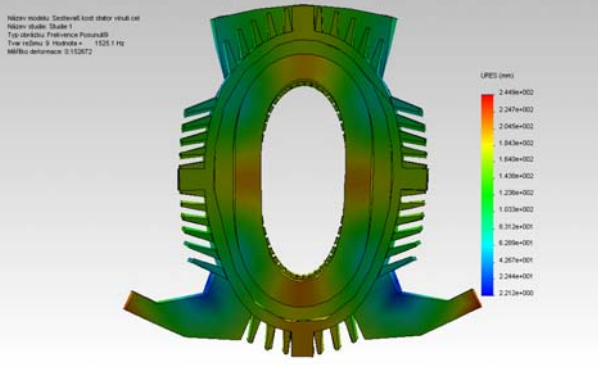
Obr. XCII- frekvence 0,00092048 Hz



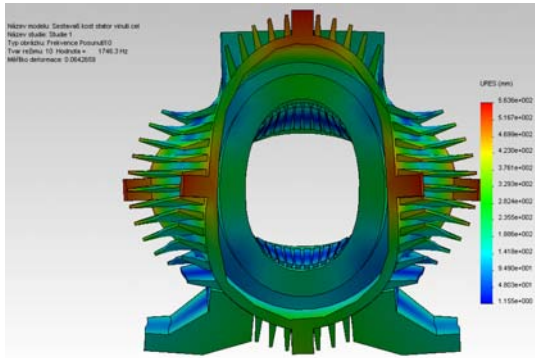
Obr. XCIII- frekvence 1361 Hz



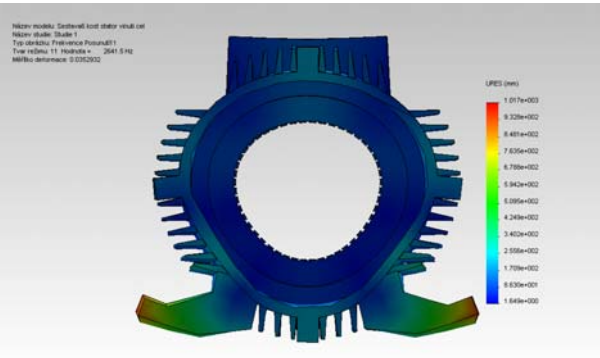
Obr. XCIV- frekvence 1486,7 Hz



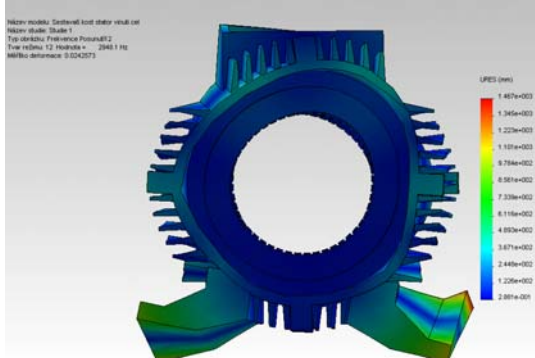
Obr. XCV- frekvence 1525,1 Hz



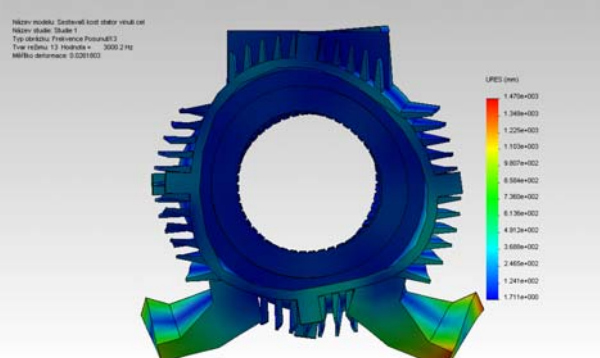
Obr. XCVI- frekvence 1746,3 Hz



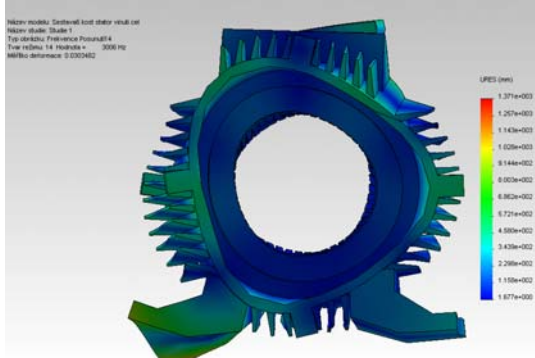
Obr. XCVII- frekvence 2641,5 Hz



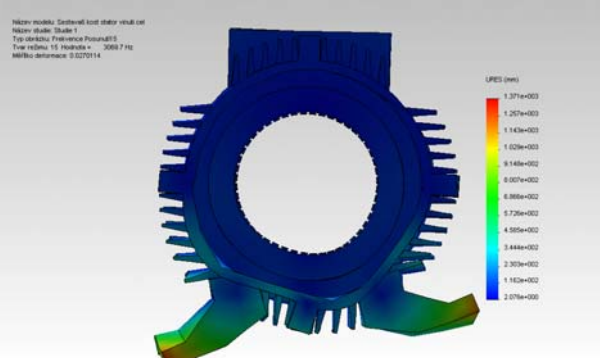
Obr. XCVIII- frekvence 2948,1 Hz



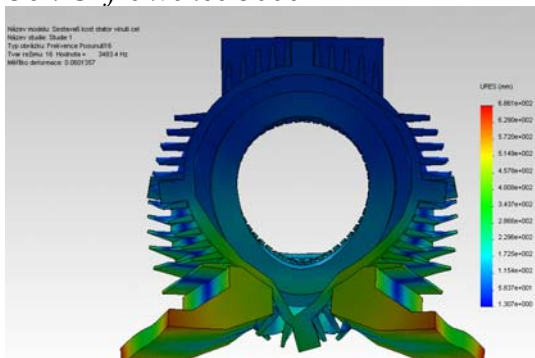
Obr. XCIX- frekvence 3000,2 Hz



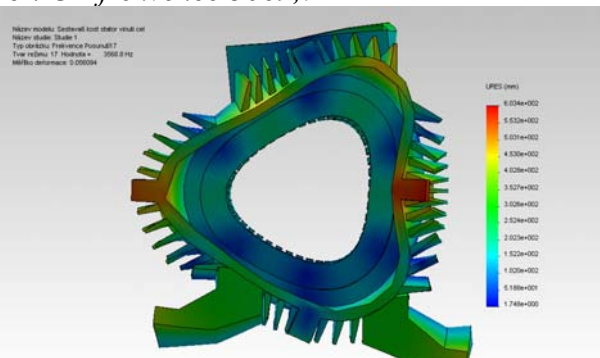
Obr. C- frekvence 3006 Hz



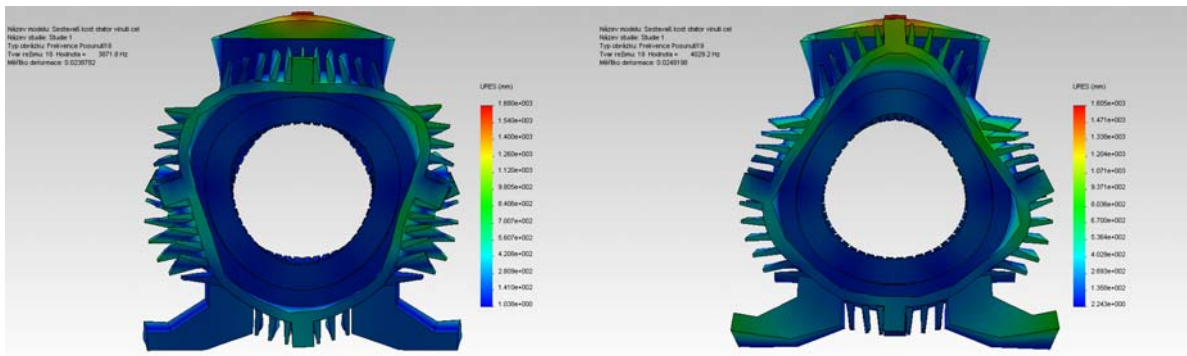
Obr. CI- frekvence 3069,7 Hz



Obr. CII- frekvence 3483,4 Hz

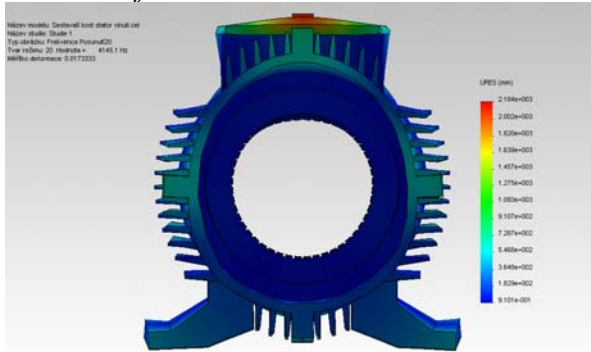


Obr. CIII- frekvence 3568,8 Hz



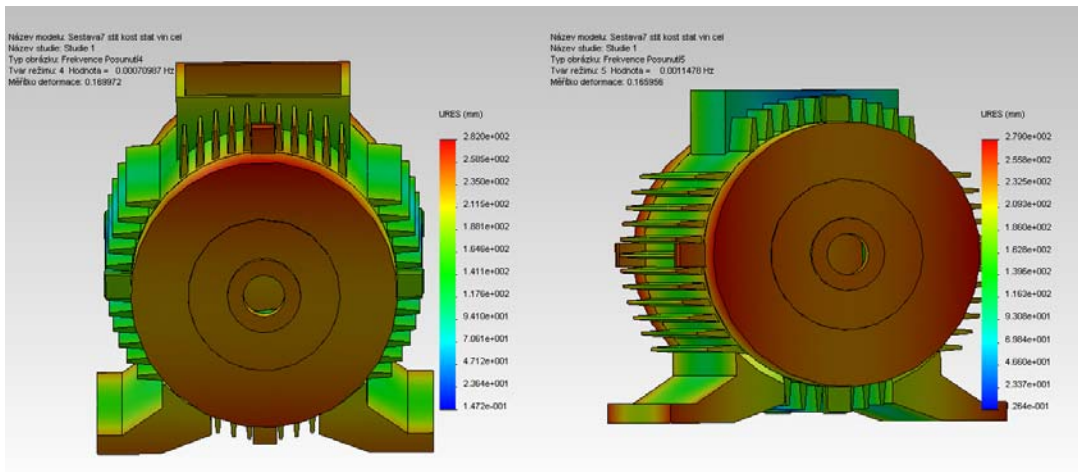
Obr. CIV- frekvence 3871,8 Hz

Obr. CV- frekvence 4029,2 Hz



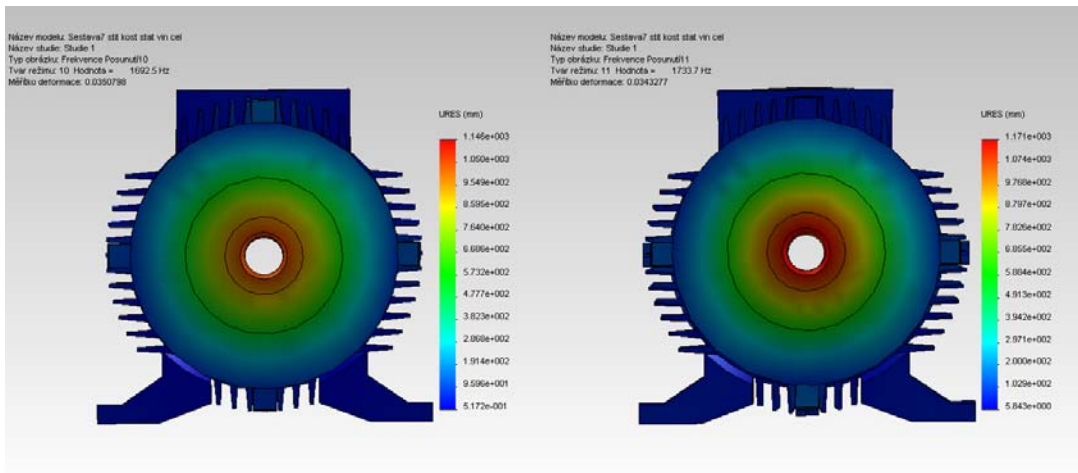
Obr. CVI- frekvence 4145,1 Hz

Paket statoru s vnutím a čely v kostře se štíty



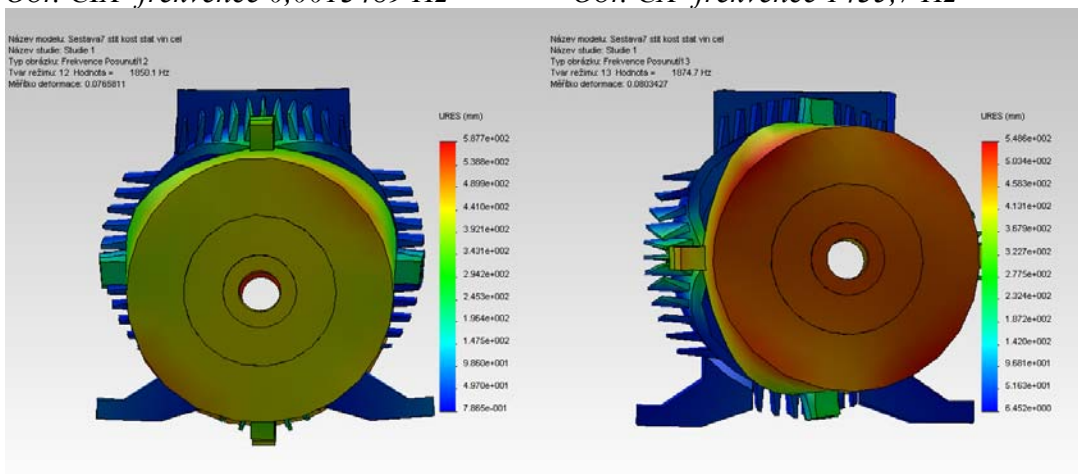
Obr. CVII- frekvence 0,00070987 Hz

Obr. CVIII- frekvence 0,0011478 Hz



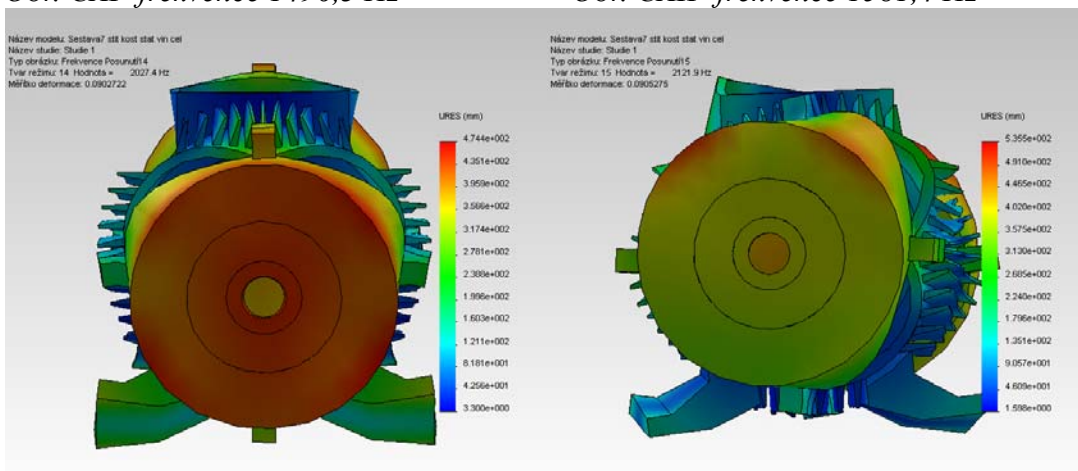
Obr. CIX- frekvence 0,0013489 Hz

Obr. CX- frekvence 1435,7 Hz



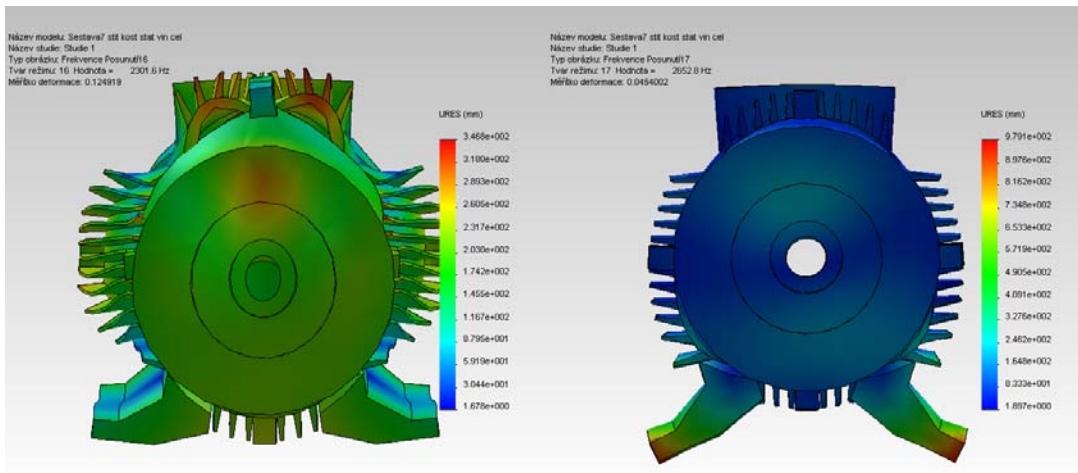
Obr. CXI- frekvence 1496,3 Hz

Obr. CXII- frekvence 1581,4 Hz



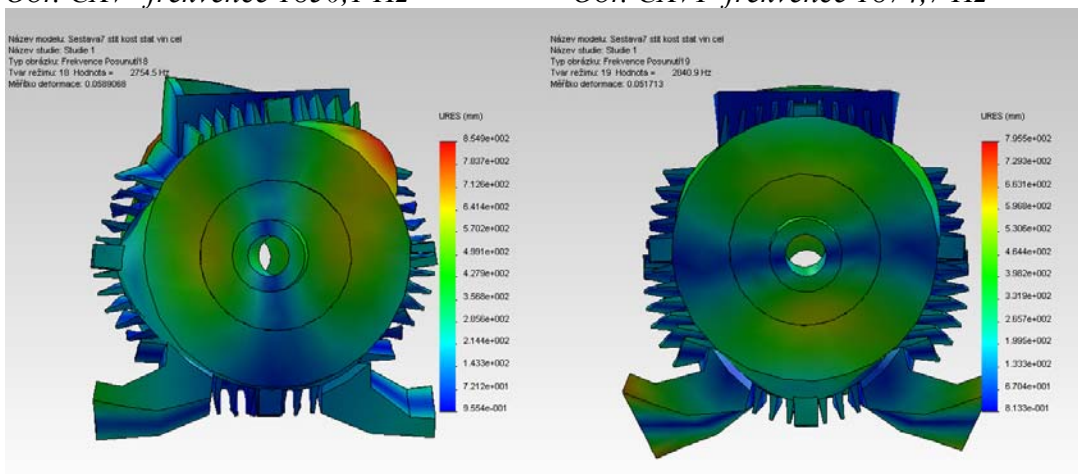
Obr. CXIII- frekvence 1692,5 Hz

Obr. CXIV- frekvence 1733,7 Hz



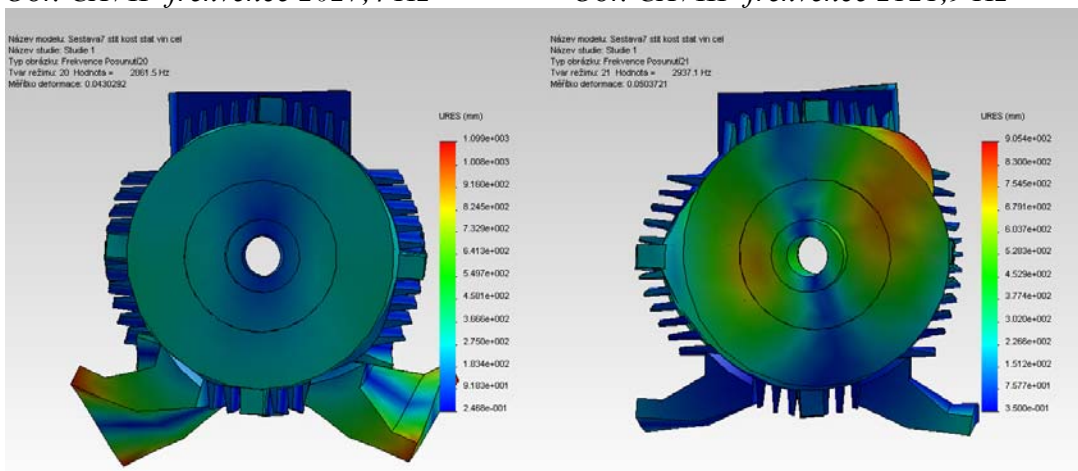
Obr. CXV- frekvence 1850,1 Hz

Obr. CXVI- frekvence 1874,7 Hz



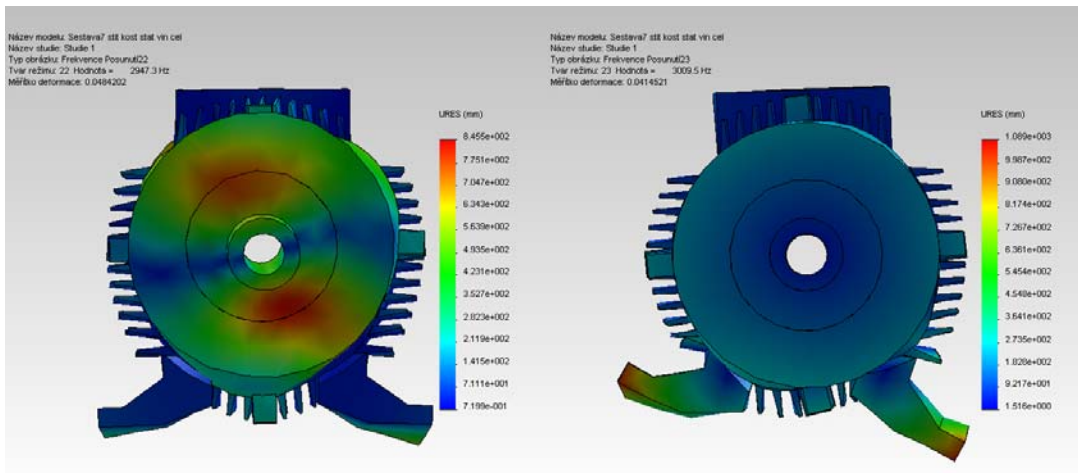
Obr. CXVII- frekvence 2027,4 Hz

Obr. CXVIII- frekvence 2121,9 Hz



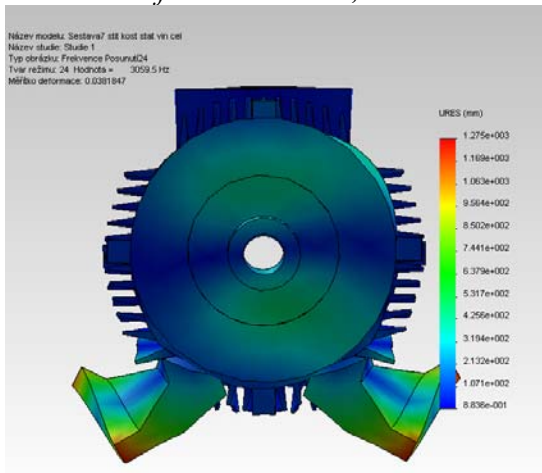
Obr. CXIX- frekvence 2301,6 Hz

Obr. CXX- frekvence 2652,8 Hz



Obr. CXXI- frekvence 2754,5 Hz

Obr. CXXII- frekvence 2840,9 Hz



Obr. CXXIII- frekvence 2861,5 Hz