

**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:

15. října 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

9. května 2013

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

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 9.5.2013

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	8
1. Síly působící na statorové jádro asynchronního stroje	8
1.1 Asynchronní stroj	8
1.2 Chvění	9
1.2.1.1 Elektromagnetické zdroje vibrací	9
1.2.1.2 Mechanické zdroje vibrací	10
1.3 Přeměna energií.....	11
1.4 Radiální síly	11
2. Model asynchronního stroje	14
2.1 Referenční typ motoru	14
2.2 3D model motoru	15
2.3 2D model motoru	15
3. Analýza vlastních frekvencí	16
3.1 Deformace statorového jádra	16
3.1.1 Mód vibrací $r = 0$	16
3.1.2 Mód vibrací $r = 1$	16
3.1.3 Mód vibrací $r = 2, 3, 4$	17
3.2 Frekvence a řády magnetických tlaků.....	17
3.3 Jednotlivé části a soubory podrobené analýze	18
3.1.1 Statorové jádro	18
3.1.2 Statorové jádro s vodiči v drážkách	19
3.1.3 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí	21
3.1.4 Statorové jádro vložené v kostře	22
3.1.5 Statorové jádro s vodiči v drážkách vložené v kostře	23
3.1.6 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí vložené v kostře	24
3.1.6 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí vložené v kostře se štíty	25
4. Vliv konstrukčních částí asynchronního stroje na jeho vlastní frekvence	25
4.1 Porovnání	25
Závěr	25
Seznam použité literatury	26
Přílohová část	27

Úvod

Asynchronní stroje, jsou nejpoužívanější stroje v průmyslu. Jsou vyráběny v rozličných škálách velikostí, provedení, výkonů, atd. Pokud nastane v točivém stroji chvění, je pravděpodobné, že pokud se toto chvění zanedbá, může dojít ke zničení stroje nebo zařízení, které je jím poháněno. Řešení chvění, je proto z tohoto důvodu velice důležité.

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 vinutí, 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, obvykle menší než 1 mm pro moderní indukční motory s malým a středním výkonem.

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.

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.

Statorové pole se otáčí synchronní rychlostí:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad [1]$$

kde f je frekvence proudu a p je počet pólpárů.

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 (vibrace) je omezený vratný pohyb částice z 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 a hluk produkované elektrickými stroji lze rozdělit do dvou kategorií:

- Elektromagnetické vibrace spojené s parazitními jevy v důsledku vyšších prostorových a časových harmonických, excentricity, fázové nesymetrie, drážek, magnetického sycení a magnetostrikční expanze jádrových plechů
- mechanické vibrace spojené s mechanickými částmi, zejména vlivem ložisek

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:

$$B_{m1} = \cos(\omega_1 t + k\alpha + \varphi_1) \quad [3]$$

a rotor produkuje magnetickou indukci:

$$B_{m2} = \cos(\omega_2 t + l\alpha + \varphi_2) \quad [4]$$

pak kombinací těchto rovnic vznikne:

$$0,5 \cdot B_{m1} \cdot B_{m2} \cdot \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (k+l)\alpha + (\varphi_1 + \varphi_2)] \\ + 0,5 \cdot B_{m1} \cdot B_{m2} \cdot \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (k-l)\alpha + (\varphi_1 - \varphi_2)] \quad [5]$$

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 [3] je přímo úměrný magnetické rázové vlně ve vzduchové mezeře s amplitudou:

$$P_{mr} = 0,5 \cdot B_{m1} \cdot B_{m2} \quad [6]$$

úhlovou frekvencí:

$$\omega_r = \omega_1 \pm \omega_2 \quad [7]$$

řádem:

$$r = k \pm l \quad [8]$$

a fází:

$$\varphi_1 \pm \varphi_2 \quad [9]$$

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

Drážky, rozložení vinutí v drážkách, vstupní proud, zkruslení průběhu proudu, kolísání prostupu vzduchovou mezerou, excentricita rotoru, a fázové nesymetrie vedou k mechanické deformaci a vibracím. Magnetomotorická síla prostorových, časových a drážkových harmonických, harmonických excentricity a harmonických sycení, produkují vyšší harmonické síly a momenty. Zvláště radiální síly ve střídavých strojích, které působí na stator i rotor, deformují magnetický obvod.

Konstrukce kostry statoru je primárním zářičem vibrací stroje. Je-li frekvence radiální síly blízká nebo rovná některé z přirozených frekvencí kostry statoru, tak nastane rezonance. Ta vede k deformaci statoru a vibracím.

V motorech napájených měniči, jsou parazitní oscilační momenty 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 jiný 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.. Rotor by měl být přesně vyvážený pro výrazné snížení vibrací. 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 $[C]$ maticí pro laminované materiály, fyzikálními vlastnostmi materiálů, a chybami ve výpočtu magnetických sil.

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.

pro stator:

$$F_1(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \cdot \cos(vp\alpha \pm \omega t) \quad [11]$$

Pro rotor:

$$F_2(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{m\mu} \cdot \cos(\mu p \alpha \pm \omega_{\mu} t + \varphi_{\mu}) \quad [12]$$

Kde α je úhlová vzdálenost od počátku souřadného systému, p je počet pólpárů, φ_{μ} je úhel mezi vektory statoru a rotoru harmonických stejného pořadí, v a μ jsou počty prostorových harmonických statoru a rotoru v příslušném pořadí, $\omega = 2\pi f$ je pulsace vstupního proudu a F_{mv} a $F_{m\mu}$ jsou maximální hodnoty v -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:

$$b(\alpha, t) = [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)] \cdot \Lambda_g(\alpha, t) = b_1(\alpha, t) + b_2(\alpha, t) \quad [13]$$

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

Platí pro stator:

$$b_1(\alpha, t) = F_1(\alpha, t) \cdot \Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} B_{mv} \cdot \cos(vp\alpha \pm \omega t) \quad [14]$$

a pro rotor:

$$b_2(\alpha, t) = F_2(\alpha, t) \cdot \Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{m\mu} \cdot \cos(\mu p\alpha \pm \omega_\mu t + \varphi_\mu) \quad [15]$$

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

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

Vzhledem k tomu, že magnetická permeabilita feromagnetického jádra je mnohem vyšší, než vzduchové mezery, čáry magnetického toku jsou 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 $b(\alpha, t)$ a platí:

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

K dispozici jsou tři skupiny z nekonečného množství vln radiálních sil:

a) $[b_1(\alpha, t)]^2$ harmonických statoru se stejným počtem v , tj.

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

b) Kombinace $b_1(\alpha, t)$ a $b_2(\alpha, t)$ harmonických statoru v a rotoru μ

$$\begin{aligned} p_{rv\mu}(\alpha, t) &= \frac{2B_{mv} \cdot \cos(vp\alpha \pm \omega t) \cdot B_{m\mu} \cdot \cos(\mu p\alpha \pm \omega_\mu t + \varphi_\mu)}{2\mu_0} = \\ &\frac{1}{2\mu_0} \cdot B_{mv} \cdot B_{m\mu} \cos[(vp\alpha \pm \omega t) - (\mu p\alpha \pm \omega_\mu t + \varphi_\mu)] + \\ &[(vp\alpha \pm \omega t) - (\mu p\alpha \pm \omega_\mu t + \varphi_\mu)] = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2\mu_0} \cdot B_{mv} \cdot B_{m\mu} \cos[p\alpha \cdot (v - \mu) \pm (\omega - \omega_\mu) \cdot t - \varphi_\mu] + \cos[p\alpha \cdot (v + \mu) \pm (\omega + \omega_\mu) \cdot t + \varphi_\mu] \quad [19]$$

c) $[b_1(\alpha, t)]^2$ harmonických rotoru se stejným počtem μ

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

Konstanty rovné $\frac{B_{mv}^2}{4\mu_0}$ a $\frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0}$ v rovnicích 18 a 20 nemají žádný význam pro vibrace a lze je zanedbat, protože statický magnetický tlak je rovnoměrně rozmístěn podél vzduchové mezery.

V souladu s rovnicemi a b c magnetické síly na jednotku plochy může být vyjádřena následující obecná rovnice:

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

kde P_{mr} je amplituda magnetického tlaku, ω_r je úhlová frekvence a $r = 0, 1, 2, 3, \dots$ 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

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

- vybuzení statorových v a rotorových harmonických μ

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

- vybuzení rotorových harmonických stejného řádu μ

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

Chceme-li získat amplitudu radiální síly, musíme vynásobit amplitudu magnetického tlaku $P_{mr} \pi$, 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 musel být vytvořen 3D model asynchronního stroje, aby mohla být provedena analýza vlastních frekvencí jednotlivých částí stroje. Model byl vytvářen v programu SolidWorks, který posléze posloužil jako analyzátor 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:

$P_n=11\text{kW}$

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

$I_n=21.5\text{A}$

$M_n=72\text{Nm}$

$n_n=1460\text{rpm}$

$\cos \varphi_i=0.84$

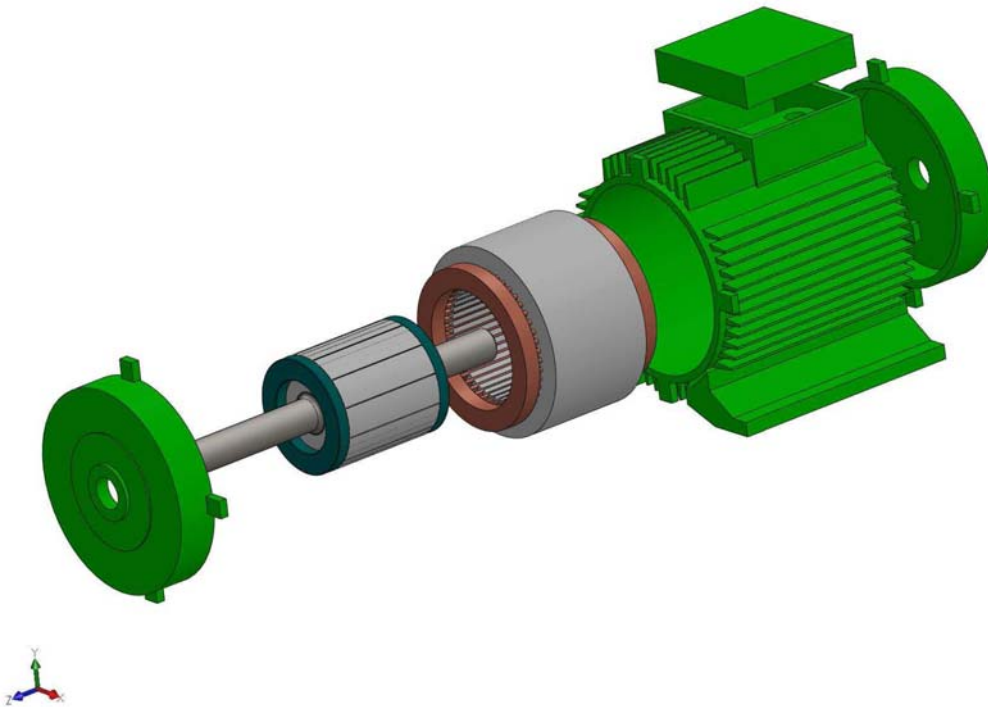
$\eta=88.5\%$

$I_{záb}=136\text{A}$

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 B3

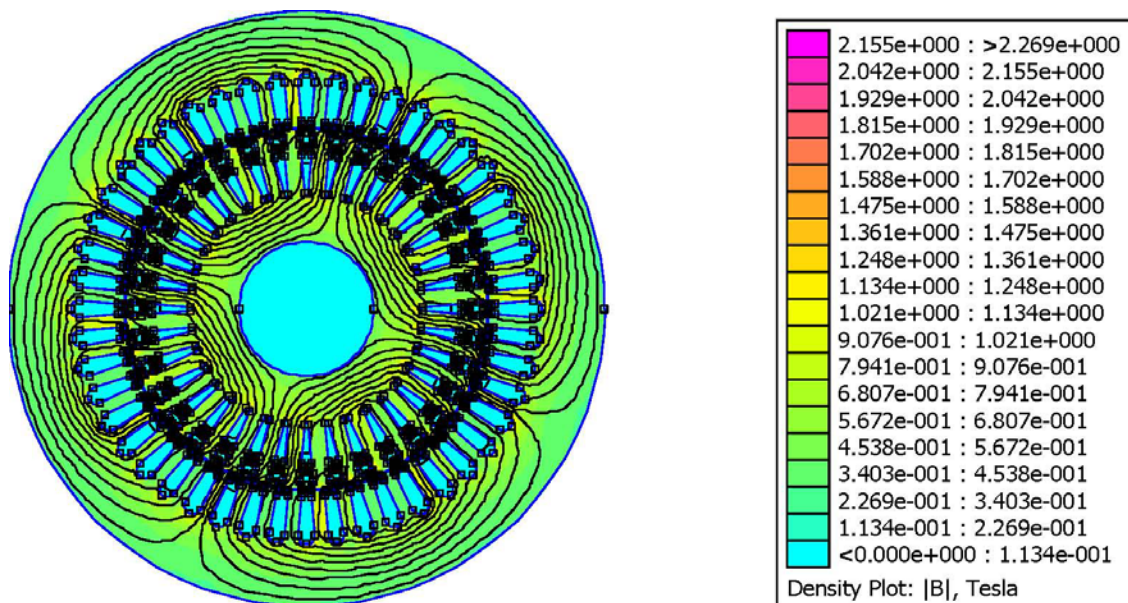
2.2 3D model motoru



Obr. 1. - 3D model asynchronního motoru

2.3 2D model motoru

V rámci této práce byl vytvořen i 2D model motoru. Jedná se o satorový a rotorový plech, který byl analyzován pomocí nástroje FEMM.



Obr. 2. - 2D model asynchronního motoru (magnetický tok)

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.

$$\Delta d \propto \frac{1}{r^4} \quad [25]$$

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

K největší deformaci j_{ha} statoru dochází při frekvenci fr , 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.

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

Rovnice popisuje interference dvou vln magnetické indukce o stejných délkách (stejných počtech pólových párů) 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.

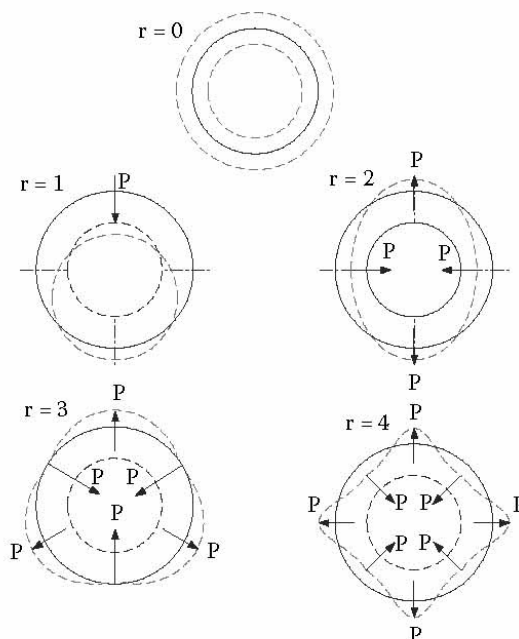
3.1.2 Mód vibrací $r = 1$

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.

$$p_1 = P_{mr=1} \cdot \cos(\alpha - \omega_1 t) \quad [27]$$

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.



Na obrázku jsou patrné 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

$$\omega_r = 2\omega_\mu \quad f_r = 2f_\mu \quad r = 2\mu p \quad [30]$$

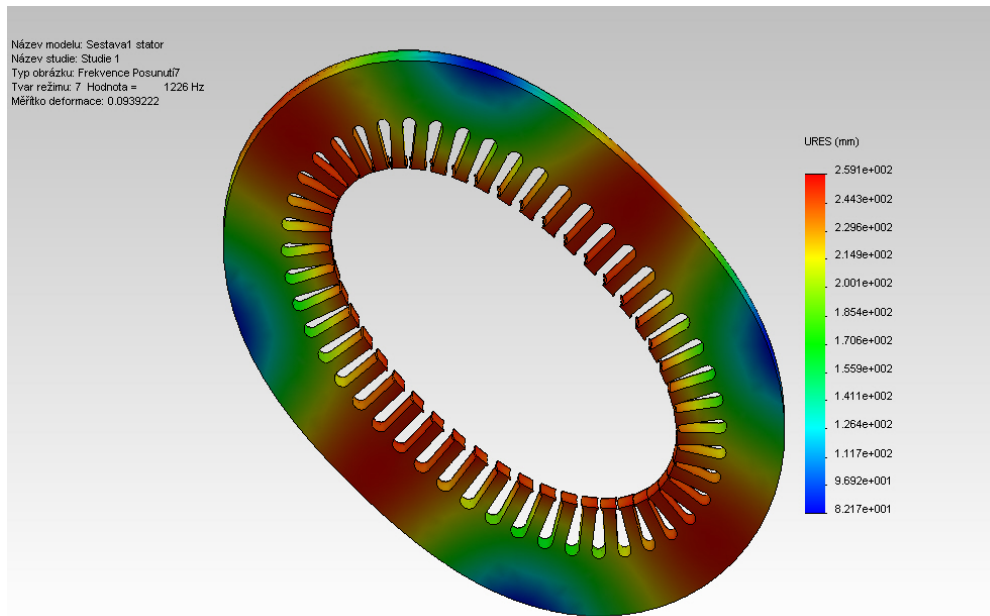
Pro základní prostorové harmonické $v = 1$ je frekvence radiálního magnetického tlaku a řád (obvodový vibrační mód) podle vzorce 28. Rotační součásti se dvěma pólpáry a frekvencí $2f$, mohou způsobit značné vibrace. Zejména u velkých strojů s $B_{mv} = 1 = 0,8T$ je velikost radiálního magnetického tlaku roven $127,4 \text{ kN/m}^2$. I pro vyšší prostorové harmonické $v > 1$ platí stále vzorec 28.

3.3 Jednotlivé části a soubory podrobené analýze

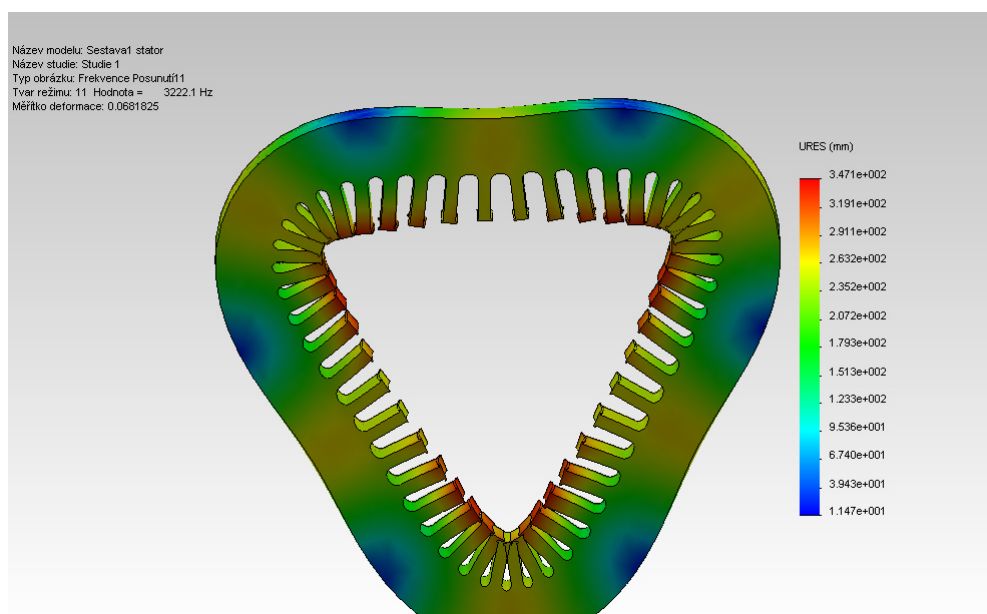
Jelikož je výčet všech vlastních tvarů a frekvencí nepřehledný, jsou v této části zahrnuty pouze základní tvary analyzovaných prvků. Další tvary a frekvence jsou v příloze.

3.1.1 Statorové jádro

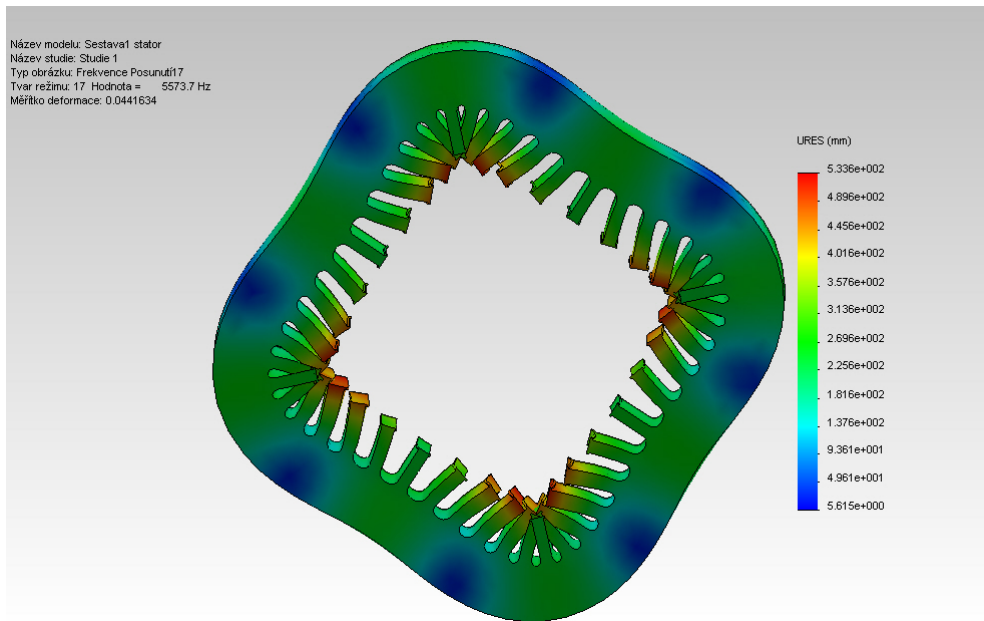
Jako první bylo analýze podrobena statorové jádro.



Obr.4. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1226Hz



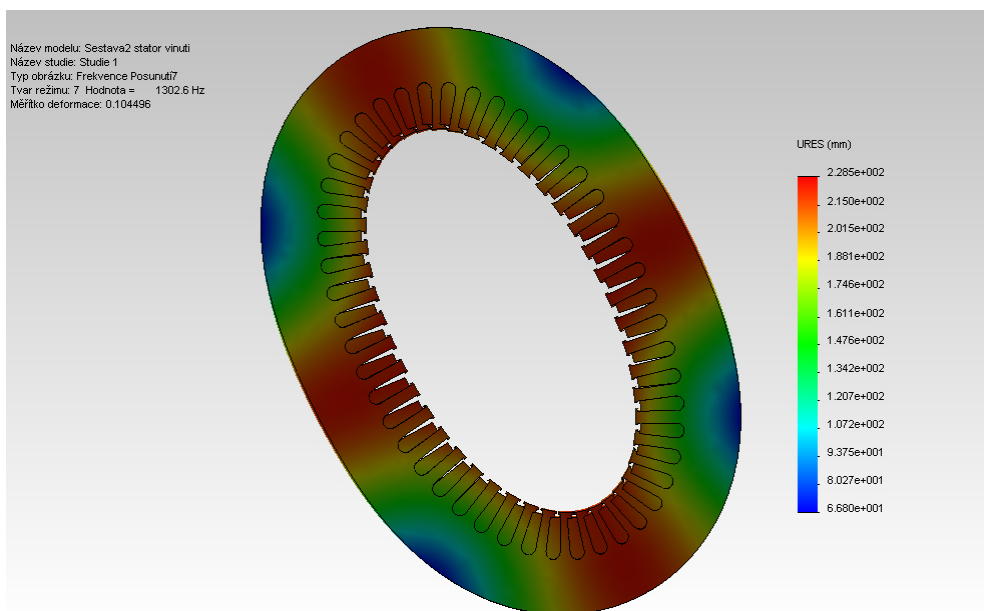
Obr.5. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3222,1Hz



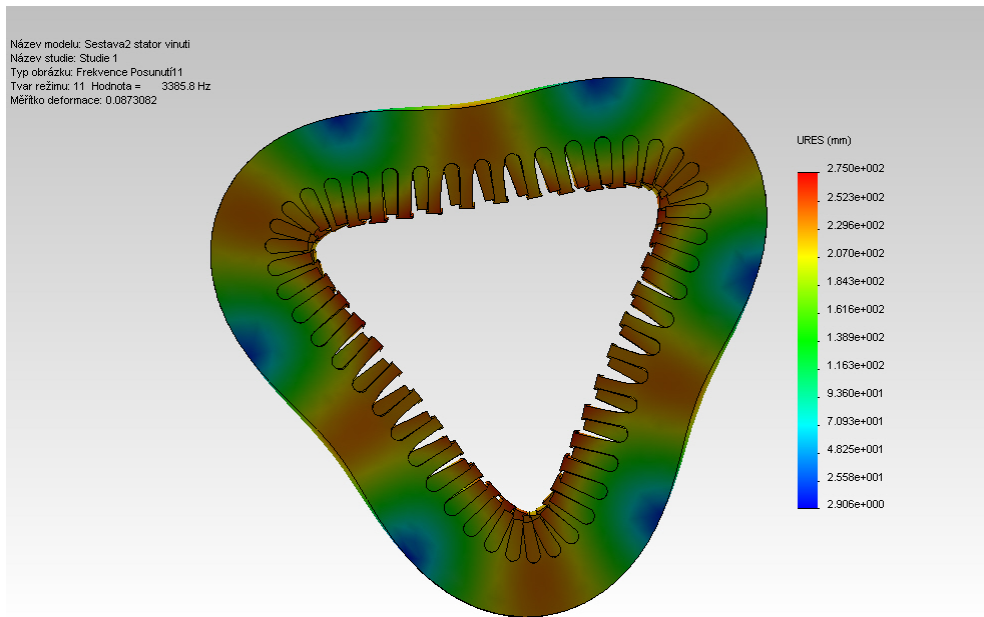
Obr.6. – Deformace pro $r=4$ při frekvenci 5573,7 Hz

3.1.2 Statorové jádro s vodiči v drážkách

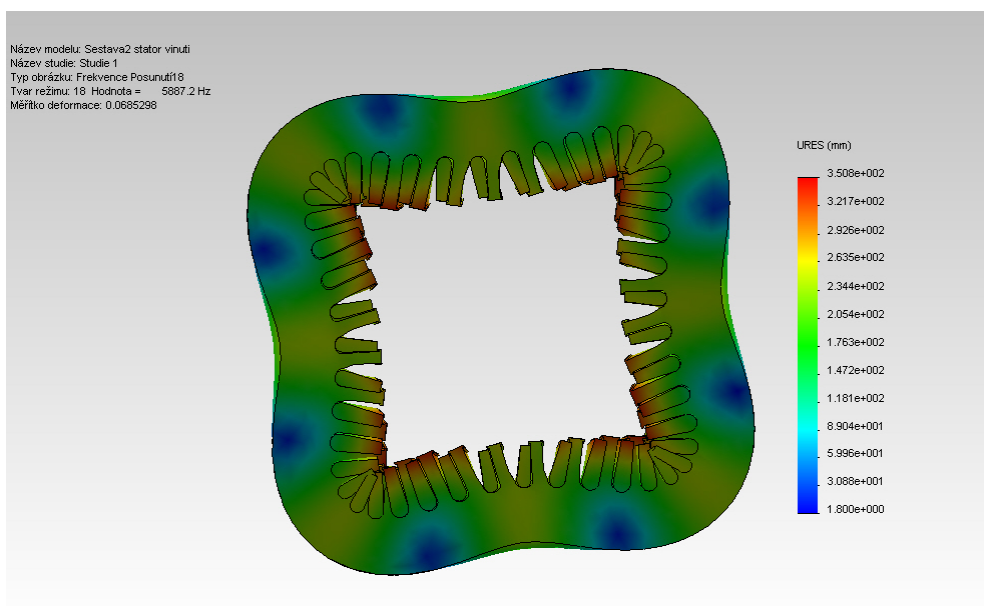
Jako další byla provedena analýza statorového jádra s vodiči v drážkách.



Obr.7. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1302,6 Hz



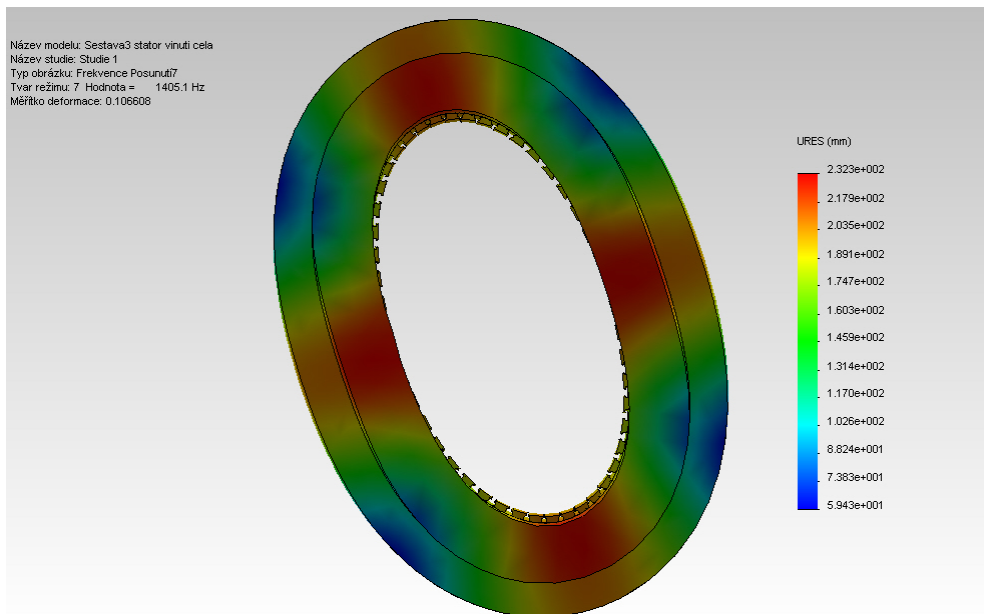
Obr.8. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3385,8Hz



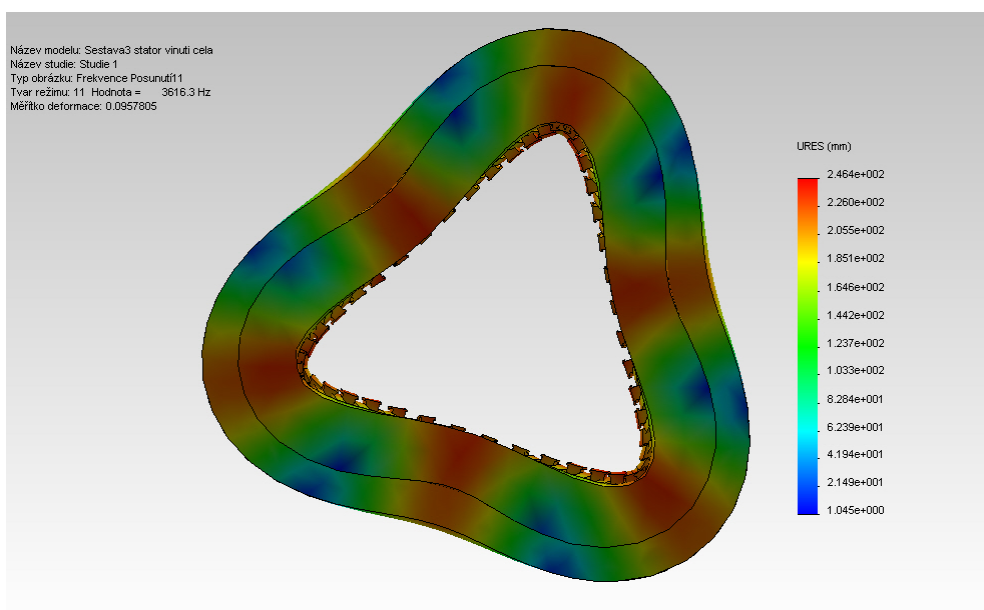
Obr.9. – Deformace pro $r=4$ při frekvenci 5887,2Hz

3.1.3 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí

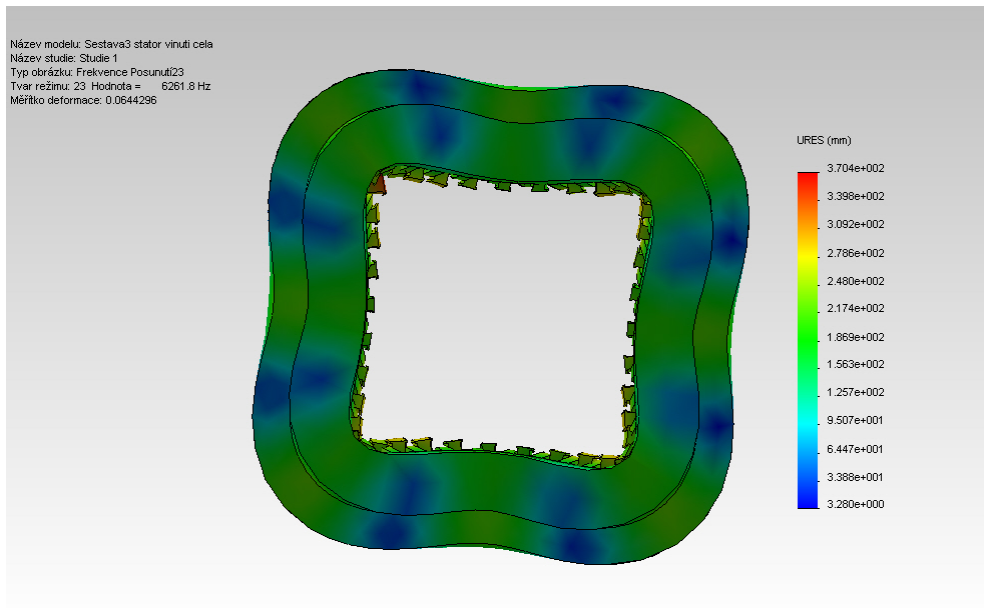
Jelikož je vinutí bez čel neúplné, bylo nutné provést analýzu statoru s vinutím se zahrnutím čel vinutí.



Obr.10. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1405,1Hz



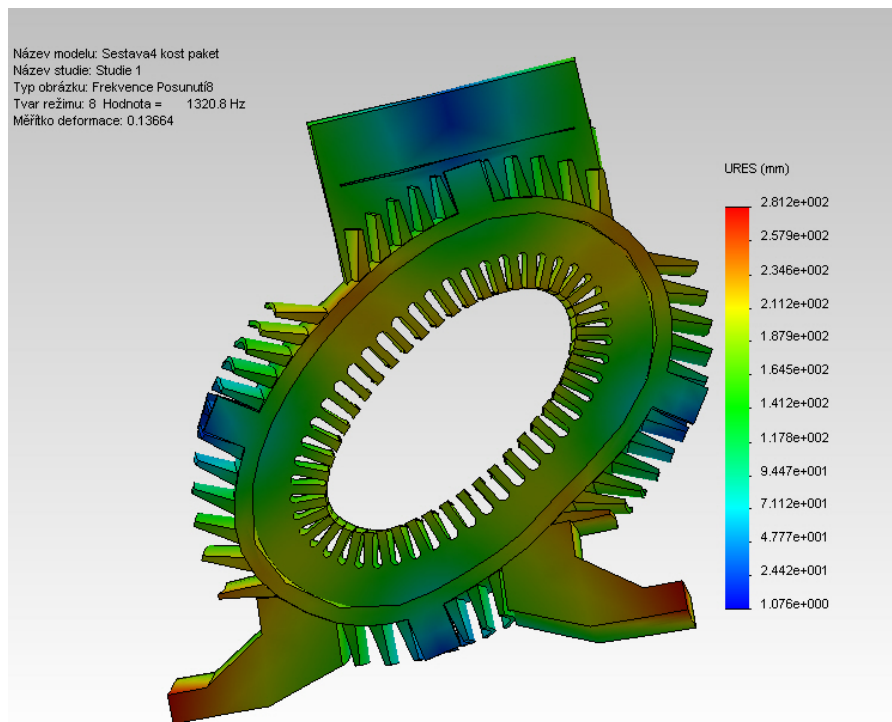
Obr.11. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3616,3Hz



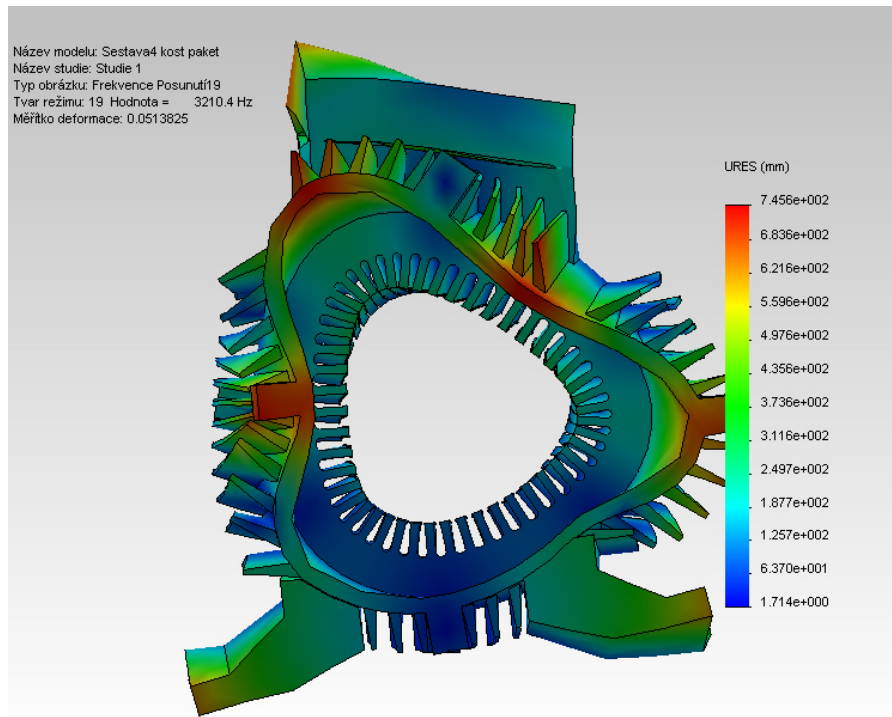
Obr.12. – Deformace pro $r=4$ při frekvenci 6261,8Hz

3.1.4 Statorové jádro vložené v kostře

Jako další byl podroben analýze celek statorového paketu v hliníkové kostře.



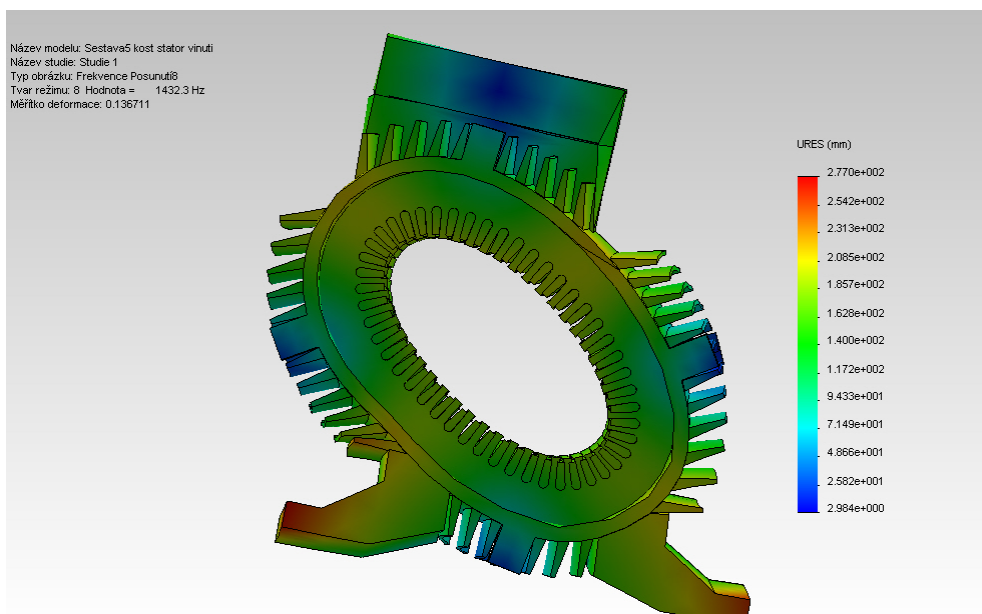
Obr.13. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1320,8Hz



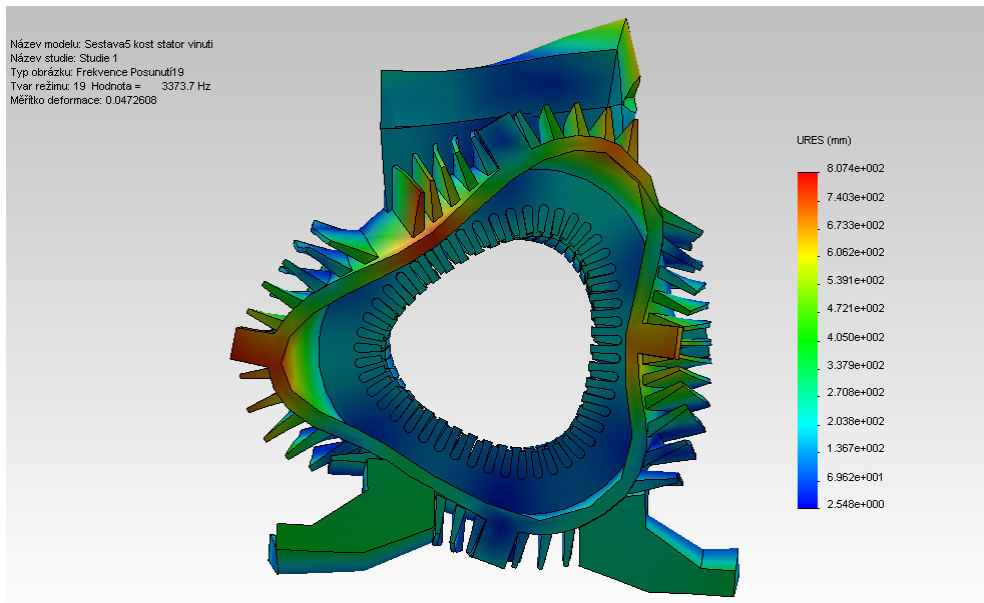
Obr. 14. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3210,4Hz

Z obrázků je patrné, že rozpoznat různé druhy deformací je dosti složité. Některé druhy deformací ani v této analýze nebyly obsaženy.

3.1.5 Statorové jádro s vodiči v drážkách vložené v kostře

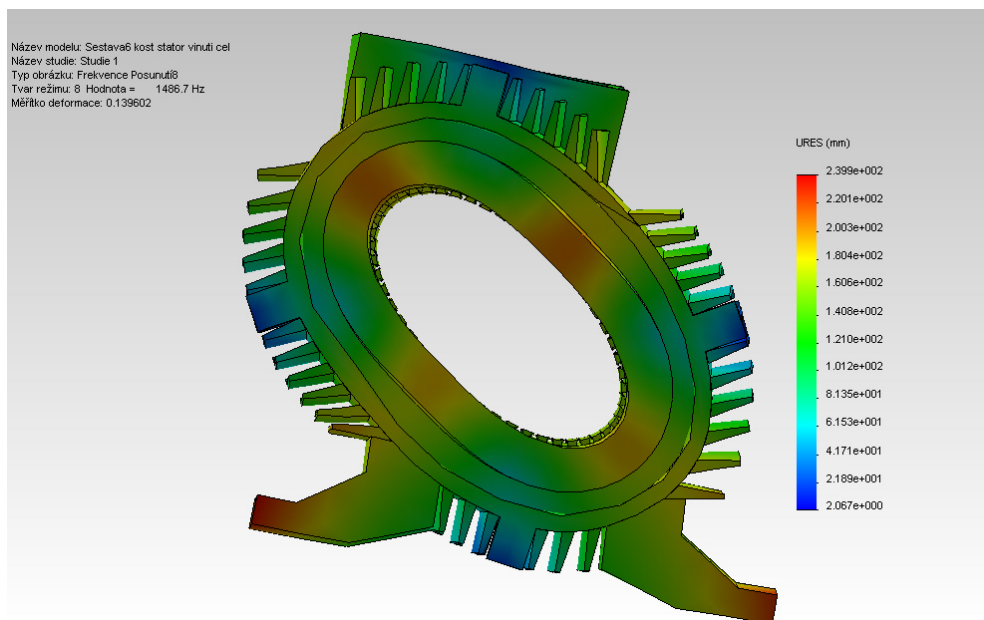


Obr. 15. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1432,3Hz

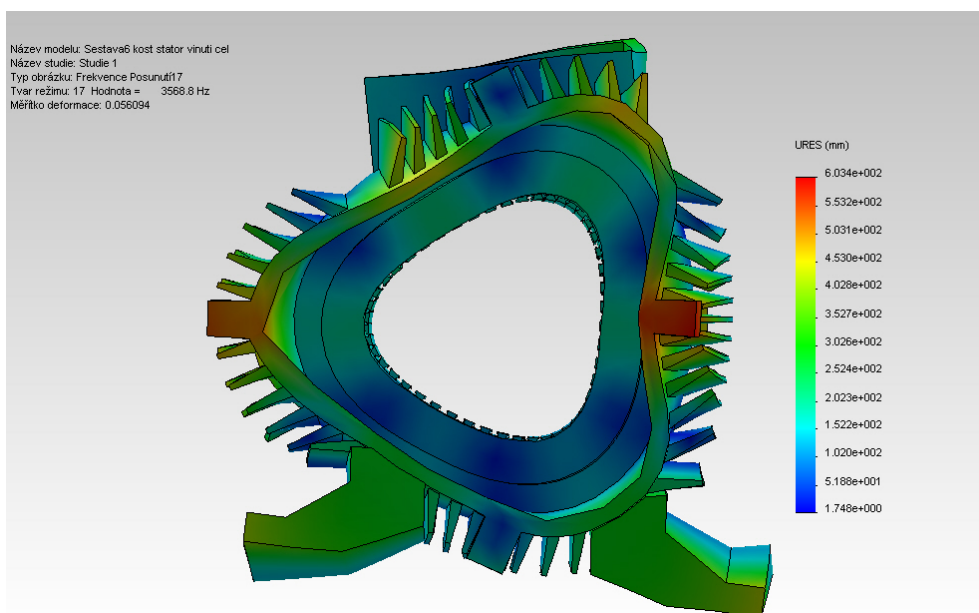


Obr. 15. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3373,7Hz

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



Obr. 16. – Deformace pro $r=2$ při frekvenci 1486,7Hz



Obr. 17. – Deformace pro $r=3$ při frekvenci 3568,8Hz

3.1.6 Statorové jádro s vodiči v drážkách a čely vinutí vložené v kostře se štíty

Tato analýza byla jako poslední. Vlivem štítů je těžké rozpoznat o jaký tvar se jedná. Výstupy této analýzy jsou v přílohové části jako ostatní analýzy.

4. Vliv konstrukčních částí asynchronního stroje na jeho vlastní frekvence

4.1 Porovnání

Z analýz je patrné, že vinutí a čela vinutí ve statorovém paketu zvyšují hodnoty vlastních frekvencí pro různé vlastní tvary. Naopak konstrukce kostry a štítů rozšiřuje celkové množství vlastních frekvencí.

Závěr

V první části této diplomové práce byl popsán asynchronní stroj a síly, které působí na statorové jádro stroje. Ve druhé části byl zobrazen typ stroje, který byl namodelován a využit pro analýzy vlastních frekvencí konstrukčních částí stroje. V další části byla provedena analýza vlastních frekvencí stroje a v poslední části shrnutí analýz.

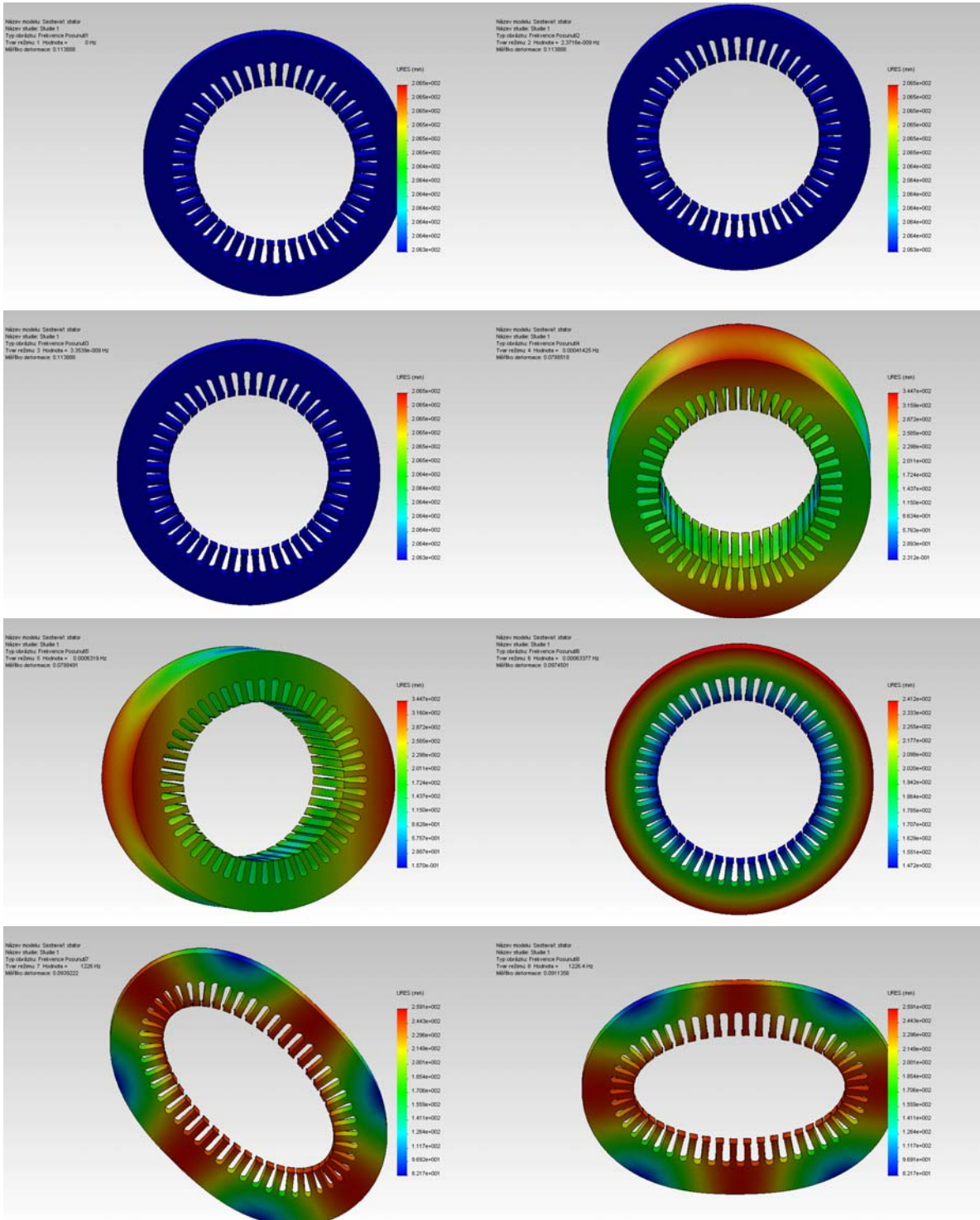
Seznam použité literatury

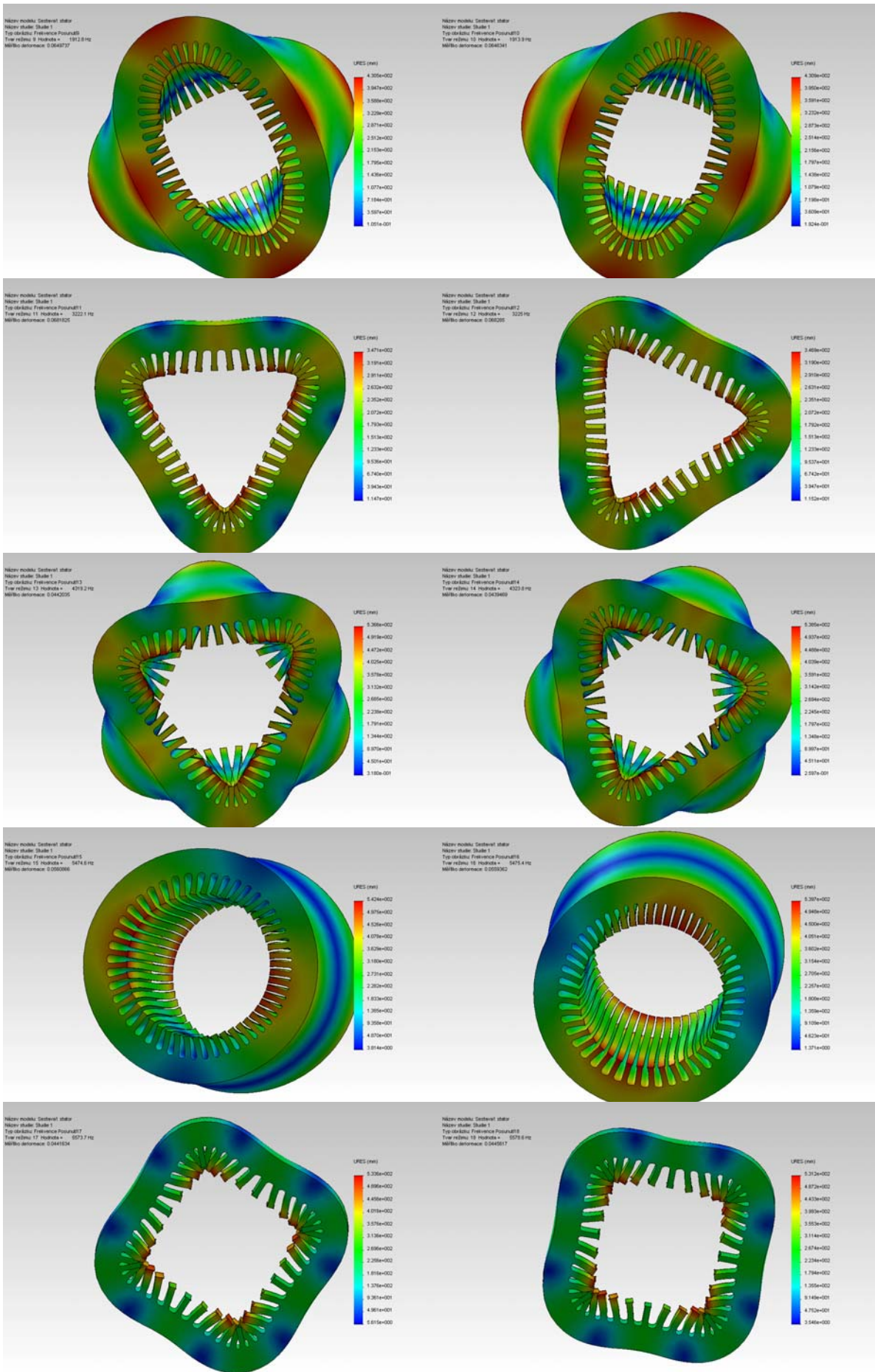
- [1] HELLER, B., HAMATA, V. Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji. Praha Nakladatelství Československé akademie věd, 1961
- [2] GIERAS, J. F., WANG, CH., LAI, J. CH. Noise of polyphase electric motors. CRC Press 2006
- [3] BARTOŠ, V. Elektrické stroje. Plzeň : ZČU FEL, 2006
- [4] PETROV,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

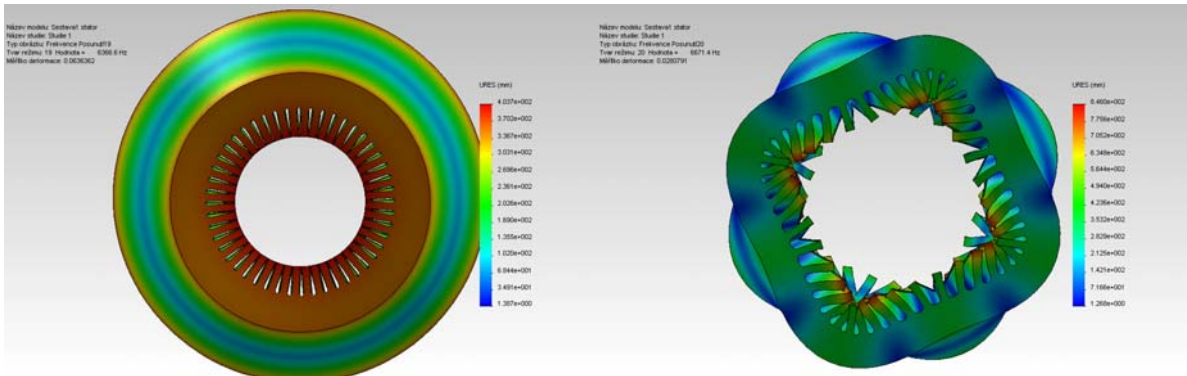
Přílohová část

Tvary analyzovaných částí při vlastních frekvencích

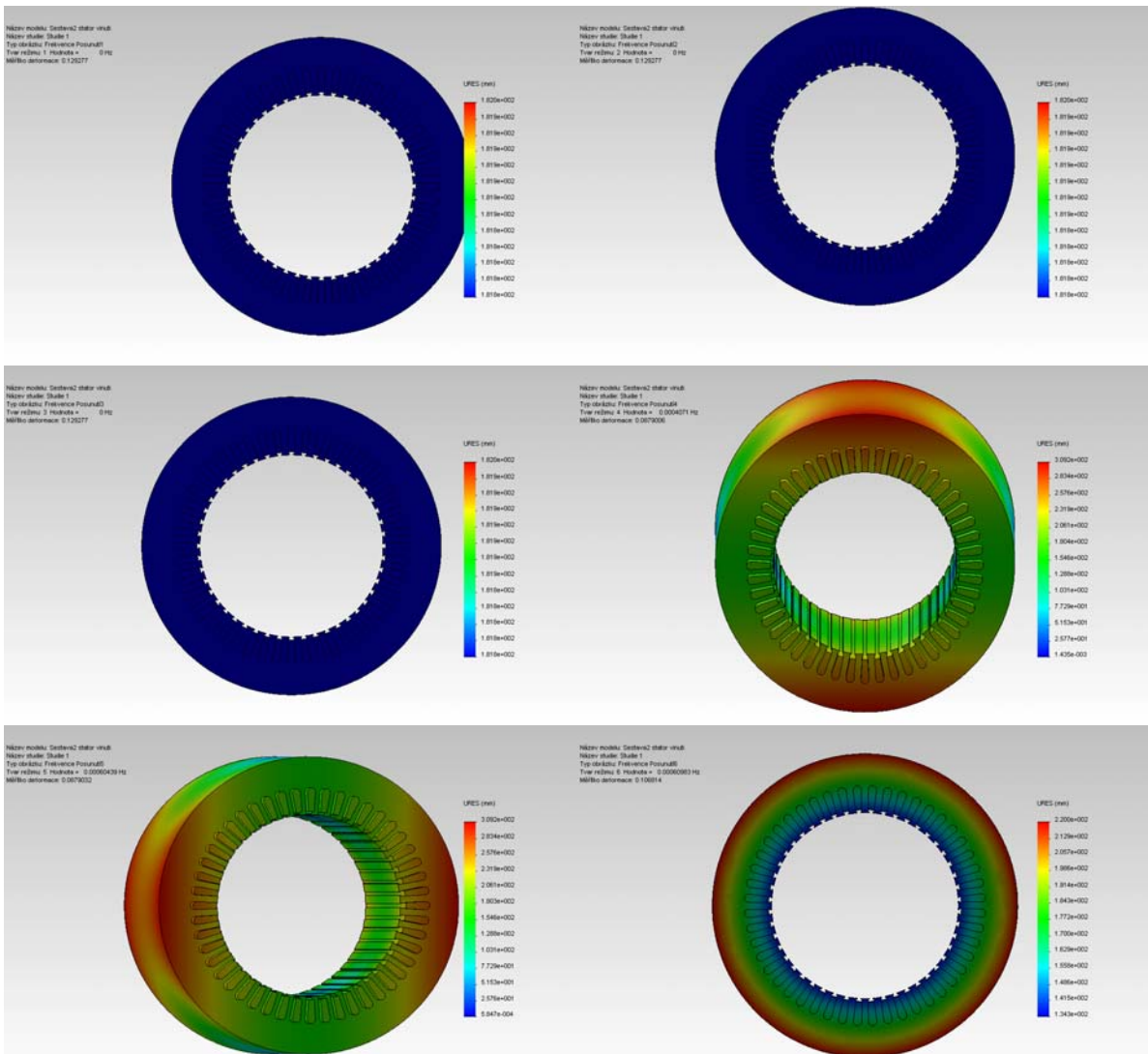
Paket statoru

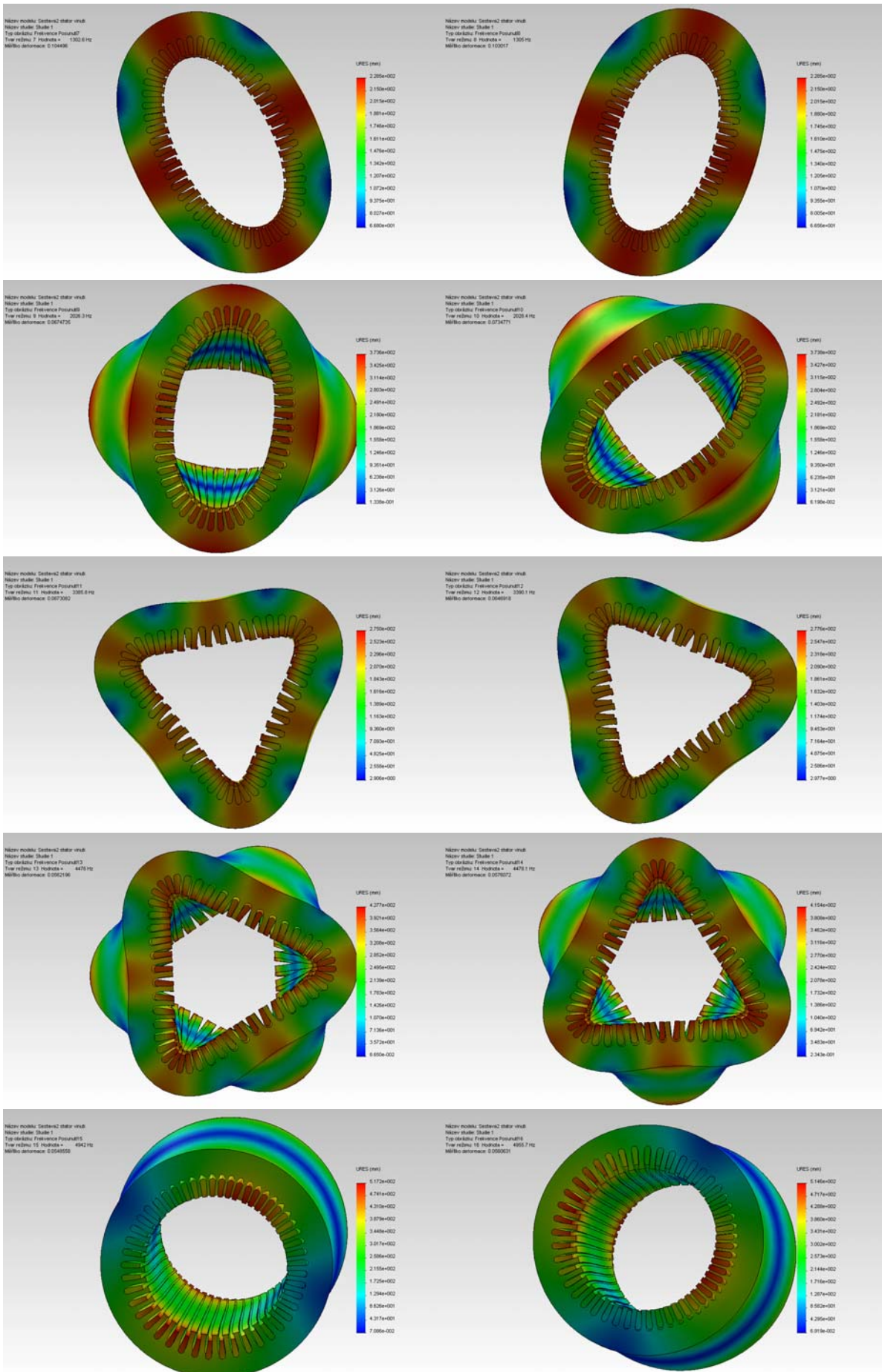


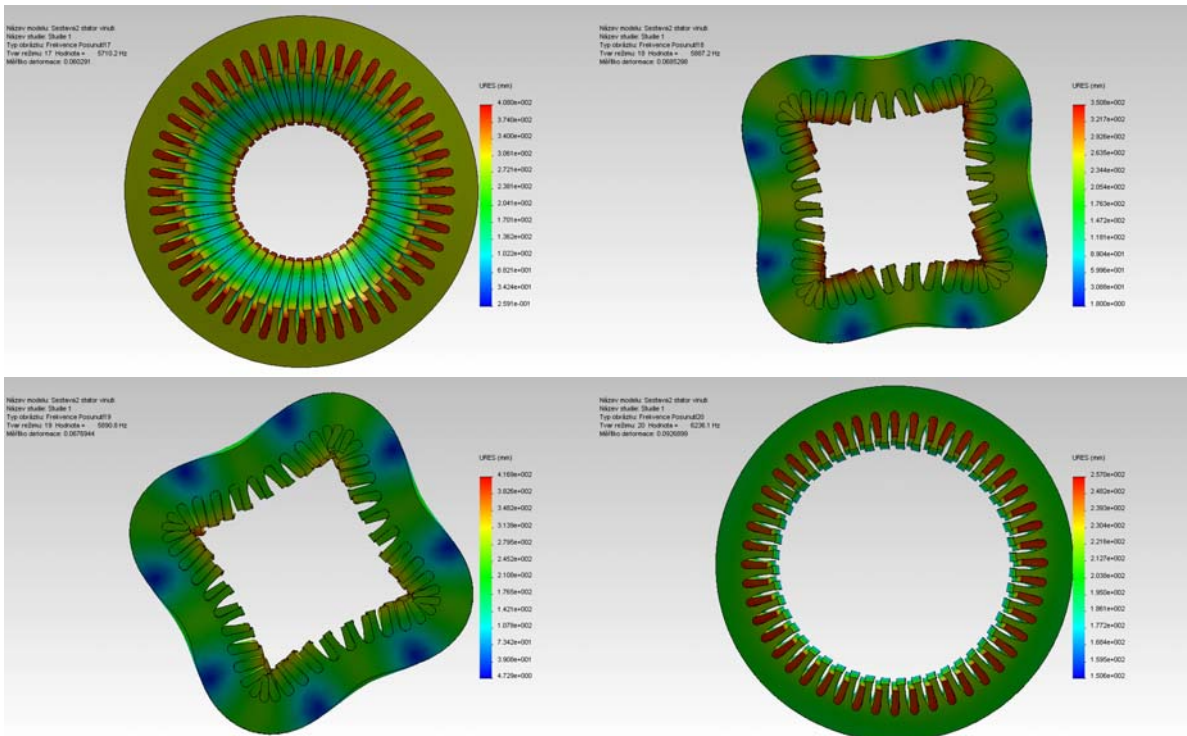




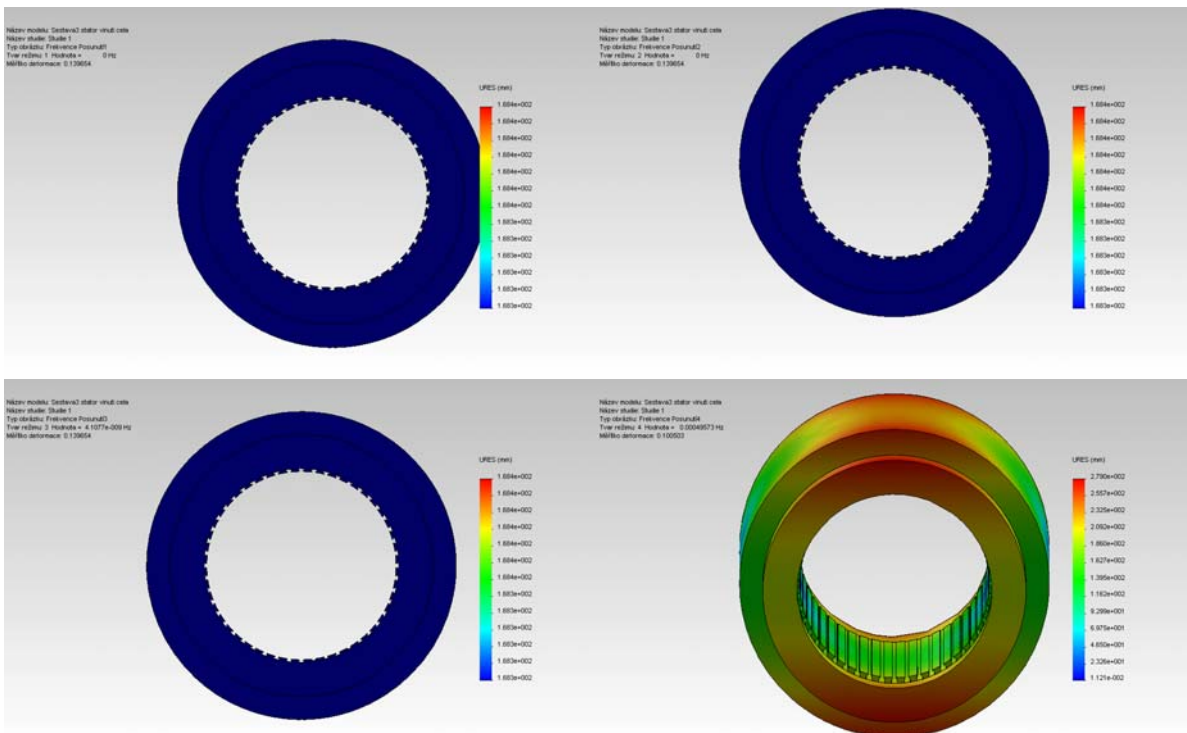
Paket statoru s vinutím

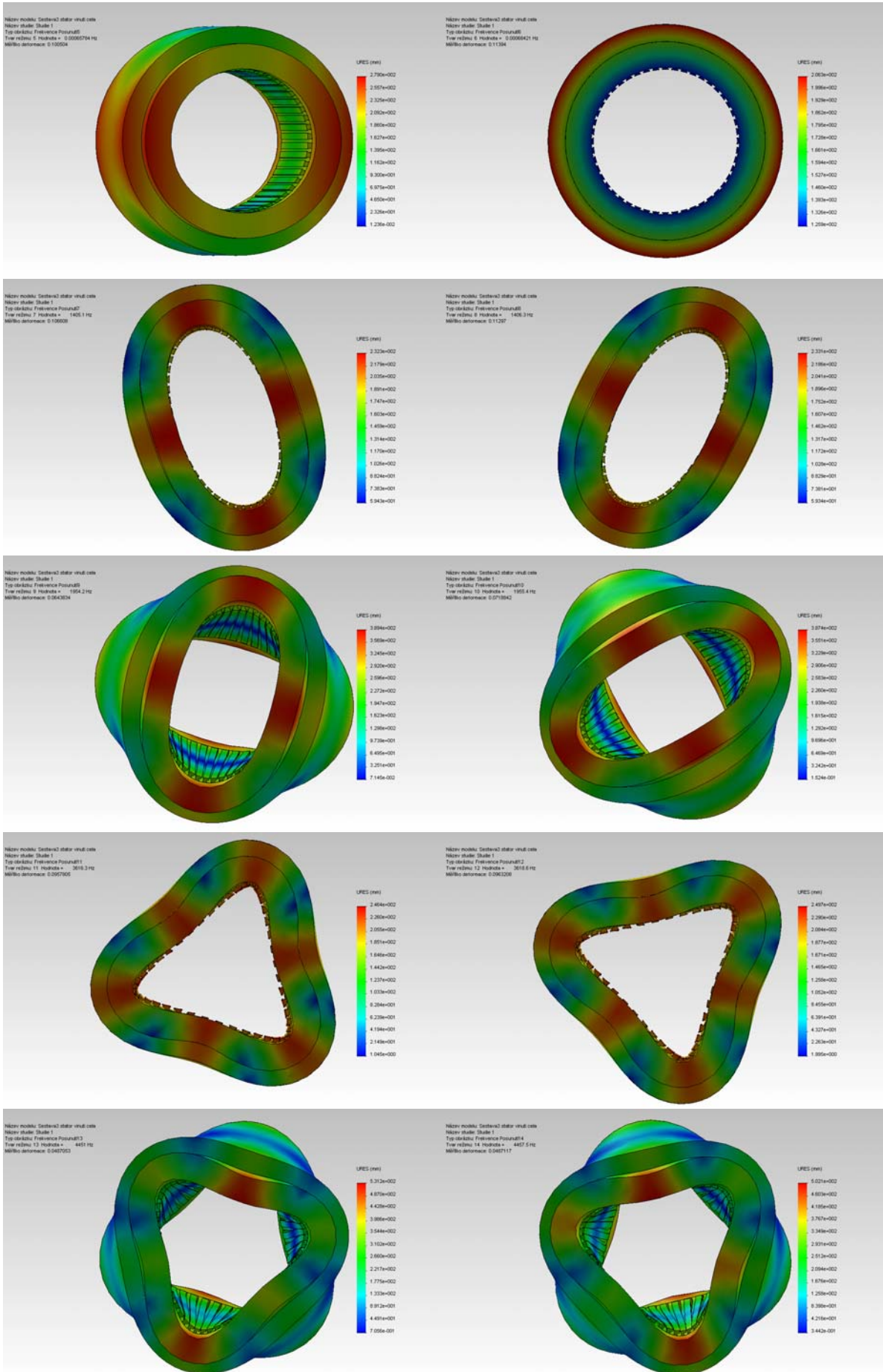


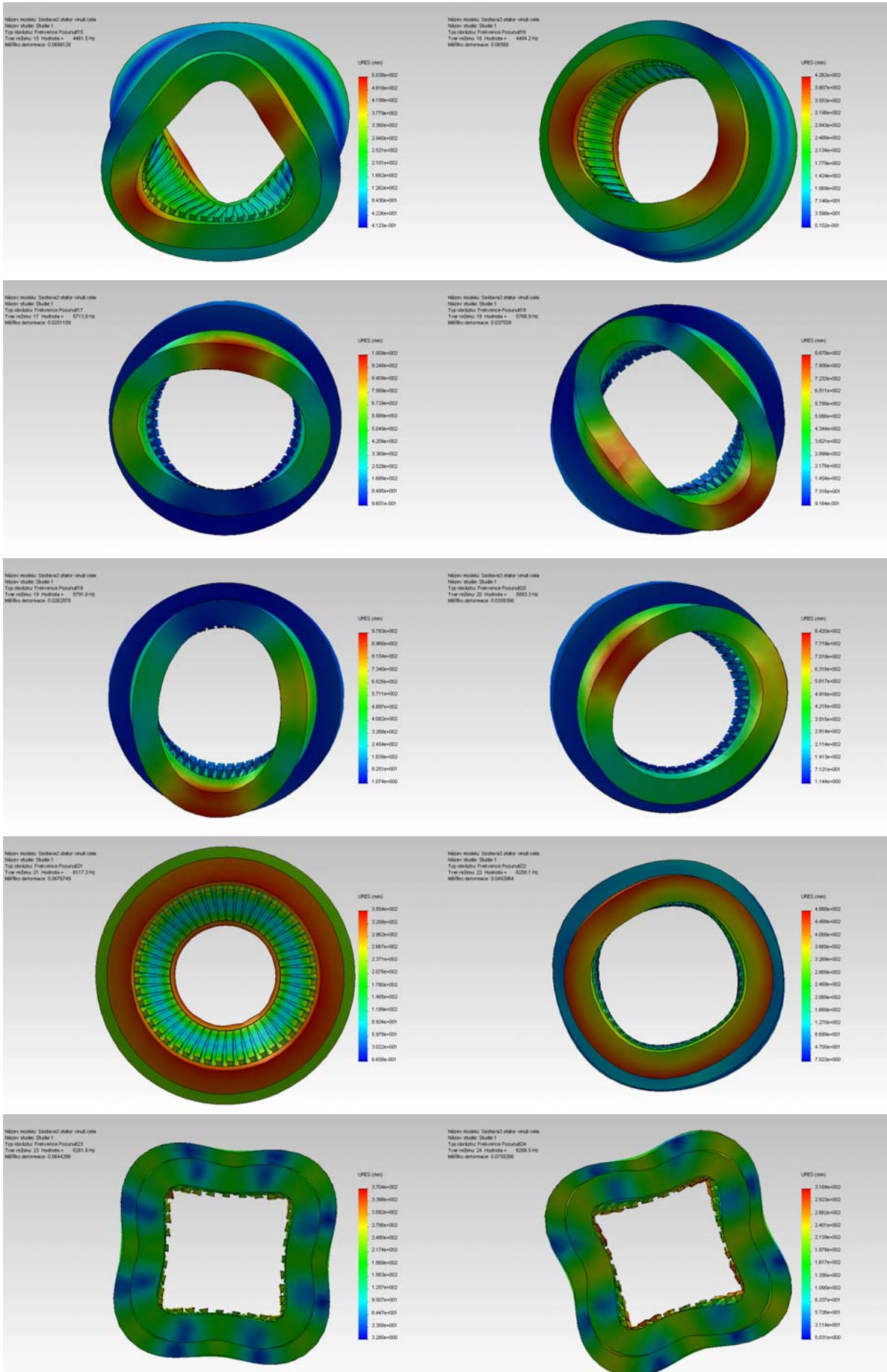




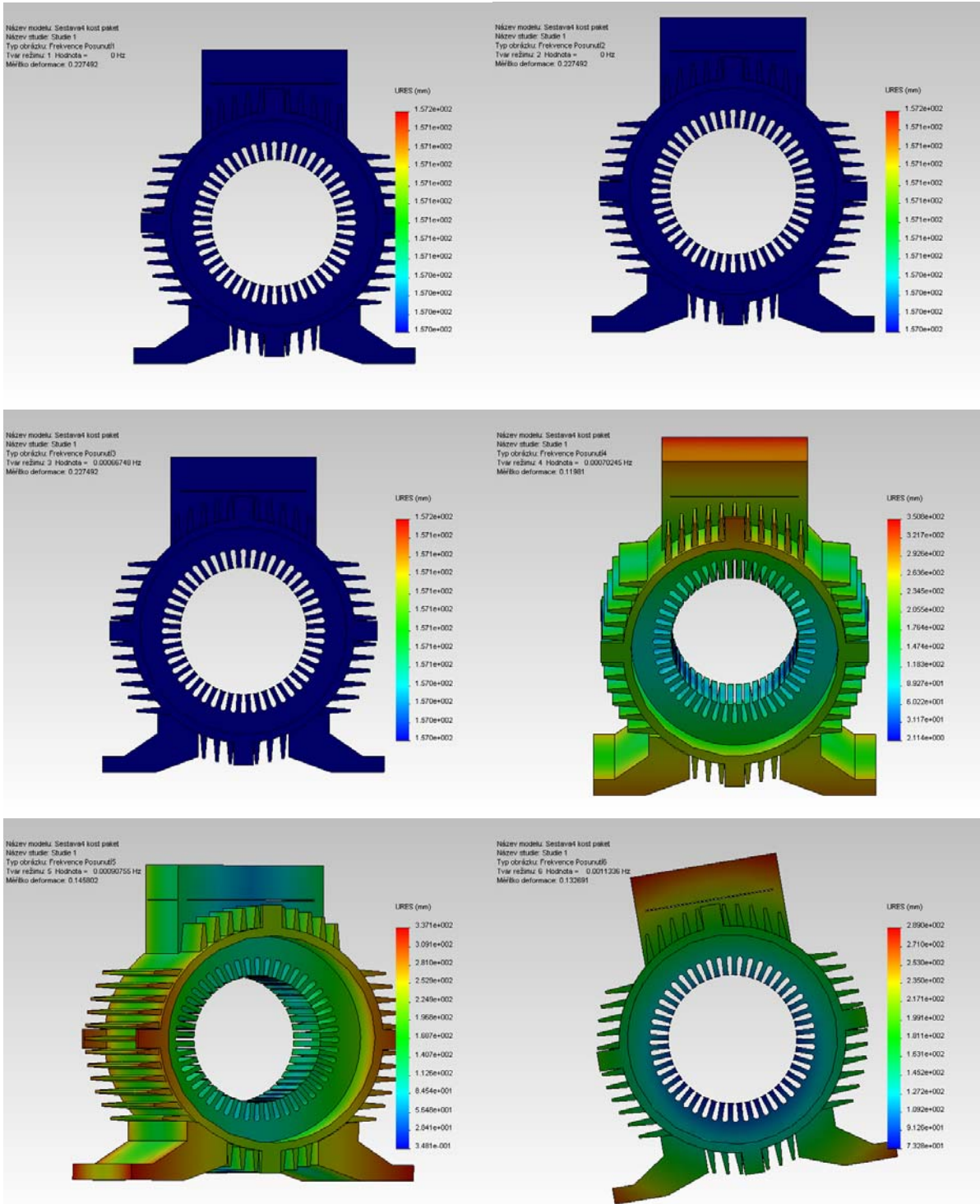
Paket statoru s vinutím a čely cívek

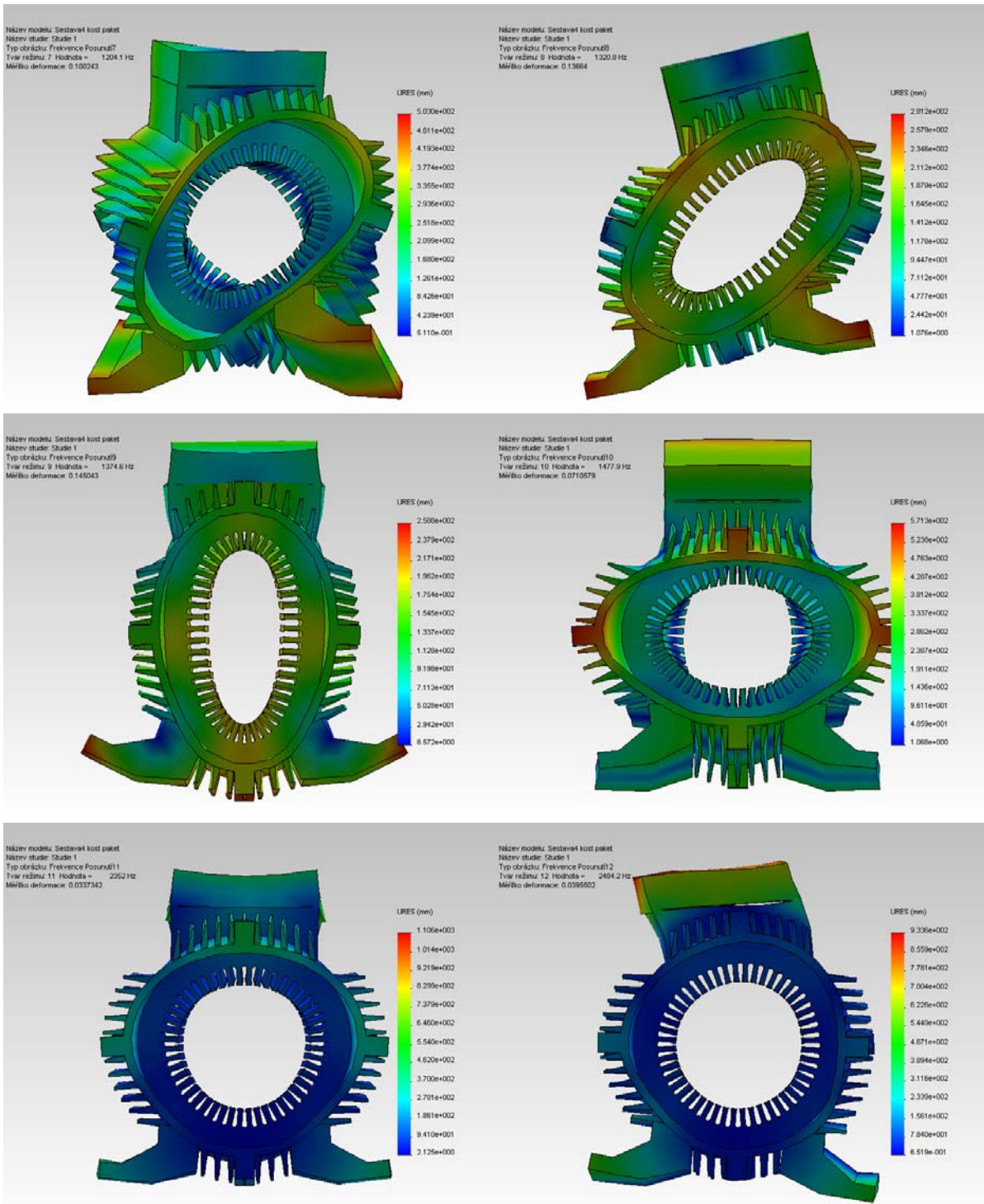


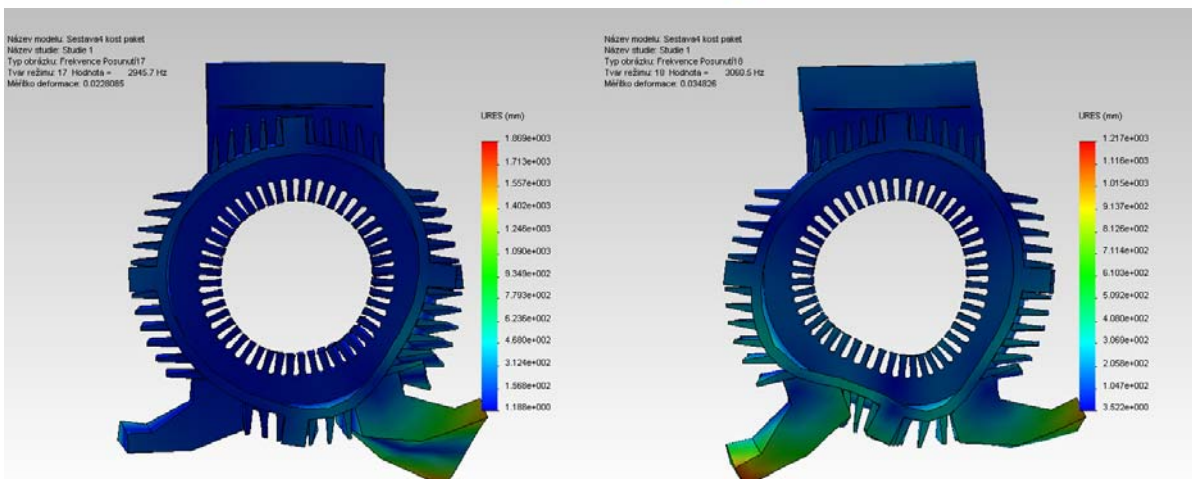
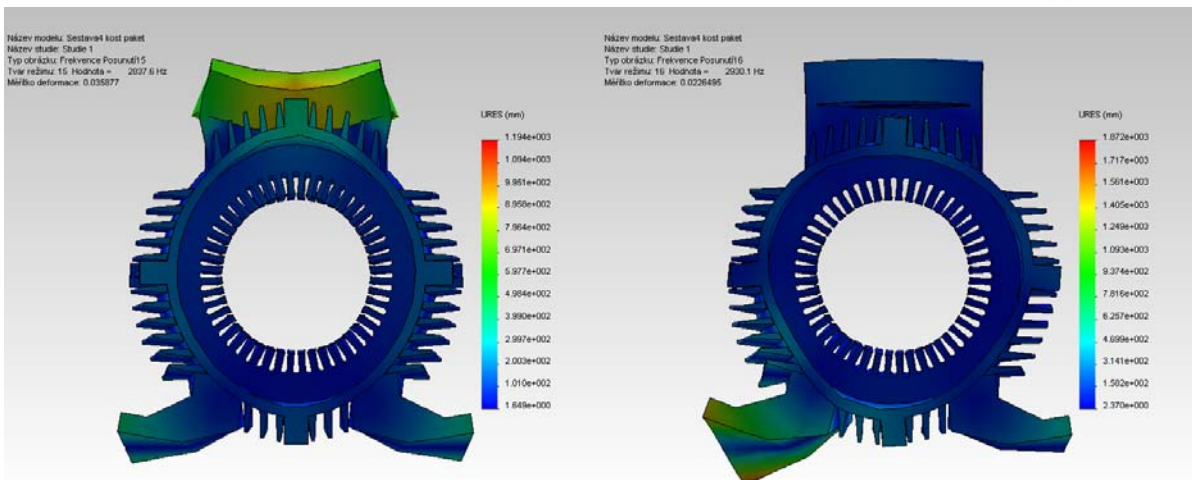
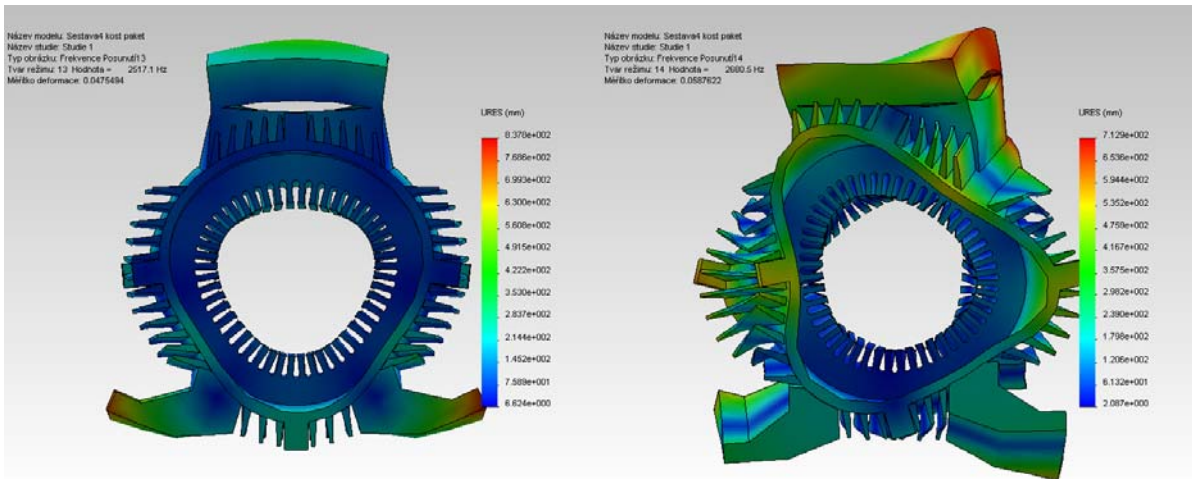


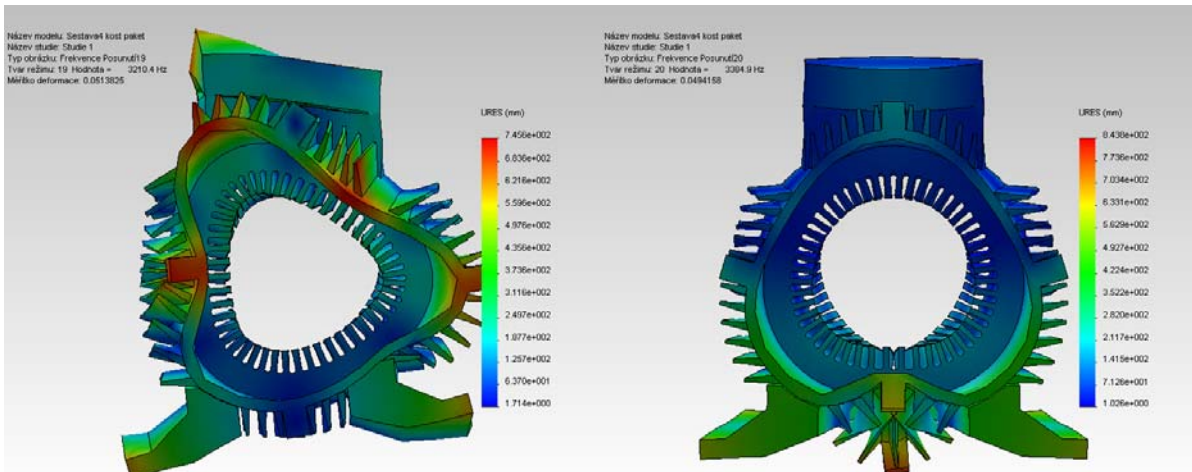


Paket statoru v kostře

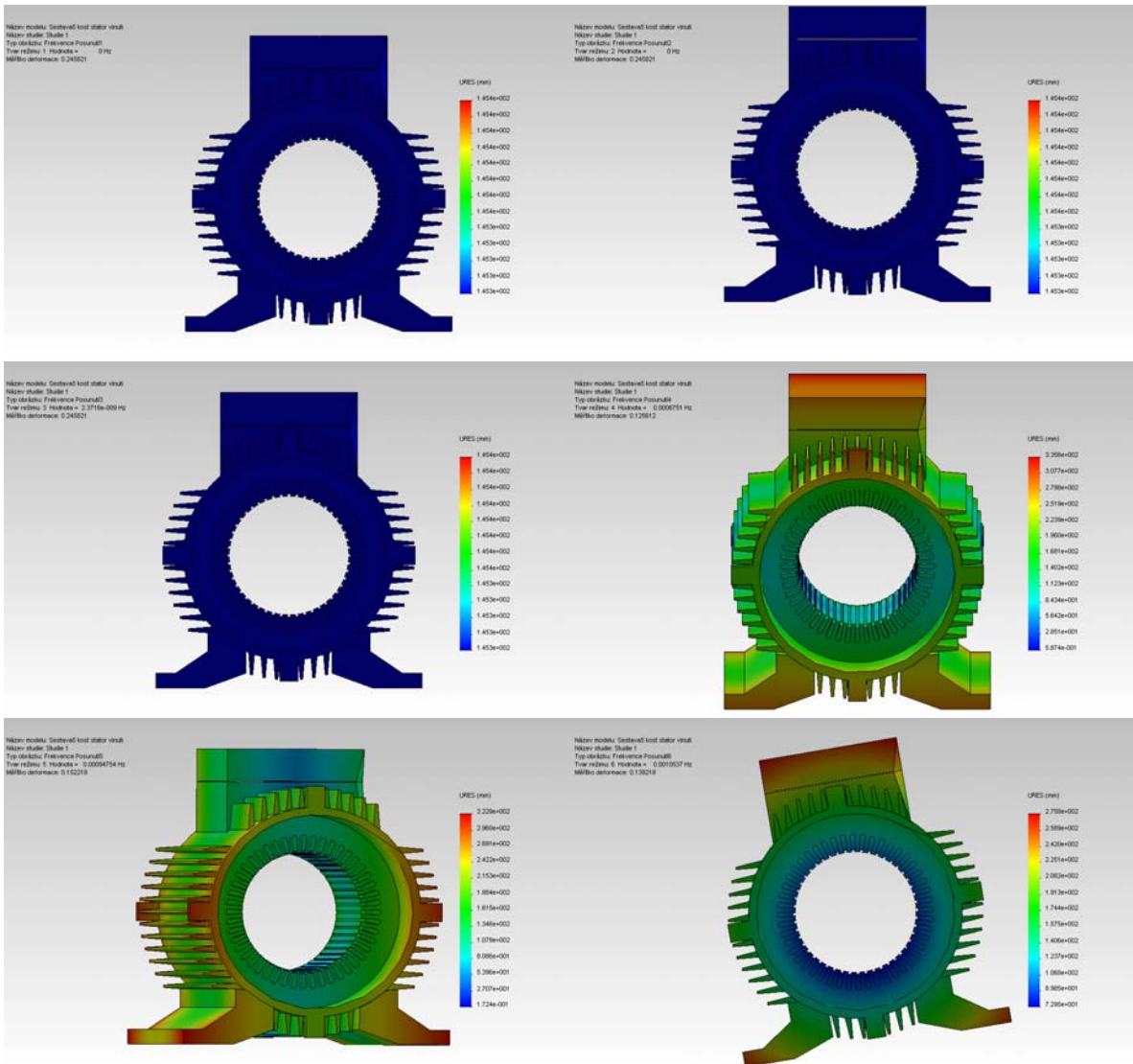


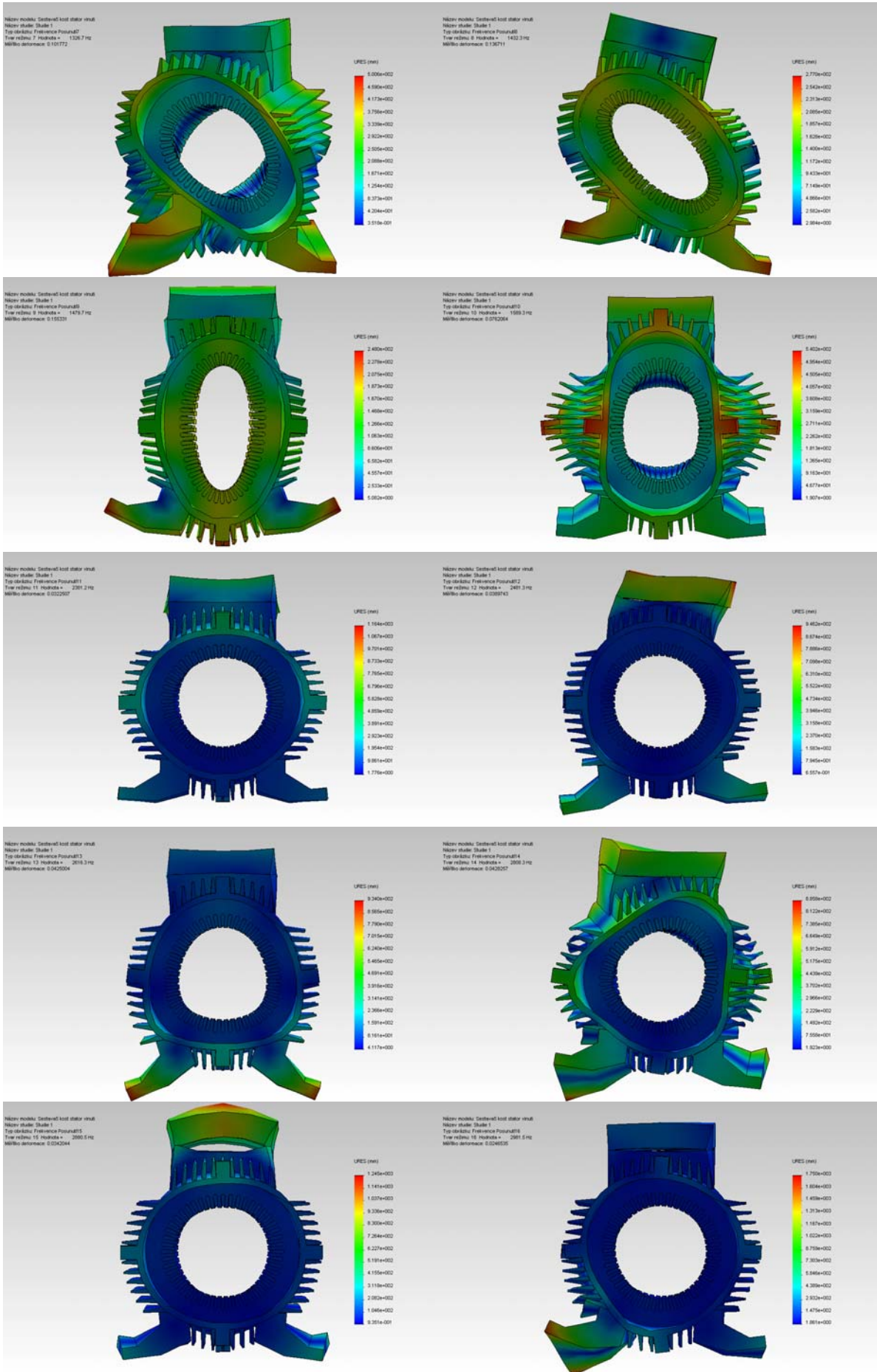


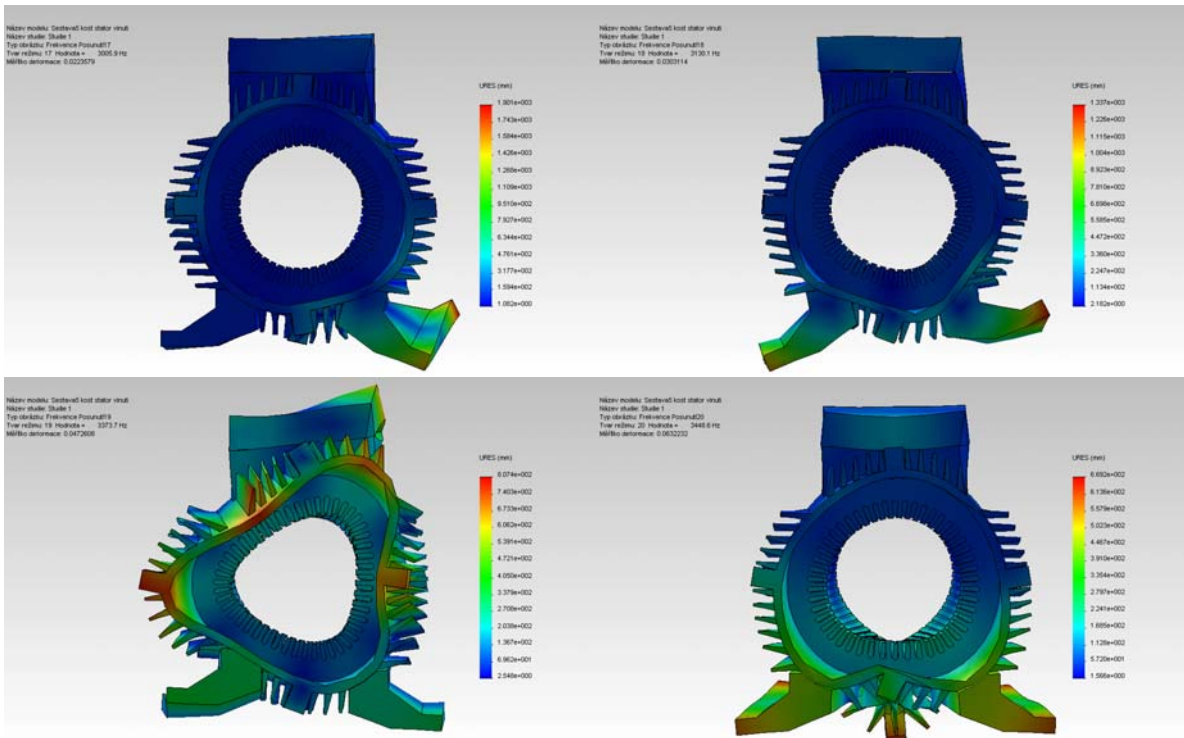




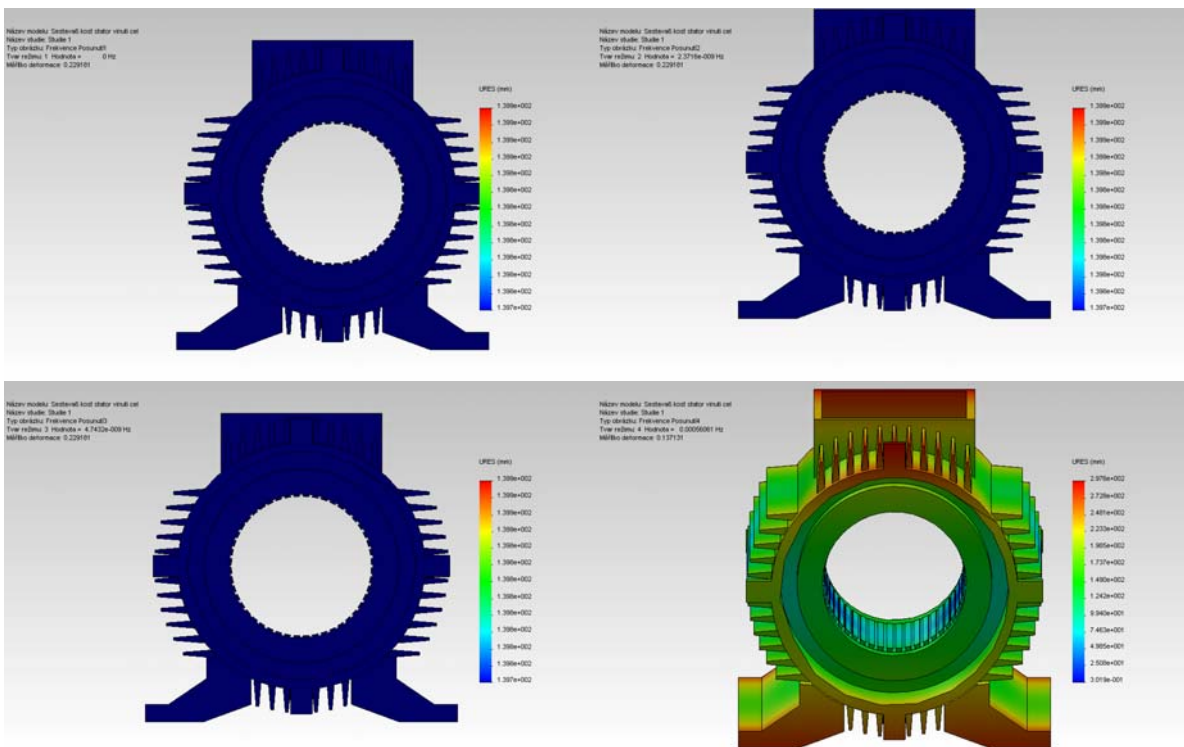
Paket statoru s vinutím v kostře

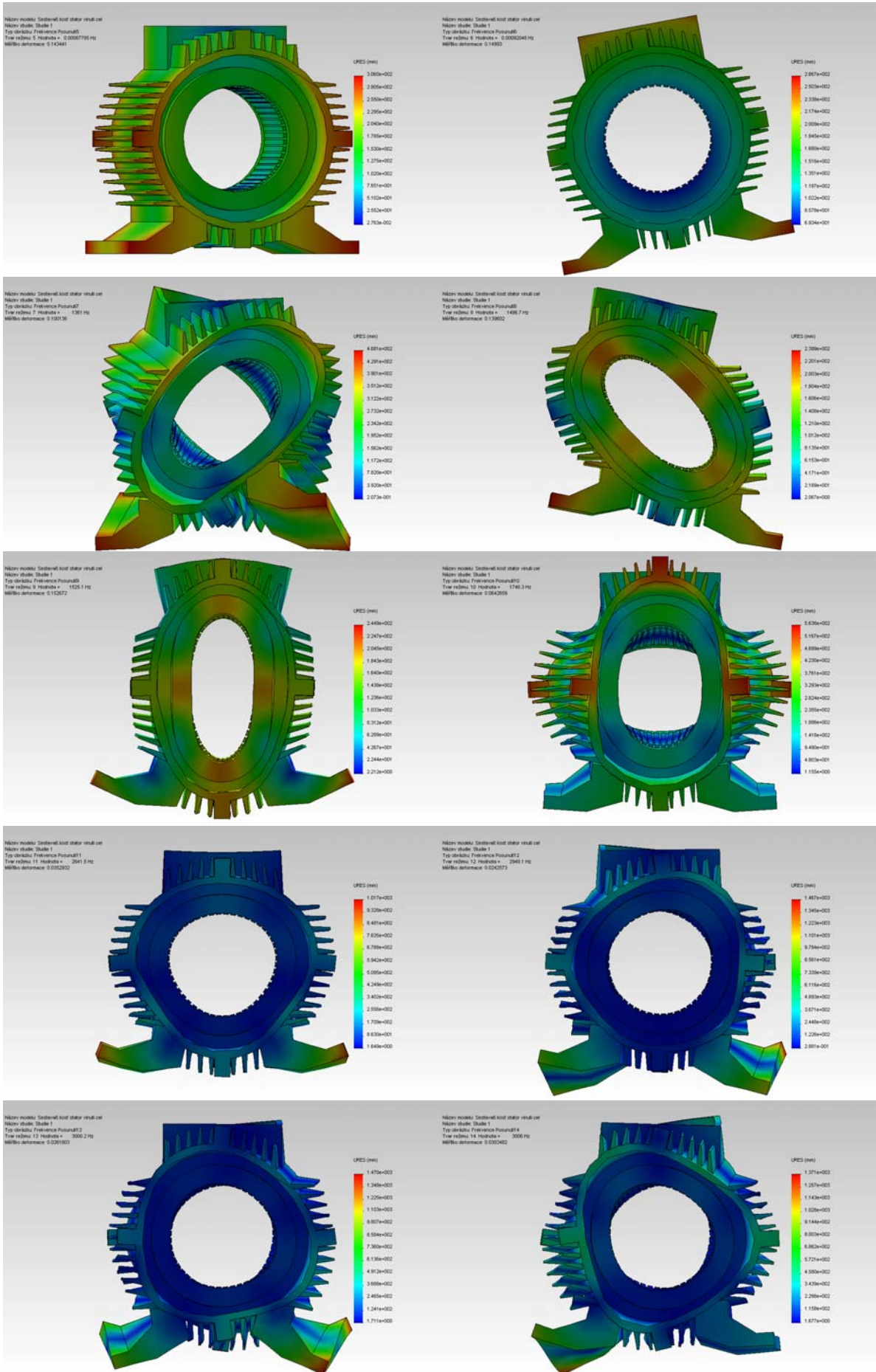


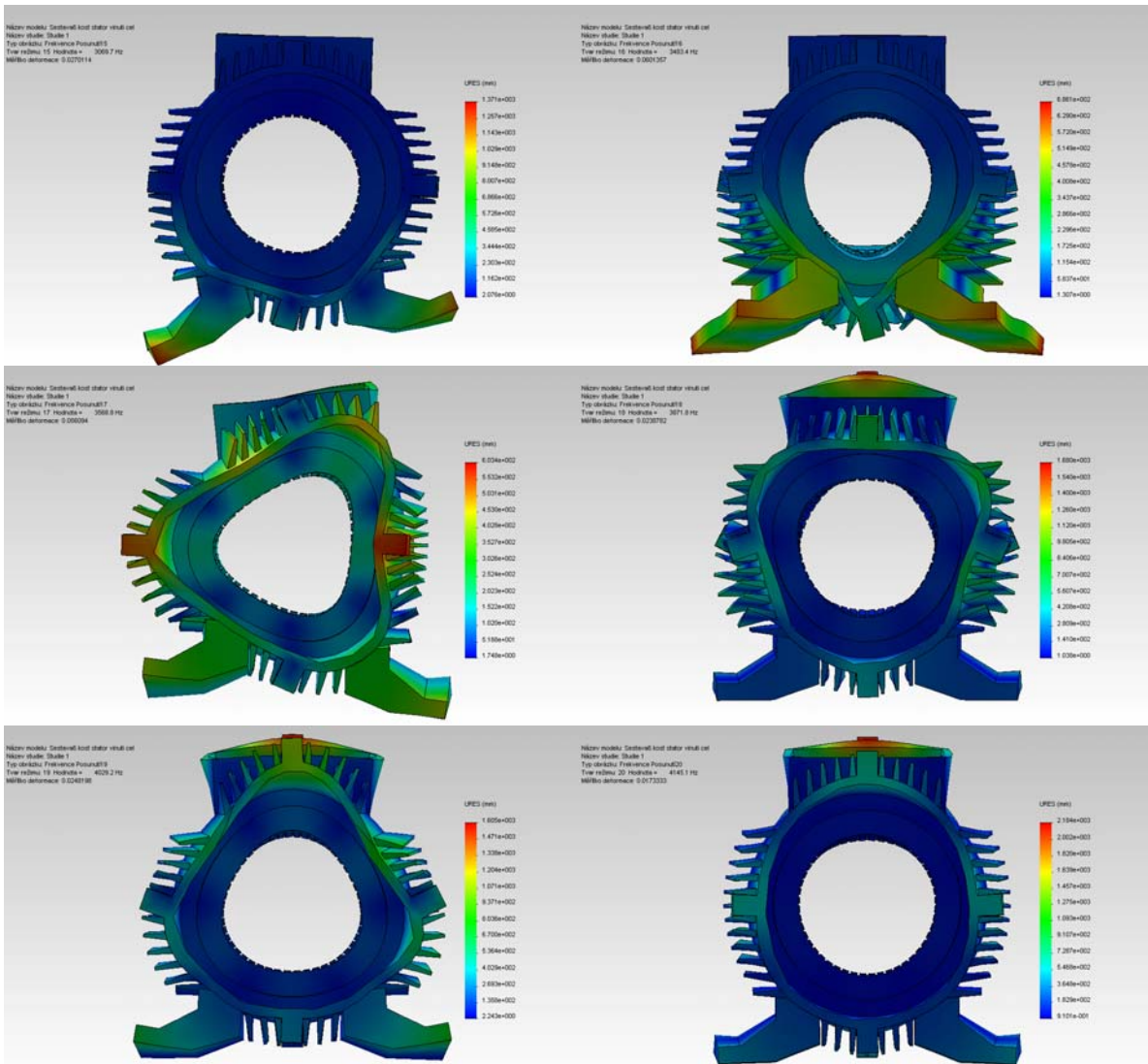




Paket statoru s vlnutím a čely v kostře







Paket statoru s vlnutím a čely v kostře se štíty

