

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

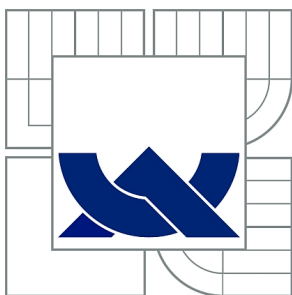
VLIV EXCENTRICITY NA RADIÁLNÍ SÍLY V ASYNCHRONNÍM MOTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

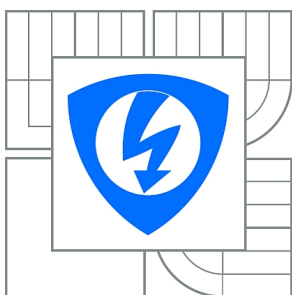
Bc. JAKUB FORMÁNEK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VLIV EXCENTRICITY NA RADIÁLNÍ SÍLY V ASYNCHRONNÍM MOTORU

THE INFLUENCE OF ECCENTRICITY UPON THE RADIAL FORCES IN AN INDUCTION MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAKUB FORMÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jakub Formánek

ID: 134232

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Vliv excentricity na radiální síly v asynchronním motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s působením radiálních sil v asynchronním stroji.
2. Vytvořte model motoru podle skutečného stroje .
3. Na modelu definujte několik typů excentricity a proveďte výpočet rozložení magnetického pole a radiálních sil pomocí programu Maxwell.
4. Vyhodnoťte vliv velikosti excentricity na radiální síly.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JACEK F. GIERAS, Jacek F.Chong Wang. Noise of Polyphase Electric Motors. Hoboken: CRC Press, 2005. ISBN 978-142-0027-730.

[2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je seznámit se s vlivy excentricity na radiální síly působící v asynchronním motoru. Vzhledem k tomu, že tento typ motorů patří k nejčastěji používaným a nejvíce rozšířeným strojům vůbec, je vhodné zjišťovat velikost těchto sil a posuzovat jejich vliv na celkový provoz stroje. V této práci je zjišťování radiálních sil prováděno pomocí počítačové simulace v programu ANSYS Maxwell, za pomoci konečněprvkových modelů vytvořených v modulu Rmxprt. Tyto modely jsou vytvořeny na základě několika reálných asynchronních strojů s definovanými velikostmi excentricit. V poslední části je pak provedeno měření výchylek pomocí vibrometru na reálném stroji.

Abstract

The aim of this master thesis is to get familiar with the influence of radial forces in the induction machine. Induction motor is one of the most commonly used and most extended type of machine, therefore it is useful to detect the intensity of these forces and their influence at operation of the machine. In this work ,radial forces are computed by the software simulation in ANSYS Maxwell. Models are created with help of module Rmxprt and finite elements method. These models are based on real induction motors with predefined size of eccentricity. In the final part we perform a measurement of deviations on the real machine using vibrometer.

Klíčová slova

Asynchronní motor, Indukční motor, Radiální síla, Excentricita, Rotor, Stator, Vzduchová mezera, Metoda konečných prvků, ANSYS Maxwell, Rmxprt

Keywords

Asynchronous motor, Induction motor, Radial force, Eccentricity, Rotor, Stator, Air gap, Finite elements method, Ansys Maxwell, Rmxprt

Bibliografická citace

FORMÁNEK, J. *Vliv excentricity na radiální síly v asynchronním motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma vliv excentricity na radiální síly v asynchronním motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

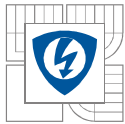
Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Marcelu Jandovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora



Obsah

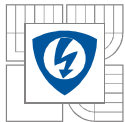
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
ÚVOD	13
1 ASYNCHRONNÍ STROJ OBECNĚ.....	14
1.1 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO STROJE	14
1.2 VZNIK TOČIVÉHO MAGNETICKÉHO POLE	15
2 RADIÁLNÍ SÍLY	17
2.1 MAGNETOMOTORICKÉ NAPĚTÍ A TŘÍFÁZOVÉ STATOROVÉ VINUTÍ.....	17
2.2 RADIÁLNÍ MAGNETICKÉ SÍLY.....	18
2.2.1 AMPLITUDA MAGNETICKÉHO TLAKU.....	20
2.3 DEFORMACE STATOROVÉHO JÁDRA.....	21
2.4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ RADIÁLNÍ SÍLY.....	23
2.4.1 MAGNETICKÁ VODIVOST VZDUCHOVÉ MEZERY	23
2.4.2 VLIV DEFORMACE VZDUCHOVÉ MEZERY	23
2.4.3 VLIV SYCENÍ ŽELEZA	23
2.5 EXCENTRICITA	24
3 SIMULAČNÍ PROGRAM ANSYS MAXWELL	25
3.1 CHARAKTERISTIKA PROGRAMU	25
3.2 RMXPERT	26
3.3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	27
4 ASYNCHRONNÍ MOTOR TM90-4S	28
5 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	29
5.1 PŘÍPRAVA MODELU V RM EXPERT	29
5.1.1 STATOR A JEHO PARAMATRY	29
5.1.2 ROTOR A JEHO PARAMETRY	29
6 EXPORT DO MAXWELL 2D.....	30
6.1 MESH.....	30
6.2 NASTAVENÍ VÝPOČTU SIMULACE A VELIKOSTI RADIÁLNÍ SÍLY.....	31
6.3 NASTAVENÍ EXCENTRICIT	32
6.4 ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO POLE A SÍLY PRO BEZPORUCHOVÝ STAV	33
7 MĚŘENÍ RADIÁLNÍCH SIL.....	34
7.1 BEZPORUCHOVÝ STAV	35
7.2 STATICKÁ EXCENTRICITA	38



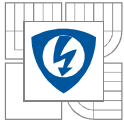
7.3 DYNAMICKÁ EXCENRICITA	41
7.4 KOMBINOVANÁ EXCENRICITA	44
8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ NA MOTORU TM90-4S	47
8.1 MĚŘENÍ POSUVŮ.....	48
8.2 SIMULACE VIBRACÍ V ANSYS WORKBENCH.....	50
9 ZÁVĚR.....	52
LITERATURA	53
PŘÍLOHY	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Řez AS motorem.....</i>	<i>14</i>	
<i>Obrázek 2: Vznik tažné síly asynchronního motoru.....</i>	<i>15</i>	
<i>Obrázek 3: Časový průběh fázových proudů a směry proudu vinutími.....</i>	<i>16</i>	
<i>Obrázek 4: Prostorové působení sil.....</i>	<i>22</i>	
<i>Obrázek 5: Motor bez excentricity</i>	<i>Obrázek 6: Statická excentricita.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 7: Dynamická excentricita</i>	<i>Obrázek 8: Kombinovaná excentricita.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 9: Ansoft Maxwell 16 a jeho programové prostředí.....</i>	<i>25</i>	
<i>Obrázek 10: Příklad tvarů při užití MKP.....</i>	<i>27</i>	
<i>Obrázek 11: Čtvrtinový model</i>	<i>Obrázek 12: Celý model po převodu.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 13: Síť meshe na jednotlivých částech motoru a jeho detail na zubu satoru.....</i>	<i>31</i>	
<i>Obrázek 14: Rozklad síly na hraně satoru pro výpočet radiální síly.....</i>	<i>31</i>	
<i>Obrázek 15: Rozložení magnetické indukce v motoru pro stroj bez poruchy.....</i>	<i>33</i>	
<i>Obrázek 16: Rozložení síly „EdgeForceDensity“ na hraně satoru.....</i>	<i>33</i>	
<i>Obrázek 17: Výběr bodů pro měření.....</i>	<i>34</i>	
<i>Obrázek 18: Velikost radiální síly v bodě +X.....</i>	<i>35</i>	
<i>Obrázek 19: Velikost radiální síly v bodě -Y.....</i>	<i>35</i>	
<i>Obrázek 20: Velikost radiální síly v bodě -X.....</i>	<i>36</i>	
<i>Obrázek 21: Velikost radiální síly v bodě +Y.....</i>	<i>36</i>	
<i>Obrázek 22: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor bez excentricity.....</i>	<i>37</i>	
<i>Obrázek 23: Velikost radiální síly v bodě +X.....</i>	<i>38</i>	
<i>Obrázek 24: Velikost radiální síly v bodě -Y.....</i>	<i>38</i>	
<i>Obrázek 25: Velikost radiální síly v bodě -X.....</i>	<i>39</i>	
<i>Obrázek 26: Velikost radiální síly v bodě +Y.....</i>	<i>39</i>	
<i>Obrázek 27: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor se statickou excentricitou.....</i>	<i>40</i>	
<i>Obrázek 28: Velikost radiální síly v bodě +X.....</i>	<i>41</i>	
<i>Obrázek 29: Velikost radiální síly v bodě -Y.....</i>	<i>41</i>	
<i>Obrázek 30: Velikost radiální síly v bodě -X.....</i>	<i>42</i>	
<i>Obrázek 31: Velikost radiální síly v bodě +Y.....</i>	<i>42</i>	
<i>Obrázek 32: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor s dynamickou excentricitou.....</i>	<i>43</i>	
<i>Obrázek 33: Velikost radiální síly v bodě +X.....</i>	<i>44</i>	
<i>Obrázek 34: Velikost radiální síly v bodě -Y.....</i>	<i>44</i>	
<i>Obrázek 35: Velikost radiální síly v bodě -X.....</i>	<i>45</i>	
<i>Obrázek 36: Velikost radiální síly v bodě +Y.....</i>	<i>45</i>	
<i>Obrázek 37: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor s kombinovanou excentricitou.....</i>	<i>46</i>	

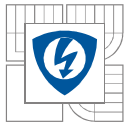


<i>Obrázek 38:Průběh výchylky pro bezexcentrický stroj</i>	
<i>Obrázek 39:Průběh výchylky pro stroj s kombinovanou excentricitou</i>	48
<i>Obrázek 40:Průběh výchylky pro stroj se statickou excentricitou</i>	49
<i>Obrázek 41:Průběh výchylky pro stroj s kombinovanou excentricitou.....</i>	49
<i>Obrázek 42:Výsledné rozložení deformace pro celý stroj a pouze rotor</i>	50
<i>Obrázek 43:Průběh výchylky pro stroj s kombinovanou excentricitou z programu Workbench</i>	50



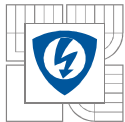
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Štítkové hodnoty asynchronního motoru TM90-4S.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 2: Tabulka excentricit jednotlivých motorů TM90-4S.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 3: Tabulka vstupních proudů a výkonů pro motor TM90-4S</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 4: RMS hodnoty zrychlení a špičkové hodnoty zrychlení pro jednotlivé motory</i>	<i>47</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

f	je frekvence proudu
p	je počet pólpárů.
nm	je mechanická rychlost rotoru.
s	je skluz
ns	je synchronní rychlost
α	je úhlová vzdálenost od počátku souřadného systému
$\varphi\mu$	je úhel mezi vektory statoru a rotoru harmonických stejného pořadí
v a μ	jsou počty prostorových harmonických statoru a rotoru v příslušném pořadí
ω	je pulsace vstupního proudu a je rovna $2\pi f$
F_{mv}	je maximální hodnota v -té harmonické
$F_{m\mu}$	je maximální hodnota μ -té harmonické
$p\alpha$	je rovno $\pi x / \tau$, kde τ je pólová rozteč a x je lineární vzdálenost od dané osy
μ_0	permeabilita vakua
p_r	radiální tlak ve vzduchové mezeře
P_{mr}	je amplituda magnetického tlaku
ω_r	je úhlová frekvence
r	jsou odpovídající řady radiálních magnetických sil a jsou rovny 1,2,3,...
RMxpt	Rm expert- modul programu Ansys Maxwell
RMS	Root mean square efektivní hodnota
a	je zrychlení
s	je posuv



ÚVOD

V elektrotechnické praxi se při konstrukci elektrických zařízení často naráží na problém optimalizace výrobního procesu, rychlost vývoje a úspornost řešení. V moderní době je v průmyslu třeba hledat řešení s co nejvyšší efektivitou vývoje. Řešení nabízí simulační aplikace, které dovolují vyvíjet produkty s minimálním užitím finančních prostředků v oblasti návrhu, optimalizace a testování zařízení. Takováto řešení nabízí právě software ANSYS Maxwell, jenž ve spolupráci se svými moduly jako je RMXprt přináší uživateli možnosti návrhu a optimalizace zařízení v oblastech elektromagnetismu a elektromechanismu.

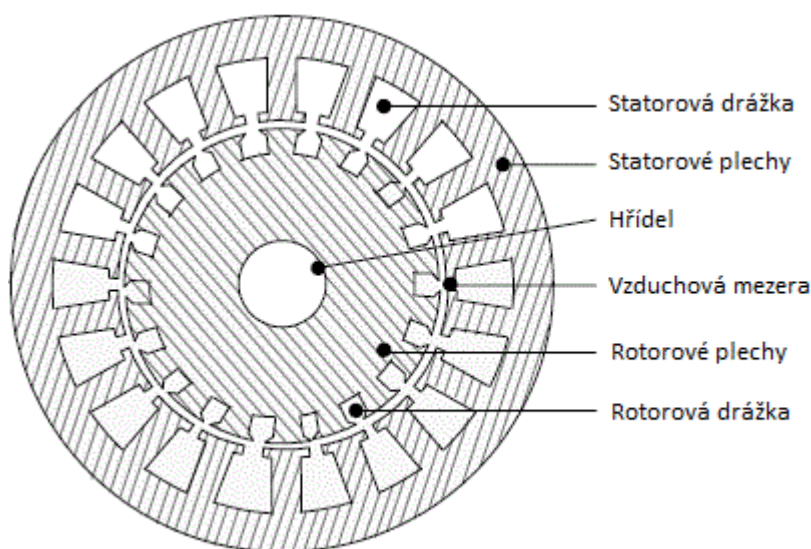
Asynchronní motor je nejběžnějším průmyslově používaným motorem, jenž se uplatňuje v širokém spektru odvětví. Existuje mnoho různých typů motorů, ale všechny pracují na stejném základním principu, při němž mezi jejich základními částmi, statorem a rotorem vznikají takzvané radiální síly. Tyto síly jsou jedním z významných původců vzniku vibrací a hluku v elektrických strojích. Při působení vibrací na stoj může docházet k nežádoucím deformacím, či opotřebením jednotlivých částí jako například ložisek. Rovněž může při působení hluku docházet k nežádoucím vlivům, působícím například na obsluhy motorů v provozech apod.

Právě proto se tato práce zabývá vlivem excentricity na velikost radiálních sil. Cílem je nastínit problematiku výpočtu těchto sil pomocí simulačních programů a zjistit, jakých výsledků jsou schopny dosáhnout v oblasti porovnání motorů s různou velikostí excentricity.

1 ASYNCHRONNÍ STROJ OBECNĚ

Asynchronní nebo také indukční stroj je sestaven ze dvou hlavních částí. První z těchto částí je statorové jádro a druhou rotorové jádro. Obě tyto části mohou obsahovat vícefázová vinutí. Magnetický obvod rotoru i statoru je složen z tenkých ocelových plechů. Vinutí jsou umístěna ve statorových a rotorových drážkách nebo mohou být vyrobena jako bezdrážková vinutí. Statorová vícefázová vinutí jsou ve většině případů třífázová a mají samostatná fázová vinutí, která mohou být spojena do hvězdy (Y), nebo do trojúhelníku (D) a jsou připojena na napájení třífázovým proudem. Jednotlivé fáze vinutí se skládají z vícezávitových cívek zapojených do série. Sériově zapojené cívky je také možné seskupit ve dvou nebo více paralelních větvích. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem je velmi malá. U moderních indukčních motorů s malým a středním výkonem je tato mezera obvykle menší než 1 mm.

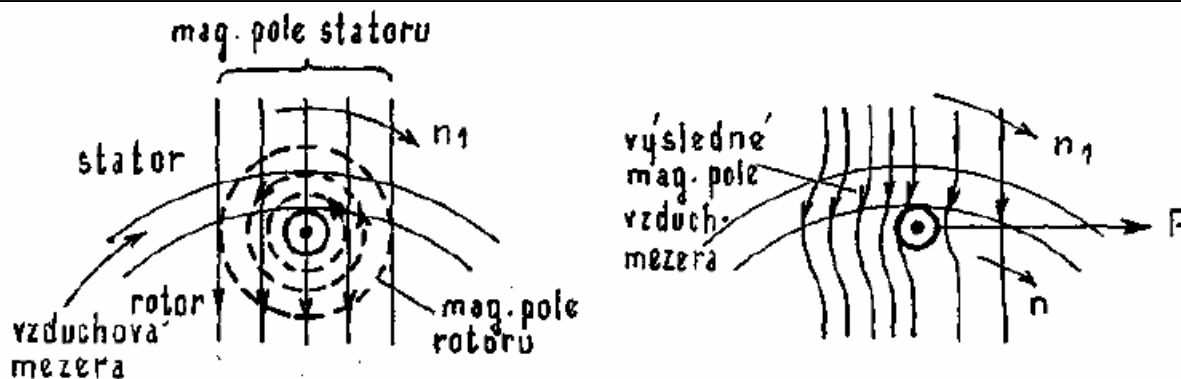
Rotorová vinutí mohou být vyrobena jako tři jednofázová vinutí spojená do hvězdy (méně často do trojúhelníku) a vyvedena na svorky, které jsou propojeny na tři sběrací kroužky, nebo jako klecová vinutí složená z axiálních tyčích spojených na koncích rotorovými kruhy. V prvním případě je asynchronní stroj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



Obrázek 1: Řez AS motorem

1.1 Princip funkce asynchronního stroje

Princip funkce asynchronních motorů je založen na jevu, kdy ke statorovému vinutí je připojeno trojfázové napájení - to vytváří točivé magnetické pole, které protíná vodiče kotvy a indukuje v nich napětí. Vodiči kotvy tedy protéká proud a tyto vodiče kolem sebe také vytváří magnetické pole. Tato dvě pole navzájem působí. Vodič dle pravidla pravé ruky vytváří magnetické pole (viz Obr. 2, kde proud směřuje směrem k nám a siločáry magnetického pole mají tedy směr otáčení hodinových ručiček). V oblasti, kde mají siločáry magnetického pole statoru i rotoru stejný směr, se výsledné magnetické pole zhuští, a naopak v oblasti, kde tato dvě magnetická pole působí proti sobě, je magnetické pole řídkší. Toto hustší magnetické pole vytváří sílu ve směru do řídkšího magnetického pole, vytlačuje rotor a nutí ho tak k otáčení.



Obrázek 2: Vznik tažné síly asynchronního motoru [8]

Je zřejmé, že pro indukování proudu ve vodičích rotoru je třeba rozdílných otáček rotoru a magnetického pole statoru. Odtud jsou tyto stroje pojmenovány jako asynchronní - rotor nemá otáčky synchronní (stejně) s otáčkami točivého magnetického pole.

Rozdíl otáček točivého magnetického pole n_s a otáček rotoru n , vztažený na jednu otáčku točivého pole statoru, se nazývá skluz s .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Kde n_s jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole statorového vinutí.

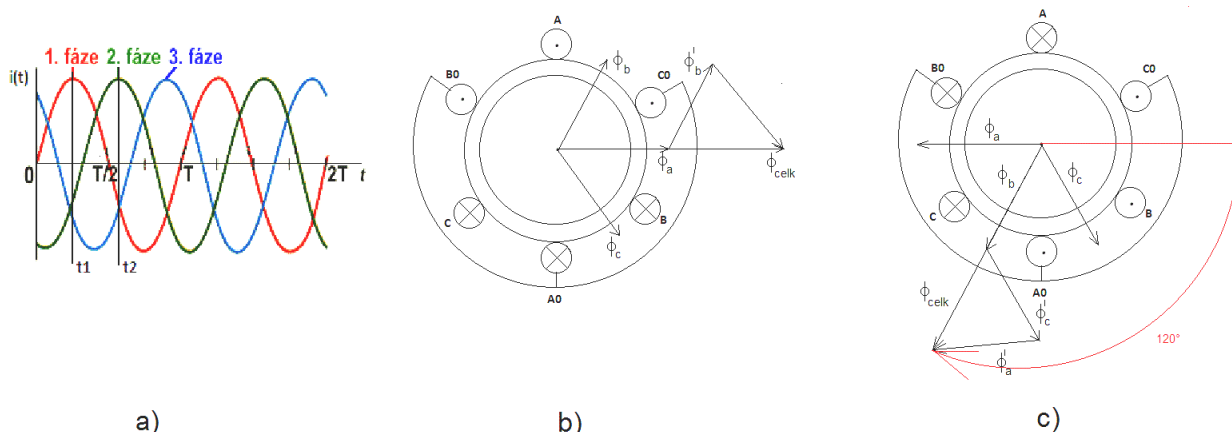
$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p_p} \quad (1.2)$$

Kde f_1 je frekvence sítě [Hz]

p_p je počet polových párů vinutí statoru [-]

1.2 Vznik točivého magnetického pole

Asynchronní stroj potřebuje pro svou funkci točivé magnetické pole. V případě asynchronních generatorů tvoří točivé magnetické pole otáčející se rotor, který se napájený chová jako elektromagnet. V případě asynchronního motoru je vznik točivého magnetického pole složitější. Točivé magnetické pole v tomto případě vzniká při průchodu trojfázového proudu vinutím statoru, kde jsou proudy fázově navzájem posunuty o elektrický úhel 120° . Jednotlivá fázová vinutí si můžeme představit jako tři soustředné cívky znázorněné jako jeden závit se spojenými začátky (A0, B0, C0) v jednom uzlu (zapojení do hvězdy). Jednotlivé konce a začátky vinutí jsou rozloženy po obvodu statoru tak, že konec je posunut o polovinu obvodu statoru. Při tomto uspořádání vzniknou při průchodu proudu cívkami na statoru dva magnetické póly, proto se vinutí v tomto uspořádání říká také dvoupólové. Uspořádání cívek je patrné na Obr. 3



Obrázek 3: Časový průběh fázových proudů a směry proudu vinutími

Na obrázku 3 a) je znázorněn časový průběh tří fázových proudů a vyznačeny dva časové úseky, t_1 a t_2 , který je posunut o elektrický úhel 120° . Na obrázku 3 b) jsou znázorněny směry proudu jednotlivými vinutími. Jednotlivé cívky vytváří magnetické pole a vznikají rozptylové magnetické toky ϕ_A , ϕ_B , ϕ_C . Výsledný rozptylový magnetický tok ϕ_{celk} vznikne jako vektorový součet všech tří rozptylových magnetických toků. Na obrázku c) je patrné, že při časovém posunutí proudů o elektrický úhel 120° se posune i výsledný rozptylový magnetický tok ϕ_{celk} o mechanických 120° . Tato přímá úměra platí jen u dvoupólového vinutí. Při použití vinutí s jiným počtem polů je otočení magnetického pole menší. Úhel natočení magnetického pole je dán vztahem.

$$\alpha_m = \frac{\alpha_{el}}{p_p} \quad (1.3)$$

Kde α_m je úhel natočení magnetického pole [°]

α_{el} je elektrický úhel [°]

p_p je počet pólových párů vinutí statoru [-]

2 RADIÁLNÍ SÍLY

Při provozu asynchronních motorů, vzniká působením magnetických polí mezi rotorem a státorem magnetické napětí působící silově v radiálních směrech. Vznikají zde tedy takzvané radiální síly. Tyto síly pak mohou mít v závislosti na své velikosti za následek vznik vibrací, zvuku a hluku.

Vibrace - jsou omezený vratný pohyb částic pružného tělesa ve střídavě opačných směrech vzhledem ke svému rovnovážnému stavu, kdy tato rovnovážná poloha byla narušena. Aby těleso mohlo vibrovat musí mít těleso dvě důležité vlastnosti: pružnost a hmotnost. Amplituda vibrací je potom maximální výchylka vibrující částice nebo subjektu vyvedeného ze své klidové polohy.

Zvuk - je definován jako vibrace přenášené přes pružné, pevné, kapalné a plynné látky s frekvencí v rozmezí přibližně od 20 do 20 000Hz. Tyto frekvence jsou zachytitelné lidským uchem.

Hluk - je nepříjemný nebo nechtěný zvuk. Rozlišujeme jej na hluk šířený vzduchem a hluk šířící se pevnými látkami.

2.1 Magnetomotorické napětí a třífázové statorové vinutí

Třífázový symetrický stator má tři stejná vinutí prostorově pootočená $2\pi/3$ elektrických stupňů. Stator je napájen třemi sinusovými proudy i_{1A} , i_{1B} , a i_{1C} . Pro vyvážený vstupní proud je amplituda každé fáze stejná a fázově pootočená o $2\pi/3$ elektrických stupňů tedy:[1]

$$i_{1A} = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

$$i_{1B} = \sqrt{2}I_1 \cos\left(\omega t - 2\frac{\pi}{3}\right) \quad (2.2)$$

$$i_{1C} = \sqrt{2}I_1 \cos\left(\omega t - 4\frac{\pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

Prostorové harmonické magnetomotorického napětí vyvolané každou fází jsou potom:

Fáze A (2.4)

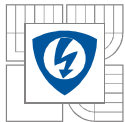
$$\begin{aligned} F_{1Av} &= \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left(\omega t - v\frac{\pi}{\tau}x\right) + \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left(\omega t + v\frac{\pi}{\tau}x\right) \\ &= \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t - v\frac{\pi}{\tau}x\right) + 0(v-1)\frac{2\pi}{3}\right] + \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t + v\frac{\pi}{\tau}x\right) - 0(v+1)\frac{2\pi}{3}\right] \end{aligned}$$

Fáze B

$$\begin{aligned} F_{1Bv} &= \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - v\left(\frac{\pi}{\tau}x - \frac{2\pi}{3}\right)\right] + \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + v\left(\frac{\pi}{\tau}x - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad (2.5) \\ &= \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t - v\frac{\pi}{\tau}x\right) + 1(v-1)\frac{2\pi}{3}\right] + \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t + v\frac{\pi}{\tau}x\right) - 1(v+1)\frac{2\pi}{3}\right] \end{aligned}$$

Fáze C

$$\begin{aligned} F_{1Cv} &= \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) - v\left(\frac{\pi}{\tau}x - \frac{4\pi}{3}\right)\right] + \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + v\left(\frac{\pi}{\tau}x - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \quad (2.6) \\ &= \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t - v\frac{\pi}{\tau}x\right) + 2(v-1)\frac{2\pi}{3}\right] + \frac{1}{2}F_{mv} \cos\left[\left(\omega t + v\frac{\pi}{\tau}x\right) - 1(v+1)\frac{2\pi}{3}\right] \end{aligned}$$



Dle předchozích rovnic jsou harmonické vlny magnetomotorického pole každé fáze navzájem posunuty od sebe o úhel $(v \pm 1)(2\pi)/3$. Harmonické $v = 3k = 3, 9, 15 \dots$ (obecně $v = m_1 k$ kde $k=1, 3, 5 \dots$ a $m_1 = 3$) jsou posunuty o $(v \pm 1)(2\pi)/3 = (3k \pm 1)(2\pi)/3 = 2\pi k \pm 2\pi/3$ nebo 120° . Tedy součet těchto harmonických je roven nule.

kde $k = 1, 2, 3, \dots$, jsou statorové drážkové harmonické

Výsledná magnetomotorická síla symetrického třífázového statorového vinutí napájeného souměrným proudem tedy je.[1]

$$F_1(x, t) = \sum_{v=6k \pm 1}^{\infty} F_{mv} \cos\left(\omega t \pm v \frac{\pi}{\tau} x\right) = F_{mv} \cos(vp\alpha \pm \omega t) \quad (2.7)$$

2.2 Radiální magnetické síly

Prostorové a časové rozdělení magnetomotorických sil vícefázového elektrického stroje napájeného sinusovým a vyváženým proudovým systémem můžeme vyjádřit následujícími rovnicemi.[1]

Pro stator:

$$F_1(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \cos(vp\alpha \pm \omega t) \quad (2.8)$$

Pro rotor:

$$F_2(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{m\mu} \cos(\mu p\alpha \pm \omega t + \Phi_{\mu}) \quad (2.9)$$

Kde $\alpha \dots$ je úhlová vzdálenost od počátku souřadného systému

$p \dots$ je počet pólpárů

$\Phi_{\mu} \dots$ je úhel mezi vektory statoru a rotoru harmonických stejného pořadí

v a $\mu \dots$ jsou počty prostorových harmonických statoru a rotoru v příslušném pořadí

$\omega \dots = 2\pi f$ je pulsace vstupního proudu

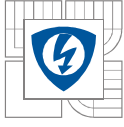
F_{mv} a $F_{m\mu} \dots$ jsou maximální hodnoty v -tých a μ -tých harmonických.

$p\alpha \dots = \pi x / \tau$, 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:

$$b(\alpha, t) = [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)]\Lambda_g(\alpha, t) = b_1(\alpha, t) + b_2(\alpha, t) \quad (2.10)$$

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



Pro stator platí:

$$b_1(\alpha, t) = F_1(\alpha, t)\Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} B_{mv} \cos(vp\alpha \pm \omega t) \quad (2.11)$$

pro rotor:

$$b_2(\alpha, t) = F_2(\alpha, t)\Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{m\mu} \cos(\mu p\alpha \pm \omega_{\mu} t + \Phi_{\mu}) \quad (2.12)$$

Podle Maxwellova napět'ového tenzoru je radiální magnetická síla na jednotku plochy neboli magnetický tlak v každém bodě vzduchové mezery:

$$p_r(\alpha, t) = \frac{1}{2\mu_0} [b^2(\alpha, t) - b_t^2(\alpha, t)] \quad (2.13)$$

Kde μ_0 ... permeabilita vakua

p_r ... radiální tlak ve vzduchové mezeře

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 $b(\alpha, t)$ a platí:

$$\begin{aligned} p_r(\alpha, t) &\approx \frac{b^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad (2.14) \\ &= \frac{b^2(\alpha, t)}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0} [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)]^2 \Lambda_g^2(\alpha, t) \\ &= \frac{1}{2\mu_0} [F_1^2(\alpha, t)\Lambda_g^2(\alpha, t) + 2F_1(\alpha, t)F_2(\alpha, t)\Lambda_g(\alpha, t) + F_2^2(\alpha, t)\Lambda_g^2(\alpha, t)] \\ &= \frac{[b_1(\alpha, t)]^2 + 2b_1(\alpha, t)b_2(\alpha, t) + [b_2(\alpha, t)]^2}{2\mu_0} \end{aligned}$$

Existují tři skupiny vln radiálních sil:

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

$$p_{vr}(\alpha, t) = \frac{[B_{mv} \cos(vp\alpha \pm \omega t)]^2}{2\mu_0} = \frac{B_{mv}^2}{4\mu_0} [1 + \cos(2vp\alpha \pm 2\omega t)] \quad (2.15)$$

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

$$p_{rv\mu}(\alpha, t) = \frac{2B_{mv} \cos(vp\alpha \pm \omega t) B_{m\mu} \cos(\mu p\alpha \pm \omega_{\mu} t + \Phi_{\mu})}{2\mu_0} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2\mu_0} B_{mv} B_{m\mu} \{ \cos[(v\mu\alpha \pm \omega t) - (\mu\mu\alpha \pm \omega_\mu t + \Phi_\mu)] \\
 &+ \cos[(v\mu\alpha \pm \omega t) - (\mu\mu\alpha \pm \omega_\mu t + \Phi_\mu)] \} \\
 &= \frac{1}{2\mu_0} B_{mv} B_{m\mu} \{ \cos[p\alpha(v - \mu) \pm (\omega - \omega_\mu)t - \Phi_\mu] \\
 &+ \cos[p\alpha(v - \mu) \pm (\omega - \omega_\mu)t - \Phi_\mu] \}
 \end{aligned}$$

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

$$p_{ru}(\alpha, t) = \frac{[B_{m\mu} \cos(\mu p \alpha \pm \omega_\mu t + \Phi_\mu)]^2}{2\mu_0} = \frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0} [1 + \cos(2\mu p \alpha \pm 2\omega_\mu t + 2\Phi_\mu)] \quad (2.17)$$

Konstanty

$$\frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0} \quad \frac{B_{mv}^2}{4\mu_0} \quad (2.18)$$

v rovnicích (2.15) a (2.17) 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 (2.15), (2.16) a (2.17) může být obecná rovnice:

$$p_r(\alpha, t) = P_{mr} \cos(r\alpha - \omega_r t) \quad (2.20)$$

Kde P_{mr} je amplituda magnetického tlaku

ω_r je úhlová frekvence

r = 1, 2, 3, ... jsou odpovídající řády radiálních magnetických sil

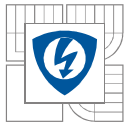
Radiální síly obíhají kolem statoru s úhlovou rychlostí ω_r / r a frekvence $f_r = \omega_r / (2\pi)$. Pro malý počet statorových pólů mohou radiální síly zapříčinit vznik vibrací a tím způsobit i vznik akustického hluku.

2.2.1 Amplituda magnetického tlaku

Amplituda P_{mr} radiálního magnetického tlaku r -tého řádu závisí na harmonických magnetické indukce, která působí při jeho vzniku.[1]

- vybuzení statorových harmonických stejného řádu v

$$P_{mr} = \frac{B_{mv}^2}{4\mu_0} [N/m^2] \quad (2.21)$$



- vybuzení statorových v a rotorových harmonických μ

$$P_{mr} = \frac{B_{mv}B_{m\mu}}{2\mu_0} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.22)$$

- vybuzení rotorových harmonických stejného řádu μ

$$P_{mr} = \frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0} [N/m^2] \quad (2.23)$$

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

2.3 Deformace statorového jádra

Mezi statorem a rotorem vznikají radiální časově proměnné síly o různých počtech prostorových vln. Dá se tedy říci, že zde vznikají postupné sinové vlny. Obecný tvar těchto vln je uveden a vyjádřen vzorcem:[2]

$$p_r = (\alpha, t) = P_{mr} \cos(r\alpha - \omega_r t) \quad (2.24)$$

Kde P_{mr} ... je amplituda magnetického tlaku

ω_r ... je úhlová frekvence

r ... =1,2,3,... jsou odpovídající řády radiálních magnetických sil

Vzniklé síly potom obíhají úhlovou rychlostí ω_r/r , frekvence časových změn tahu je potom rovna

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} \quad (2.25)$$

Hlavním vlivem rozkmitání statoru je tedy počet prostorových vln. Pokud je počet pólpárů u těchto vln malý, může docházet k rozechvění stroje. Naopak při vyšším počtu prostotových vln působí síly na příliš krátkém rameni, tudíž vibrace nenastávají, nebo je jejich velikost velmi malá.

Největší deformace statorového prstence nastává, když je frekvence f_r blízká vlastní mechanické frekvenci statorového systému. Z tohoto hlediska jsou tedy důležité případy kdy $r=0, 1, 2, 3, 4$

I. Vibrační režim $r=0$

Pro tento režim $r=0$ je radiální síla tedy mezi statorem a rotorem na jednotku plochy, tedy měrný tlak vyjádřen jako

$$p_o = P_{mr=0} \cos \omega_0 t \quad (2.26)$$

Tento tlak je rovnoměrně rozložen po obvodu, avšak mění se periodicky v čase, tedy způsobuje radiální kmitání aktivního železa statoru. Rovnice pak vyjadřuje interferenci dvou vln o stejných délkách (stejný počet pólů) a různých rychlostech, (frekvencích).

II. Vibrační režim $r = 1$

Pro tento režim $r = 1$ je tedy radiální síla mezi státorem a rotorem na jednotku plochy, tedy měrný tlak, vyjádřen jako:

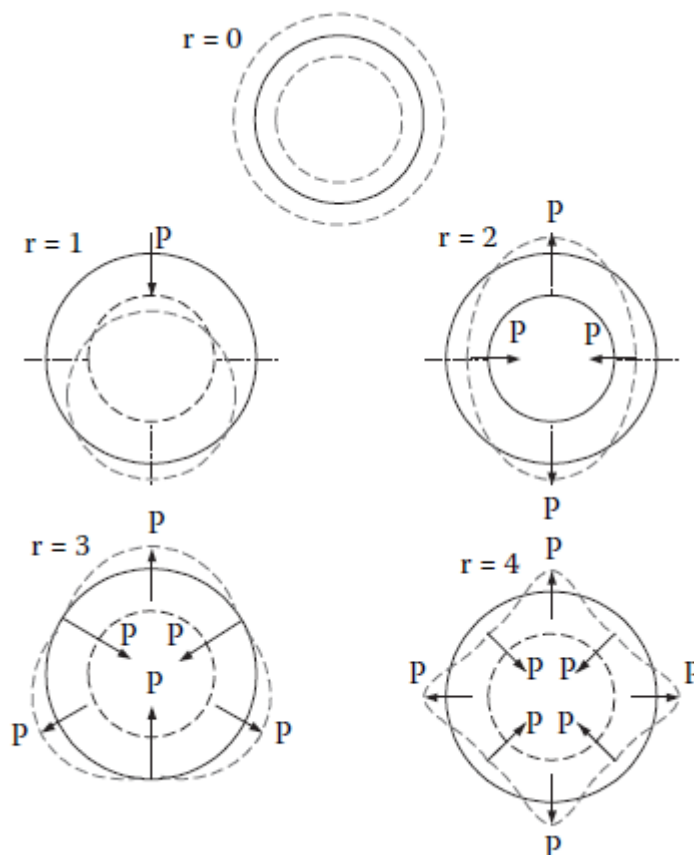
$$p_1 = P_{mr=1} \cos(\alpha - \omega_1 t) \quad (2.27)$$

Tento tlak vyjadřuje jednostranný tah působící na rotor. Úhlová rychlost rotace tahu je ω_1 a při resonanci způsobuje silné vibrace stroje. Rovnice pak vyjadřuje interferenci dvou vln, u nichž se počet pólů liší o jedničku.

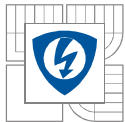
III. Vibrační režim $r = 2, 3, 4, \dots$

Pro tento režim $r = 2, 3, 4, \dots$ se objevují průhyby statorového prstence.

Obrázek 4 zobrazuje prostorové působení sil způsobujících vibrace.



Obrázek 4: Prostorové působení sil



2.4 Faktory ovlivňující radiální síly

2.4.1 Magnetická vodivost vzduchové mezery

Jedná se o druhý důležitý faktor ovlivňující radiální síly, který rovněž závisí na konstrukčním uspořádání stroje. Na velikost mag. vodivosti vzduchové mezery mají vliv:

- a) vliv drážkování na magnetickou vodivost
- b) vliv sycení na otevření drážek
- c) vliv excentricity rotoru
- d) vliv vyniklých pólů
- e) vliv průhybu jha

Vliv průhybu jha může být u asynchronních motorů velmi velký a může způsobit silnou deformaci vzduchové mezery. Tato má poté za následek deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře.

2.4.2 Vliv deformace vzduchové mezery

K deformaci vzduchové mezery dochází vlivem radiálních sil, které způsobují periodickou deformaci jha statoru. Mezi statorem a rotorem tedy působí radiální síly vybuzené pracovní harmonickou magnetického pole ve vzduchové mezeře řádu p . Tyto síly mohou následně vyvolat deformaci vzduchové mezery.

2.4.3 Vliv sycení železa

K deformaci průběhu magnetického pole ve vzduchové mezeře dochází také vlivem sycení magnetického obvodu stroje. Jde především o nasycení hlavního magnetického obvodu, ale také o přesycování krčků zubů u polouzavřených nebo uzavřených drážek.

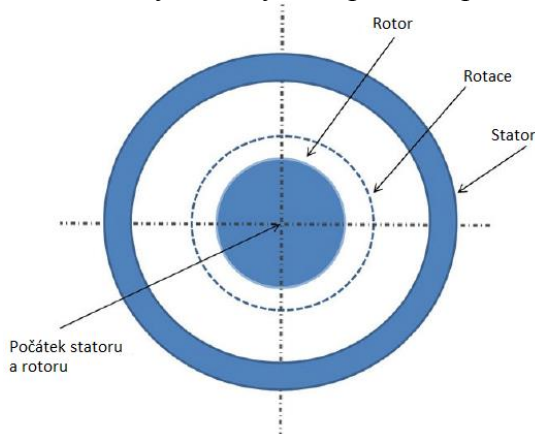
2.5 Excentricita

K častému selhání asynchronního stroje dochází díky excentricitě vzduchové mezery, která vzniká díky výchylce hřídele, nepřesnému umístění rotoru vzhledem ke statoru, opotřebením ložisek apod. Pokud je excentricita velká, pak výsledné radiální síly (nevyváženého magnetického tahu) mohou způsobit tření rotoru o stator, což může způsobit poškození statorového jádra a vinutí.

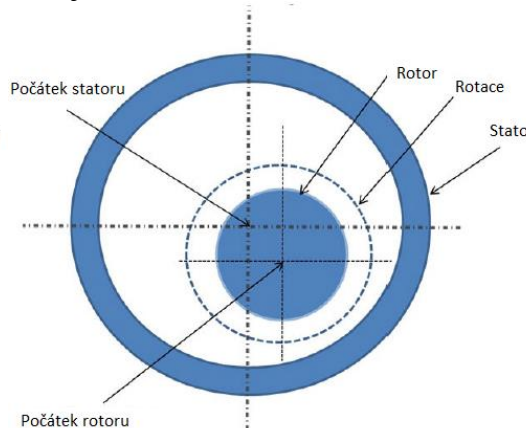
Ačkoliv je žádoucí, aby nebyla excentricita v elektrickém stroji žádná, což by zvyšovalo spolehlivost a zaručovalo vysoký výkon stroje, bohužel nedokážeme vyrobit naprosto dokonalé stroje a proto je zhruba 10% z celkové velikosti excentricity vytvořena již ve výrobním procesu, potažmo při montážním postupu.

Statická excentricita

Statická excentricita je stav, kdy pozice minimální vzduchové mezery se nemění a je způsobena oválným tvarem jádra statoru, nebo nesprávným uložením statorového jádra a ložiska. Velikost statické excentricity se obvykle v průběhu provozu stroje nemění.



Obrázek 5: Motor bez excentricity



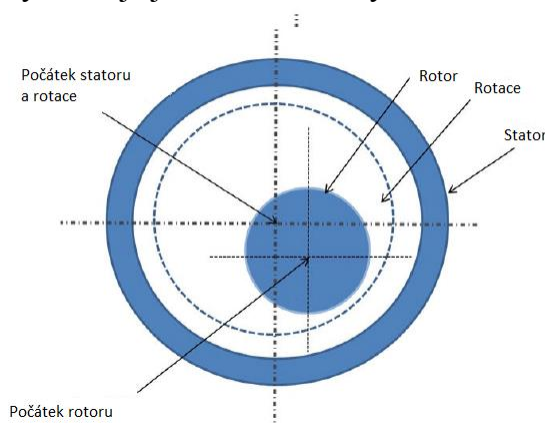
Obrázek 6: Statická excentricita

Dynamická excentricita

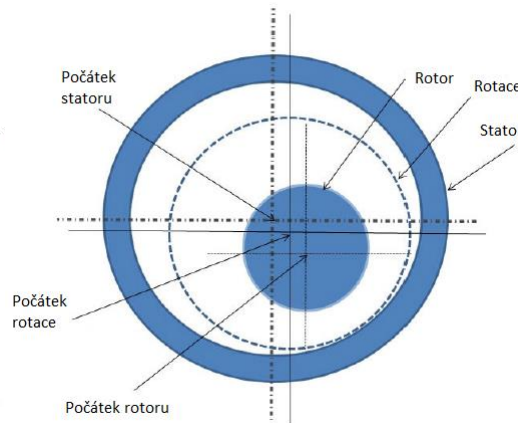
Vzniká, když střed rotoru není ve středu otáčení a tudíž se během otáčení rotoru mění pozice minimální vzduchové mezery. Její velikost se tedy při běhu stroje mění v závislosti na poloze a v závislosti na čase se úroveň excentricity obvykle zvyšuje. Příčinou nevyváženosti může být prohnutá hřídel rotoru, opotřebená ložiska, nebo již dost vysoká úroveň statické excentricity.

Smíšená excentricita

Je stav, kdy existuje jak statická tak dynamická excentricita



Obrázek 7: Dynamická excentricita



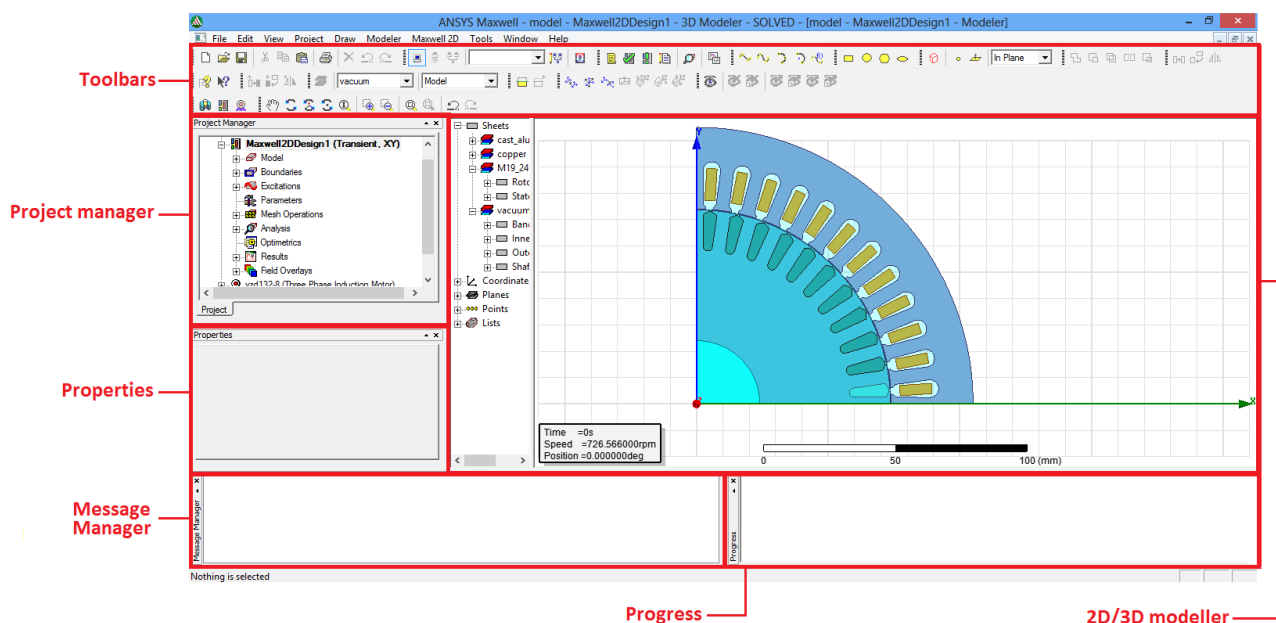
Obrázek 8: Kombinovaná excentricita

3 SIMULAČNÍ PROGRAM ANSYS MAXWELL

3.1 Charakteristika programu

ANSYS Maxwell je program, jenž využívá výpočetní metody MKP pro analýzy, studie a optimalizace elektromagnetických a elektromechanických zařízení, jako jsou motory, transformátory, senzory, akumulátory, magnety atd. Nabízí řešení elektromagnetického a elektrického pole stacionárně, ve frekvenční nebo nestacionární v oblasti časové na 2D nebo 3D obecné geometrii. Program obsahuje nástroje pro parametrizaci nebo optimalizaci navrženého systému.

Hlavní výhodou programu je snadná orientace v grafickém uživatelském rozhraní a jeho snadné použití, kdy uživatel vytvoří nebo importuje geometrii zařízení, specifikuje požadované materiály, nastaví parametry simulace a pomocí zobrazení polí, grafů nebo animací, vyhodnotí výsledky. Právě proto jsme zvolili Ansys Maxwell jako program pro výpočet radiálních sil.



Obrázek 9: Ansoft Maxwell 16 a jeho programové prostředí

Uživatelské prostředí programu Ansoft Maxwell se skládá z několika hlavních oken zobrazujících aktuální stav a změny v projektu. Všechna tato okna jsou klíčová pro správné nastavení projektu.

- Project manager- Zobrazuje hlavní stromovou strukturu návrhu.
- Toolbars - Lišta obsahující nástroje pro konstrukci, včetně výběru typu simulace.
- Properties - Okno, sloužící k nastavení jednotlivých parametrů bloků ze stromové struktury.
- 2D/3D Modeller - Konstrukční plocha programu.
- Message Manager – Okno pro výpis hlášení o programu, projektu či chybách.
- Progress – Okno pro zobrazení průběhu při spuštění simulace

3.2 Rmxpert

RMxpr (Rotation Machine expert) je speciální program pro rychlý návrh a optimalizaci elektrických strojů točivých. Umožňuje porovnávat počáteční návrhy a provádět stovky parametrických analýz během několika vteřin. Lze jím simulovat kritické parametry strojů za normálních provozních podmínek, při stavu bez zatížení i zablokování rotoru. Typickými výstupními veličinami jsou momentové charakteristiky, ztráty, účinnost, indukce ve vzduchové mezeře, indukčnost vinutí a rozptyl.

Na základě vstupních údajů a předdefinovaných šablon elektrických strojů RMxpr provádí analýzu elektrických strojů a automaticky generuje jejich geometrické, obvodové i konečnoprvkové modely. Charakteristiky stroje pak mohou být zpřesněny konečnoprvkovým programem Maxwell nebo systémovým multidoménovým simulačním programem Simplorer, který umožňuje simulaci jeho chování v součinnosti s výkonovou a řídicí elektronikou.

RMxprt využívá klasickou analytickou teorii elektrických strojů točivých a magnetických obvodů. Pro výpočet indukce ve vzduchové mezeře se využívá zpřesněná Schwarz-Christoffelova transformace. Hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy, rozptyl, indukčnost, vliv laminace, způsobu vinutí a některé 3D efekty jako např. zkosení rotoru a vliv čela vinutí se stanovují na základě analytických vztahů. [3]

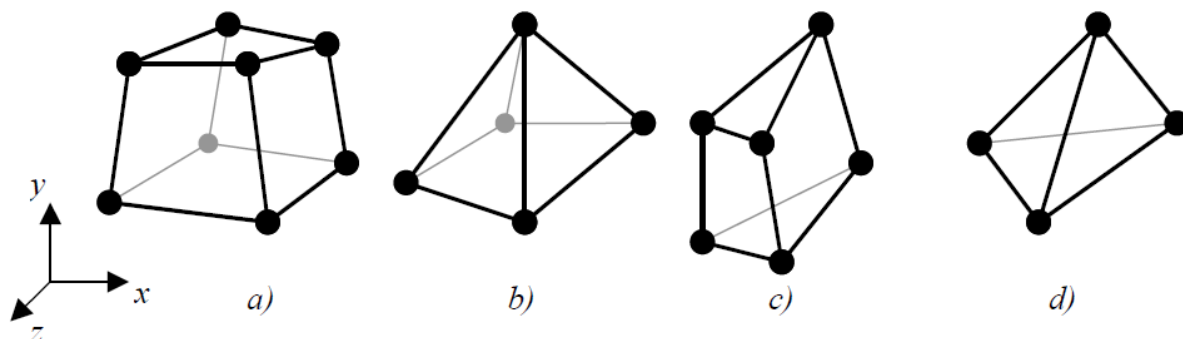
Charakteristika:

- intuitivní grafické uživatelské rozhraní
- předdefinované šablony elektrických strojů točivých
- jednoduché spuštění simulace a automatická tvorba charakteristik a výstupního protokolu
- extrakce obvodových modelů elektrických strojů pro rozsáhlé systémové simulace
- přímá vazba na program Simplorer (simulace elektrických strojů v součinnosti s výkonovou a řídicí elektronikou)
- knihovna lineárních, nelineárních, izotropních, anizotropních a laminovaných materiálů
- parametrické a optimalizační simulace (Optimetrics)

3.3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Mezi numerickými metodami využívaných při simulacích polí se v dnešní době uplatňuje zejména metoda konečných prvků.

Tato metoda spočívá v rozdělení celkové oblasti kontinua na konečný počet prvků (podoblastí) s krajními body v takto vzniklých uzlech. Uzel je tady bod označený vlastními souřadnicemi, pro nějž je definován určitý stupeň volnosti. Tento stupeň volnosti nám charakterizuje odezvu na pole. Hustota a topologie prvku sítě zásadně ovlivňuje kvalitu výsledku a potřebnou kapacitu pro řešení. Vzniklé elementární podoblasti rozdělujeme na oblasti jednorozměrné, dvourozměrné a třírozměrné.



Obrázek 10: Příklad tvarů při užití MKP

Důležitým krokem ve výpočtovém modelování s využitím metody konečných prvků je volba typu prvku. Řadu praktických úloh lze řešit zjednodušeně, bez plného trojrozměrného modelu. Týká se to například úloh rovinných nebo rotačně symetrických. U nich používáme k vytvoření modelu MKP čtyřúhelníky, příp. trojúhelníky, jejichž vrcholy představují uzlové body, v nichž se určují hodnoty obou složek posuvu. Těmito prvky vyplňujeme pouze rovinu, tloušťka prvku je jednotková, nebo se dá zvolit jiná konstantní hodnota.

Posuvy, které je třeba znát v libovolném bodě tělesa, se mezi uzlovými body nahrazují nějakou funkcí (tzv. bázovou). Jsou-li bázové funkce lineární, je průběh posuvu na hraně prvku aproximován přímkou. Přetvoření jsou dána derivací posuvu. To znamená, že hodnota přetvoření odpovídá napětí. Je-li proto rozměr prvku a gradient napětí v oblasti velký, nedostaneme vůbec extrémní hodnoty, ale pouze průměry pro jednotlivé prvky. Je proto třeba volit rozměry prvku natolik malé, aby rozdíly napětí na jeho ploše byly zanedbatelné. Z toho plyne, že čím větší je v dané oblasti gradient napětí (změna hodnoty napětí v závislosti na změně polohy), tím hustší zde musí být konečnoprvková síť.

4 ASYNCHRONNÍ MOTOR TM90-4S

Při vytváření simulace, která má testovat chování daného systému, je nutné mít i možnost otestovat funkci tohoto systému v realitě. Proto, aby bylo toto testování co nejuniverzálnější, je vhodné mít několik zařízení se stejnými parametry s různými typy poruch. Pro naše simulace i měření byl zvolen čtyřpólový asynchronní motor s kotvou nakrátko, konkrétně typ TM90-4S od výrobce EMP-Slavkov se štítkovými údaji:

U	n_n	$\cos \varphi$	f	I_n	P
400/230V	1400 /min	0,78	3~50 Hz	2,7/4,68A	1100W
2p=4	IP 54	Y/D	Typ: TM90-4S B3		

Tabulka 1: Štítkové hodnoty asynchronního motoru TM90-4S

Tento typ motoru byl zvolen z důvodu garantovaných velikostí excentricit, jež byly vytvořeny při výrobě motoru. Jednotlivé motory proto mají každý vlastní typ excentricity. Motor 1 je brán jako motor referenční, jeho excentricita je v případě statické i dynamické excentricity v rozmezí 0 mm až 0,015 mm. Motor 1 tedy budeme považovat za motor bez excentricity. Motor číslo dvě je brán jako motor s dynamickou excentricitou, jejíž velikost je zde garantována v rozmezí 0,040 mm až 0,050 mm. Motor číslo tři je oproti tomu brán jako motor se statickou excentricitou, opět v rozmezí 0,040 mm až 0,050 mm. Poslední typ motoru má oba typy excentricity, tudíž se jedná o kombinovanou excentricitu s velikostí 0,040 mm až 0,050 mm pro statickou i dynamickou.

Označení motoru	Statická excentricita	Dynamická excentricita	Typ excentricity
	[mm]	[mm]	
Motor 1	0 – 0,015	0 – 0,015	Bez excentricity
Motor 2	0 – 0,015	0,040 – 0,050	Dynamická
Motor 3	0,040 – 0,050	0 – 0,015	Statická
Motor 4	0,040 – 0,050	0,040 – 0,050	Kombinovaná

Tabulka 2: Tabulka excentricit jednotlivých motorů TM90-4S

Pro samotnou simulaci je třeba znát i konstrukční parametry stroje. Z technické dokumentace tedy přebíráme parametry a velikosti satorových plechů, rotorových plechů, satorového vinutí a rotorové klece. Všechny tyto údaje slouží k vytvoření modelu v simulačním programu .

5 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU

5.1 Příprava modelu v RM expert

Model asynchronního motoru TM90-4S pro výpočet a simulaci je vytvořen v Modulu RMxprt. Obecné nastavení stroje je provedeno v záložce Machine v projektovém manažeru. Výsledné nastavené parametry asynchronního stroje jsou.

Name	Value	Unit	Evaluated V...
Machine Type	Three Phase Induction Motor		
Number of Poles	4		
Stray Loss Factor	0.01		0.01
Frictional Loss	8	W	8W
Windage Loss	0	W	0W
Reference Speed	1400	rpm	

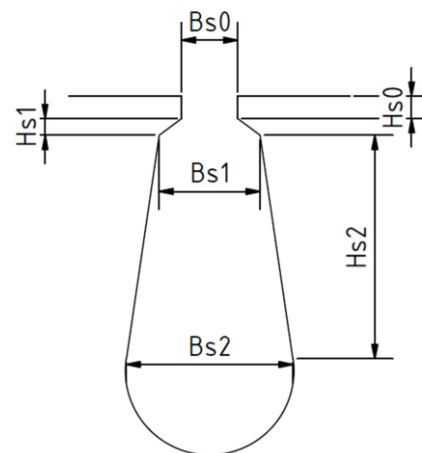
Machine

5.1.1 Stator a jeho parametry

V panelu properties máme v tabulce určen vnější průměr statoru (“outer diameter“=135mm) , vnitřní průměr statoru (“inner diameter“=84,5mm) , počet drážek (“Number of slots“=36) a předdefinovaný typ drážky (“Slot type“) , který je v našem případě zvolen jako typ 2. V záložce nastavení drážky (“Slot“) následně nastavujeme geometrické rozměry drážky, jež jsou uvedeny v tabulce. Rovněž zde nastavíme délku statoru (“length“), jež je rovna 78 mm.

Name	Value	Unit	Evaluated V...
Auto Design	<input type="checkbox"/>		
Parallel Tooth	<input type="checkbox"/>		
Hs0	0.65	mm	0.65mm
Hs1	1	mm	1mm
Hs2	9.25	mm	9.25mm
Bs0	2.4	mm	2.4mm
Bs1	3.9	mm	3.9mm
Bs2	5.5	mm	5.5mm

Slot

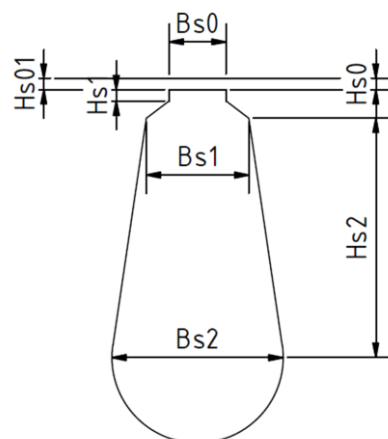


5.1.2 Rotor a jeho parametry

V panelu Properties nastavujeme hodnoty parametrů obdobně jako u statoru. Vnější průměr rotoru (“outer diameter“=135mm) s 28 drážkami.

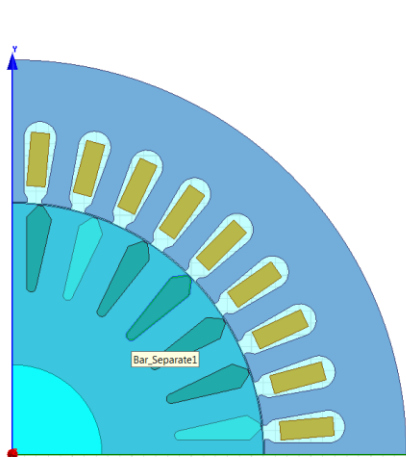
Name	Value	Unit	Evaluated V...
Hs0	0.15	mm	0.15mm
Hs01	0.1	mm	0.1mm
Hs1	2.1	mm	2.1mm
Hs2	11.6	mm	11.6mm
Bs0	0.9	mm	0.9mm
Bs1	4.2	mm	4.2mm
Bs2	1.6	mm	1.6mm

Slot

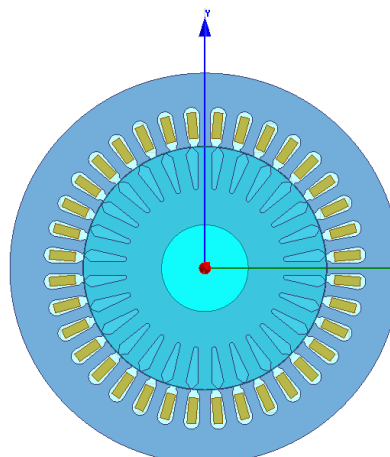


6 EXPORT DO MAXWELL 2D

Pro zkoumání velikosti excentricity je nutno převést zkonstruovaný typ asynchronního motoru z modulu RMXprt do výpočtového prostředí Ansys Maxwell pomocí funkce „create maxwell design“. Po převodu vznikne 2D model, který však program v rámci symetrie defaultně zjednoduší na jednu čtvrtinu. Poněvadž však při excentricitě nebude motor symetrický, je třeba změnit nastavení a převést tento čtvrtinový model na model celý.



Obrázek 11: Čtvrtinový model

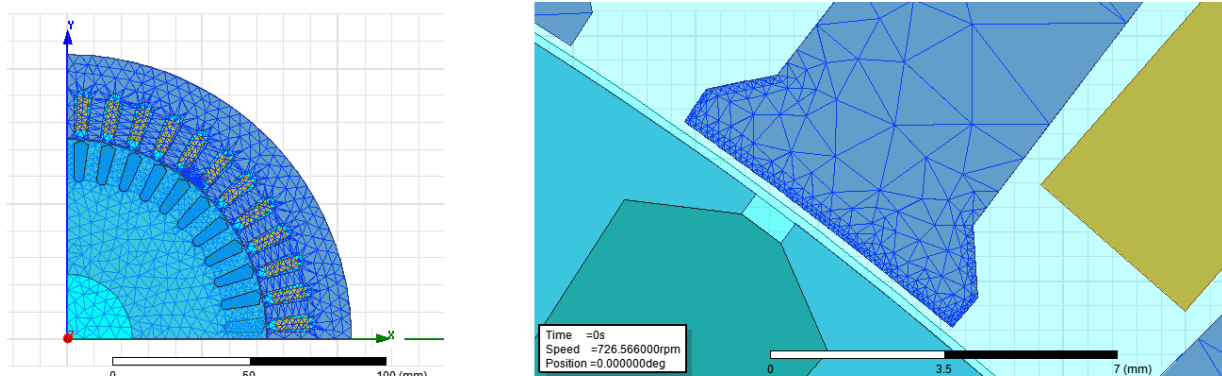


Obrázek 12: Celý model po převodu

Převod nastavíme v záložce Maxwell2Ddesign, kde velikost hodnoty fractions nastavíme na číslo jedna. Po této změně jsou vykresleny zbývající části motoru, avšak převod správně nenastaví všechny konstrukční a parametrické prvky. Do drážek rotoru je třeba domodelovat vinutí a nastavit ho jako klecové pomocí funkce „End connection“. U cívek vinutí statoru je nutné odstranit jejich vazbu s původní čtvrtinou vinutí a nastavit všechny cívkové fáze v drážkách zvlášť, spolu s počtem vodičů v drážce. Jako poslední je třeba nastavit okrajovou podmínku vektorového potenciálu na vnější hranu motoru.

6.1 Mesh

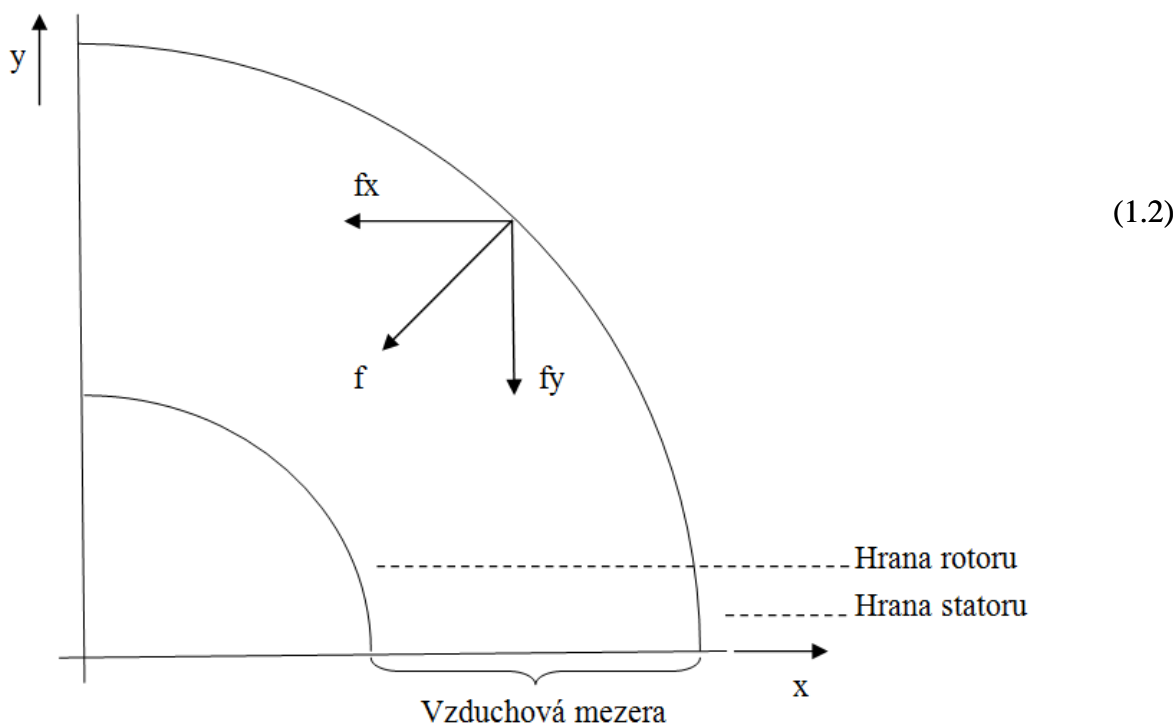
Mesh je aplikace metody konečných prvků na dané těleso. V záložce nastavení meshe „Mesh operations“ lze nastavit velikost a hustotu konečněprvkové sítě použité na těleso. Nelze však opomenout, že s hustějším nastavením sítě se zvýší i výpočtová náročnost, což klade vyšší nároky na výpočetní zařízení. To může zvýšit výpočtovou dobu několikanásobně. Závisí také na složitosti meshovaného modelu. V našem případě bylo aplikování meshe použito zejména na částech důležitých pro výpočet. Mesh byl proto zhuštěn na všech statorových zubech, na všech rotorových zubech a ve vzduchové mezeře mezi zuby tak, aby zde byly aspoň 3 elementy mezi zuby. Výsledný mesh má po aplikaci kolem 23 000 elementů.



Obrázek 13: Síť meshe na jednotlivých částech motoru a jeho detail na zubu satoru

6.2 Nastavení výpočtu simulace a velikosti radiální síly

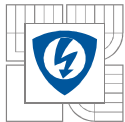
Pro výpočet radiální síly bylo třeba spočítat velikost síly působící na hraně satorových zubů. Proto byl vytvořen oblouk na hraně satorových zubů “*StatorLine*“. Po označení této hrany pomocí výběru hran “*Edge*“ jsme přiřadili funkci pro výpočet síly na hraně “*EdgeForceDensity*“.



Obrázek 14: Rozklad síly na hraně satoru pro výpočet radiální síly

Získaná výsledná data z funkce “*EdgeForceDensity*“ však nevyjadřují působení síly radiálně, proto musíme použít přepočítání pomocí vzorce (6.1). Nejprve je třeba rozložit získanou sílu na skalární velikost v souřadnicích x a y (obr.14) a poté pomocí goniometrických funkcí převést na skutečnou velikost síly v radiálním směru.

$$F_r = F_x \cdot \cos\theta + F_y \cdot \sin\theta \quad (6.1)$$



Pro možnost získání dat musí být vytvořen v programu Maxwell parametr pro tuto radiální sílu Fr. V záložce "Field Overlays" je použit kalkulátor, jež umožní přidat uživatelsky vytvořenou rovnici. Postup vytvoření parametru Fr je následující:

Vytvoření parametru pro radiální sílu > *Zvolit* > *Fields* > *Calculator*
Input > *Quantity* > *EdgeForceDensity*
Vector > *Scal?* > *ScalarX*
Input > *Function* > *Scalar* > *PHI*
Scalar > *Trig* > *Cos*
General > *
Input > *Quantity* > *EdgeForceDensity*

Vector > *Scal?* > *ScalarY*
Input > *Function* > *Scalar* > *PHI*
Scalar > *Trig* > *Sin*
General > *
General > +
Add a nastavit jméno jako *RadialForce*

Takto vytvořený parametr je poté použit k získání dat ve formě tabulky. Požadovaným výstupem je rozložení velikosti radiální síly po hraně statoru. Proto je parametr v záložce pro vytvoření tabulky "Create fields report>data table" přiřazen na oblouk "StatorLine". Po tomto nastavení lze již získat potřebná data o velikosti radiální síly v daném bodě křivky kopírující vnitřní hranu statorových zubů.

Nastavení výstupní simulace provedeme v záložce „Analysis“ kde je nastaven čas simulace. Délka simulace je zde nastavena na dvě sekundy s časovým krokem jedna milisekunda. Stejně hodnoty jsou nastaveny v záložce „Save fields“, jež nám umožní uložit každý časový krok do paměti a následně z něj odečíst velikost simulovaných hodnot. Během dvou sekund je to tedy dva tisíce simulovaných kroků.

6.3 Nastavení excentricit

Nastavení excentricit jednotlivých motorů je provedeno jako posunutí geometrického uspořádání jednotlivých částí. Výchylka 0 mm – 0,015 mm je brána jako nulová, vychylka 0,04 mm - 0,05mm je dosazena jako průměrná hodnota těchto hodnot, tedy 0,045 mm. Nastavení jednotlivých excentricit jsou provedena jako:

Bezporuchový stav: Střed statoru i rotoru je v počátku souřadného systému. Rotor se otáčí kolem počátku a stroj má konstantní velikost vzduchové mezery.

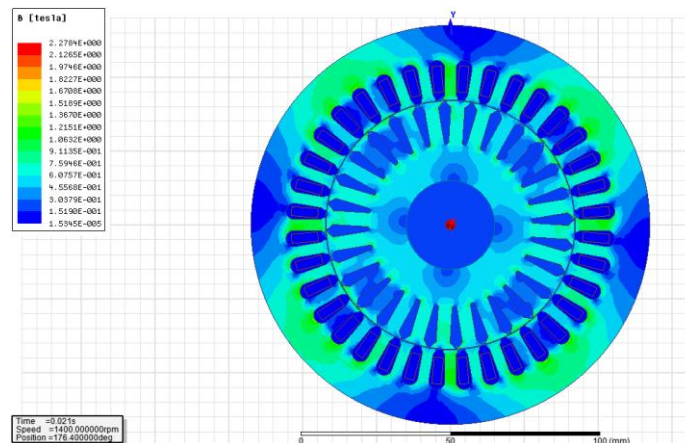
Statická excentricita: Rotor je oproti počátku souřadného systému vychýlen o 0,045 mm a v tomto jeho novém vlastním středu se nachází i jeho osa rotace.

Dynamická excentricita: Rotor je oproti počátku souřadného systému vychýlen o 0,045 mm, avšak centrum jeho rotace zůstává v původním místě počátku souřadného systému.

Kombinovaná excentricita: Rotor je oproti počátku souřadného systému vychýlen o 0,045 mm stejně jako počátek, jež je vychýlen o stejnou hodnotu v opačném směru.

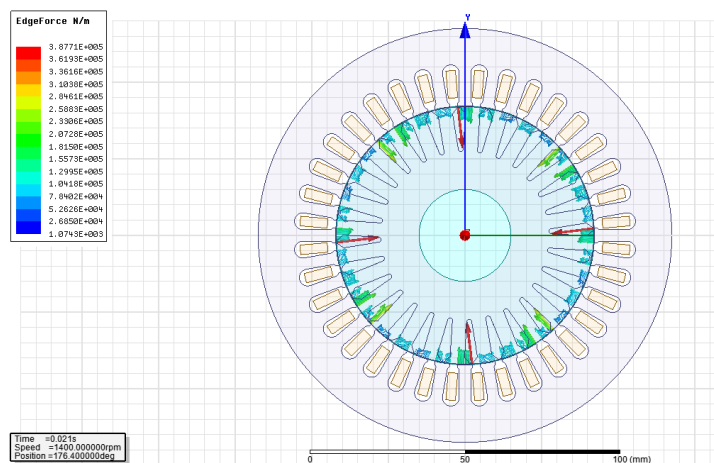
6.4 Rozložení magnetického pole a síly pro bezporuchový stav

Po provedení simulace dostáváme výsledné hodnoty rozložení magnetické indukce B a rozložení velikosti síly na hraně „EdgeForceDensity“. Z obrázku 15 dostáváme pro časový okamžik 21ms velikost magnetické indukce, která zde dosahuje velikosti 2,27T. K největšímu sycení dochází na hranách zubů statoru a rotoru a na čelech vinutí statoru u aktivních fází v daném časovém okamžiku.



Obrázek 15: Rozložení magnetické indukce v motoru pro stroj bez poruchy

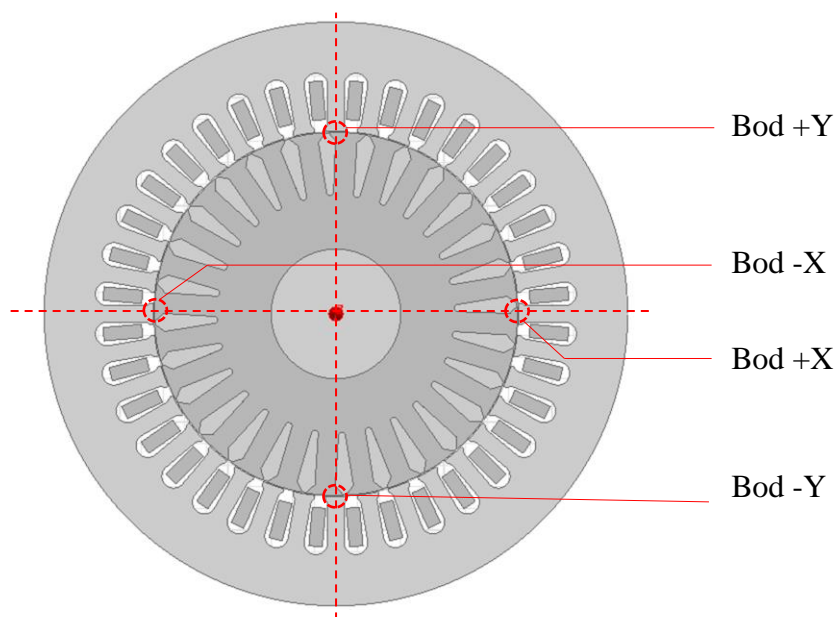
Z obrázku 16 potom získáváme informace o tom, jak na hraně statoru působí síla, která však není přepočtena na radiální směr. I zde je však vidět, že síly působí proti sobě v totožných velikostech a umožňují tak roztáčení rotoru.



Obrázek 16: Rozložení síly „EdgeForceDensity“ na hraně statoru

7 MĚŘENÍ RADIÁLNÍCH SIL

Jak již bylo zmíněno, velikost radiální sil určujeme v simulaci na vnitřním obvodu statoru. Poněvadž pohyb rotoru probíhá v záporném i kladném směru os x a y , je třeba zvolit body odpovídajícím způsobem. K jednoznačnému určení sil tedy bude nejvhodnější odečítat velikost radiální síly po devadesáti stupních, tedy ve čtyřech bodech na vytvořené křivce „StatorLine“, kopírující hranu statorových zubů. Volba bodů je patrná z obrázku 17.



Obrázek 17: Výběr bodů pro měření

Příslušné hodnoty velikosti radiálních sil jsou simulovány pro jednu otáčku rotoru, neboť za tuto dobu se rotor ocitne ve všech zkoumaných polohových stavech. Jelikož je rychlost otáčení 1400 otáček za minutu, přepočtem dostaneme dobu již odpovídá jedna otáčka rotoru tedy 43ms. Předpoklady pro jednotlivé velikosti radiálních sil jsou pro dané excentricity následující.

Bezporuchový stav - Je předpokládána konstantní velikost vzduchové mezery po celou dobu otáčky, magnetický tah by měl být rovnoměrný, tudíž by i velikosti radiálních sil v jednotlivých bodech měli dosahovat totožných hodnot.

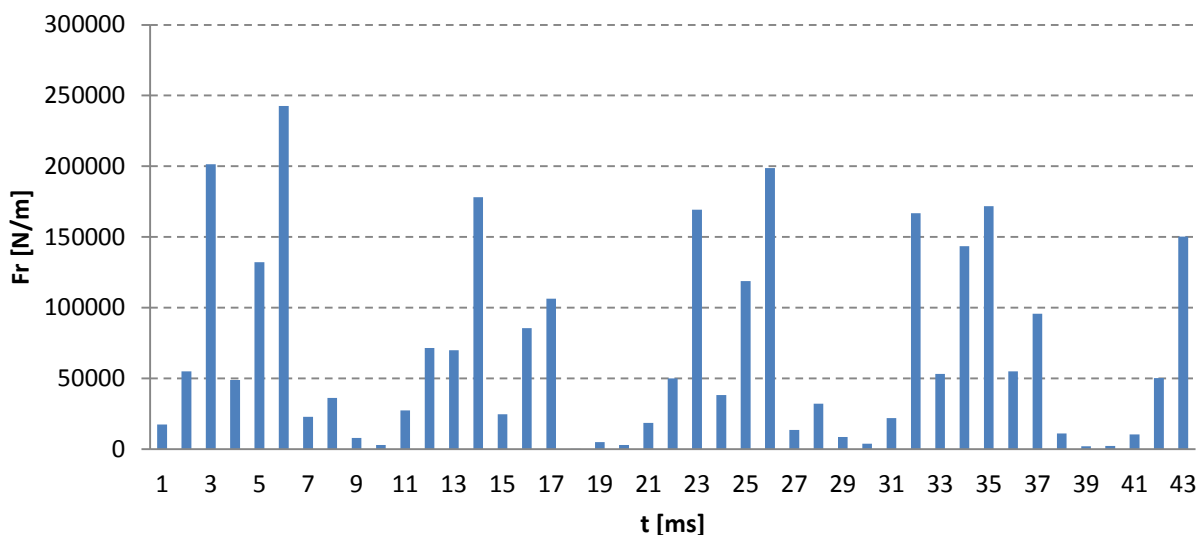
Statická excentricita - Velikost vzduchové mezery není konstantní. Rotor je posunut ve směru $-X$ stejně jako jeho osa otáčení. Ve směru $-X$ je tedy velikost vzduchové mezery 0,205 mm, kdežto ve směru $+X$ je 0,295 mm. Je zde tedy předpoklad, že ve směru $-X$ bude kvůli menší velikosti vzduchové mezery větší magnetický tah, tudíž větší velikost radiální síly.

Dynamická excentricita - Stejně jako u statické excentricity není velikost mezery konstantní a rotor je vychýlen ve směru $-X$. Otáčející rotor má však střed rotace ve středu souřadného systému a proto by se minimální velikost vzduchové mezery 0,205 mm měla pohybovat rovnoměrně po celém obvodu 360 stupňů za jednu otáčku.

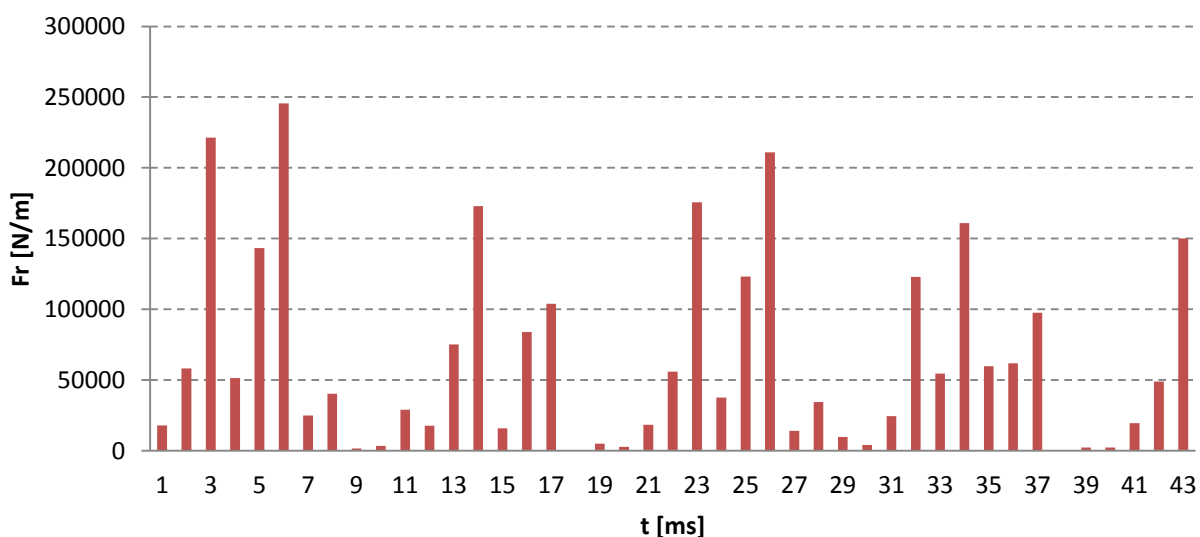
Kombinovaná excentricita - Její vlastnosti by měli kombinovat vlivy statické a dynamické excentricity.

7.1 Bezporuchový stav

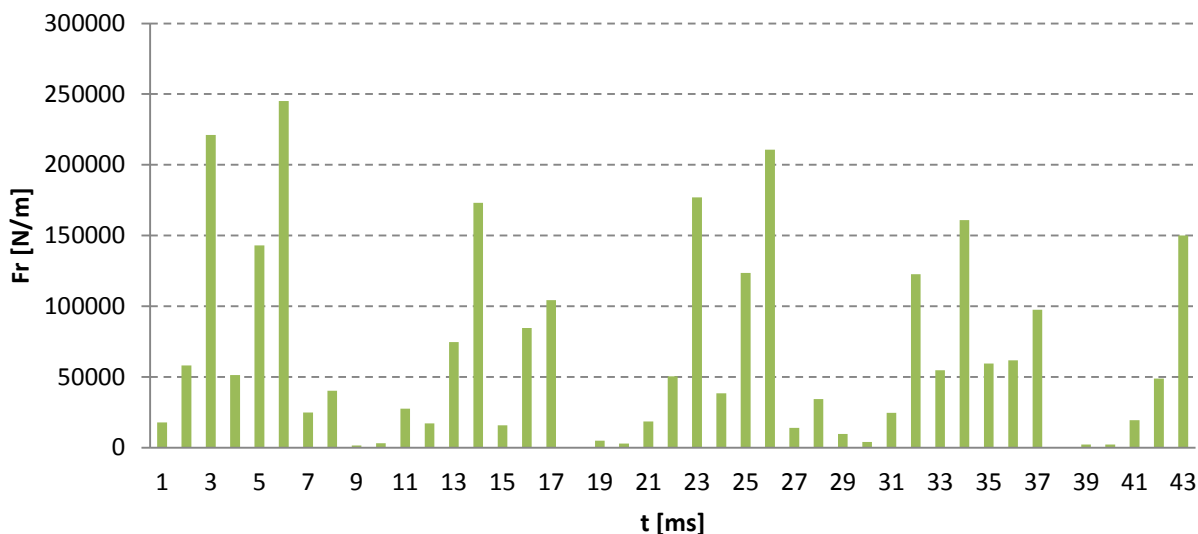
Následující grafy, vyobrazující velikost radiálních sil v závislosti na časovém průběhu jedné otáčky, jsou vyneseny pro bezporuchový stav, tedy pro motor, jehož excentricita je v každém směru osy x,y nulová. Grafy jsou zobrazeny postupně ve směru bod +X, bod -Y, bod -X, bod +X. V každém časovém okamžiku je vynesena maximální velikost síly, dosažené v daném bodě. Tyto velikosti následně budou sloužit k porovnání.



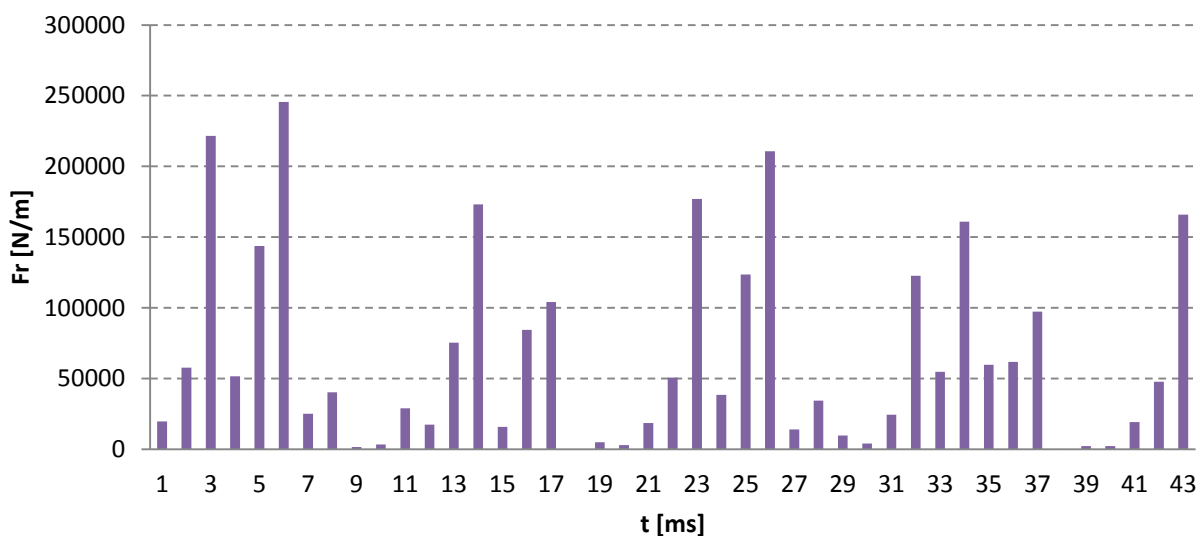
Obrázek 18: Velikost radiální síly v bodě +X



Obrázek 19: Velikost radiální síly v bodě -Y



Obrázek 20.: Velikost radiální síly v bodě -X

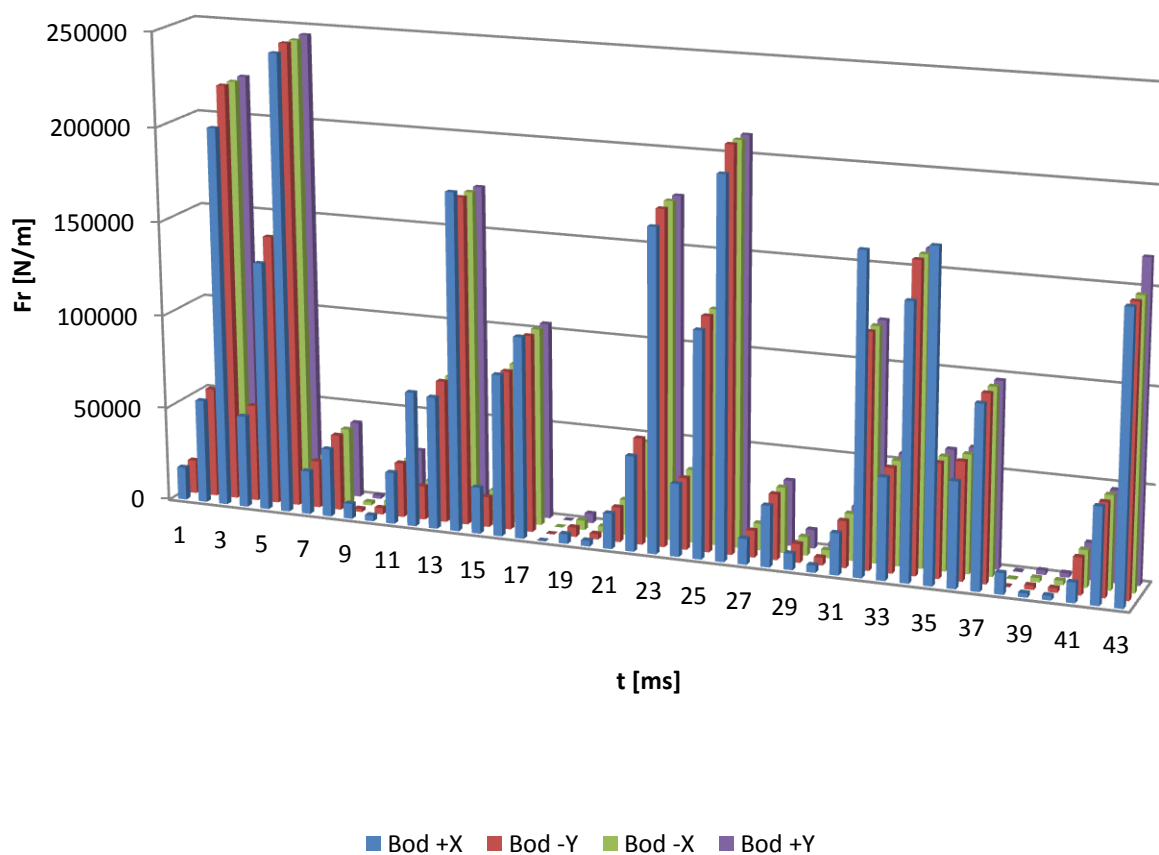


Obrázek 21.: Velikost radiální síly v bodě +Y

Simulace v bodě +X dosahuje největší velikosti v čase 6ms. Hodnota radiální síly v tomto čase se pohybuje těsně pod hranicí 250kN/m. Průměrná velikost radiální síly Fr je za tuto dobu okolo 67 kN/m. V druhém grafu pro bod -Y je také největší velikosti radiální síly dosaženo v čase 6ms. Rovněž i zde má největší velikost síly hodnotu těsně pod 250kN/m. Průměrná velikost radiální síly je zde 64kN/m. V grafu pro bod -X je velikost Fr obdobná jako u grafu předchozího, stejně jako průměrná velikost 64kN/m. U posledního bodu +Y je situace stejná a maximální síla je zde taktéž téměř 250kN, avšak průměrně je zde síla 65 kN/m, tedy nepatrně vyšší.

Dostáváme tedy výsledné hodnoty, z nichž plyne, že velikost sil je ve všech čtyřech bodech modelu, v nichž je odečítání hodnot prováděno, podobná. Potvrzuje se tedy předpoklad, že je-li velikost vzduchové mezery stejná ve všech směrech, nedochází ke zvětšování magnetického tahu mezi statorem a rotorem v užších místech, tudíž dosahuje velikost radiální síly F_r ve zkoumaných bodech při stejném čase podobné velikosti, což potvrzují zobrazené grafy.

Z grafu, porovnávajícího jednotlivé velikosti síly F_r , je názorně vidět předchozí tvrzení. Hodnoty jsou ve všech časových okamžicích téměř podobné. Zvýšení či snížení hodnot od průměru je možné vysvětlit vlivem nepřesnosti meshe, či z aproximací zaoblených ploch na úsečky, jež program provádí automaticky.

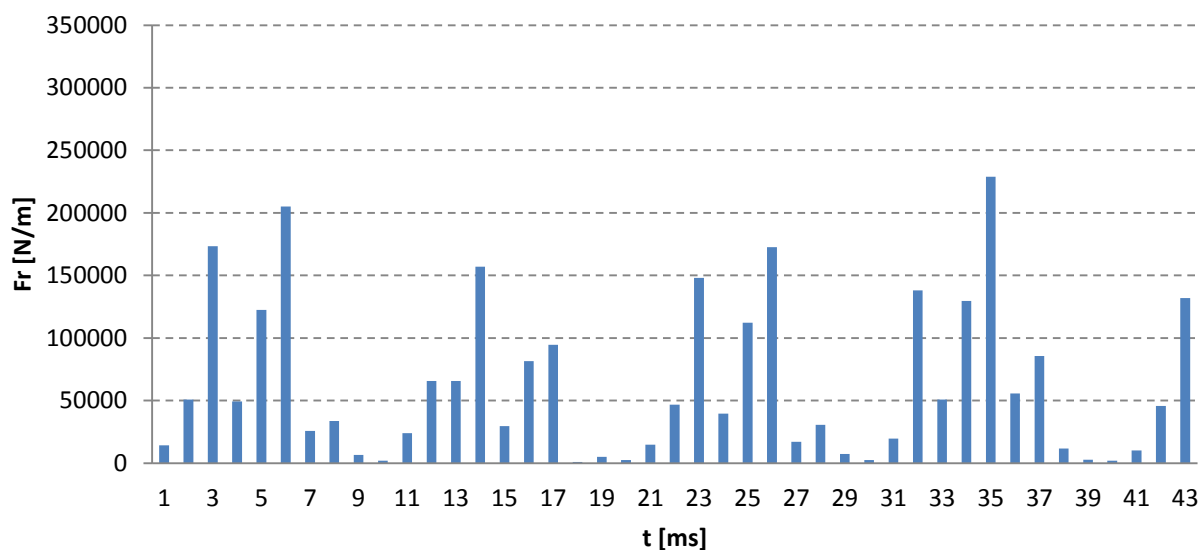


Obrázek 22: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor bez excentricity

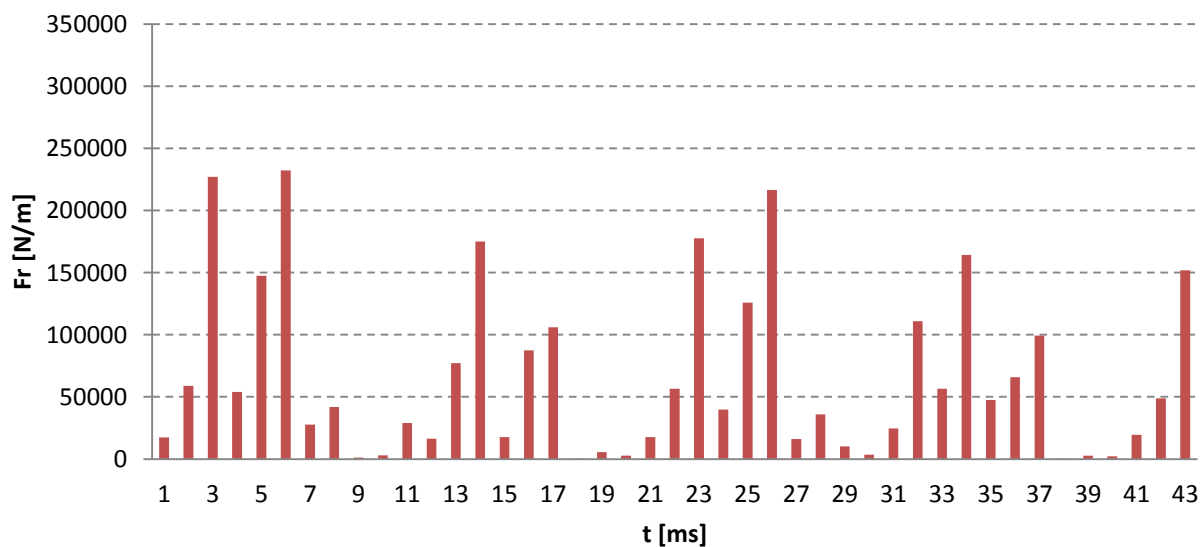
Za výsledek simulace bezporuchového tj. bezexcentrického stavu lze tedy považovat, že nevzniká-li v elektrickém stroji excentricita, nemění se ani velikost radiálních sil v daných osách.

7.2 Statická excentricita

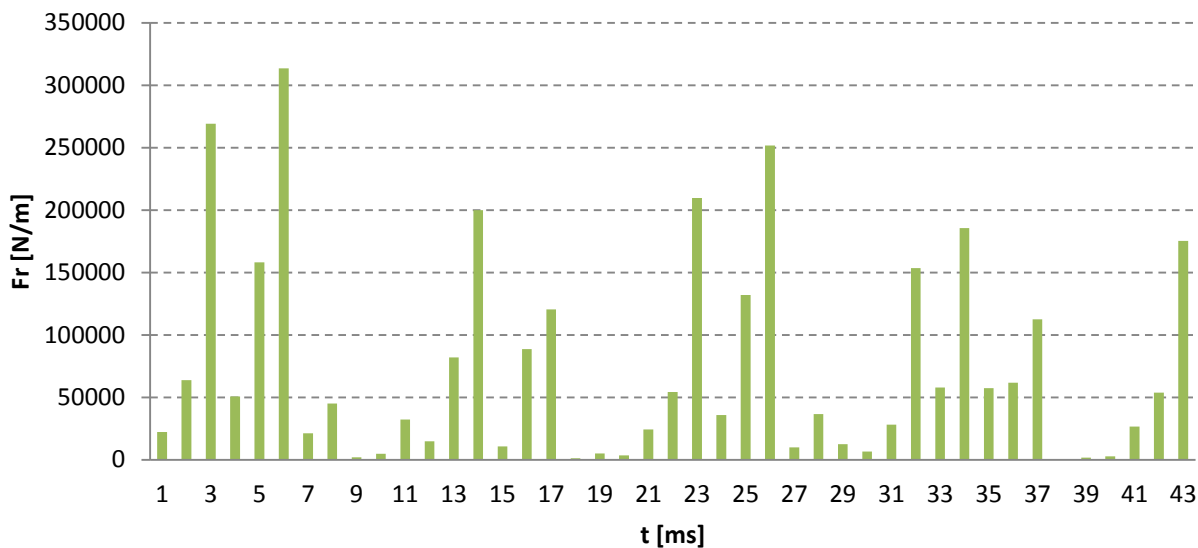
Následující grafy vyobrazují velikost radiálních sil v závislosti na časovém průběhu jedné otáčky jsou vyneseny pro statickou excentricitu, tedy motor, jehož rotor je vychýlen v jednom směru o určitou velikost, mající o tuto hodnotu posunutou i osu rotace. Grafy jsou zobrazeny postupně ve směru bod +X, bod -Y, bod -X, bod +X. V každém časovém okamžiku je vynesena maximální velikost síly dosažené v daném bodě. Tyto velikosti následně budou sloužit k porovnání a zjištění vlivu excentricity.



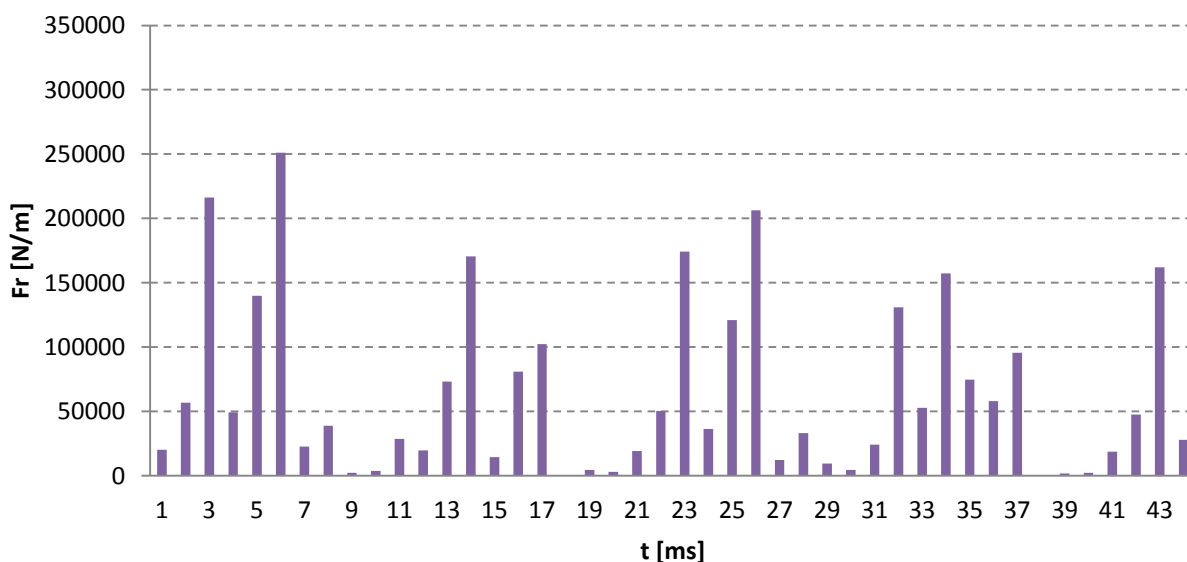
Obrázek 23: Velikost radiální síly v bodě +X



Obrázek 24: Velikost radiální síly v bodě -Y



Obrázek 25: Velikost radiální síly v bodě -X

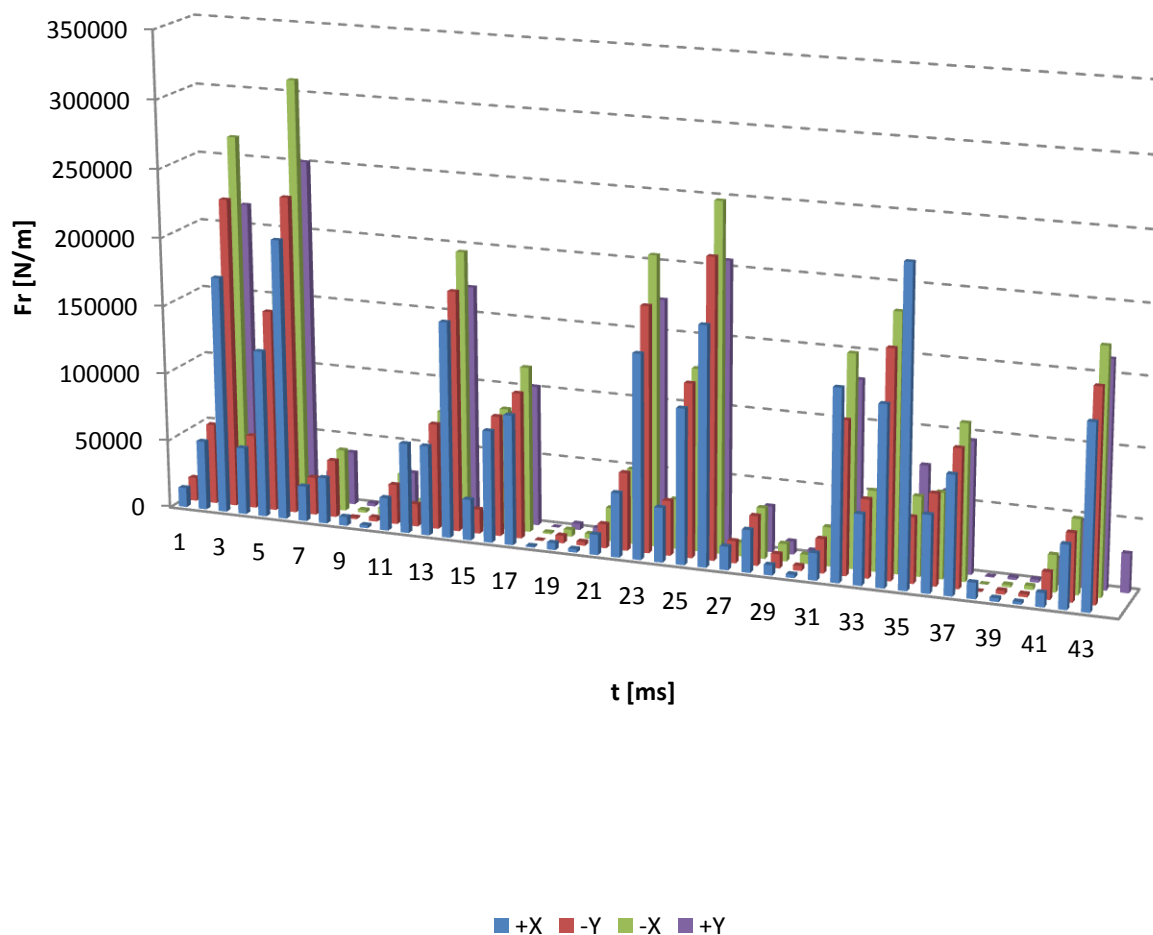


Obrázek 26: Velikost radiální síly v bodě +Y

Z grafu na obrázku 23 zjišťujeme, že největší velikosti radiální síly, je dosaženo ve čase 35ms. Hodnota síly v tomto čase se pohybuje kolem 230kN/m. Průměrná velikost radiální síly F_r je za dobu jedné otáčky 62kN/m. V druhém grafu pro bod -Y je největší velikosti radiální síly dosaženo v čase 6ms. Zde má největší velikost síly hodnotu okolo 240kN/m. Průměrná velikost radiální síly je zde 64kN/m. V grafu pro bod -X je velikost F_r daleko větší a v čase 6ms dosahuje hodnoty okolo 310kN/m, což je daleko více než ve směru +X. U posledního bodu +Y jsou hodnoty velmi podobné jako u bodu -Y a velikost maximální síly je zde 250kN/m při průměrné hodnotě 64kN/m, tedy téměř totožné hodnoty.

Ze získaných dat plyne, že velikost sil je v bodech $-Y$ a $+Y$ podobná, zatímco v bodech $+X$ a $-X$ se viditelně liší. Rotor byl při modelování v simulačním programu posunut spolu s jeho osou rotace právě v záporném směru osy X . Ve směru $-X$ tedy došlo ke zmenšení vzduchové mezery o $0,045$ mm. Potvrzuje se nám tedy předpoklad, že ve směru $-X$ dochází ke zvětšení magnetického tahu, zatímco ve směru $+X$ k jeho zmenšení. V záporném i kladném směru osy Y jsou naopak hodnoty radiálních sil podobné, neboť v těchto směrech nedochází k vychylování.

Z grafu porovnávající jednotlivé velikosti síly F_r vidíme, že síla ve směru $-X$ dosahuje nejvyšších hodnot, což kontrastuje se směrem $+X$, kde naopak v porovnání se všemi ostatními jsou hodnoty nejmenší.

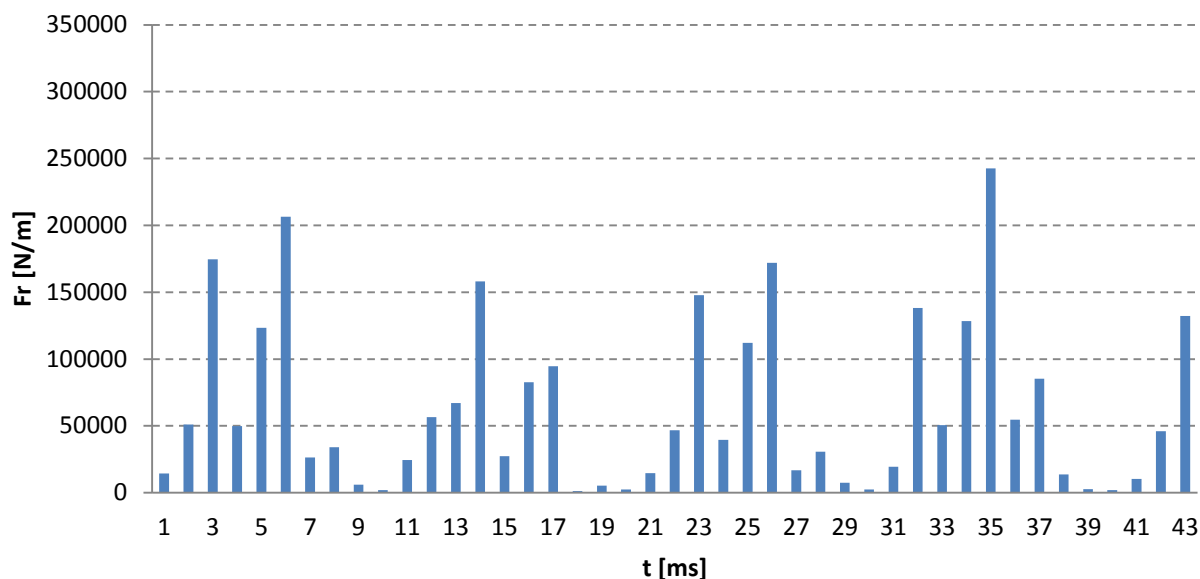


Obrázek 27: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor se statickou excentricitou

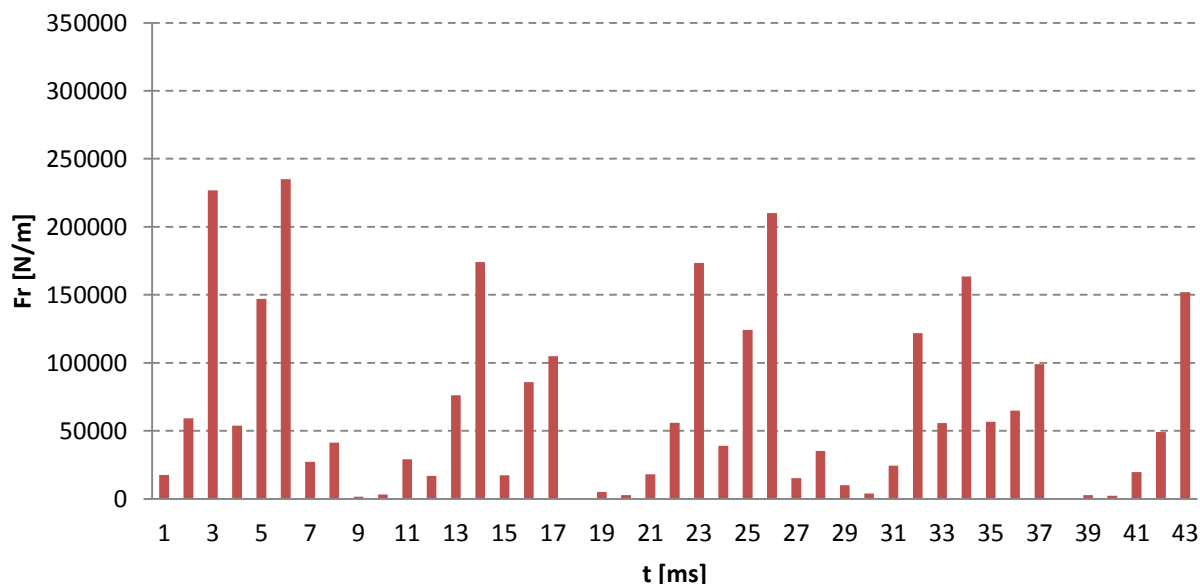
Za výsledek simulace se statickou excentricitou lze tedy považovat, že vznikne-li v elektrickém stroji statická excentricita, dojde k zvětšení radiálních sil v místech, kde excentricita způsobí nejmenší vzduchovou mezery.

7.3 Dynamická excentricita

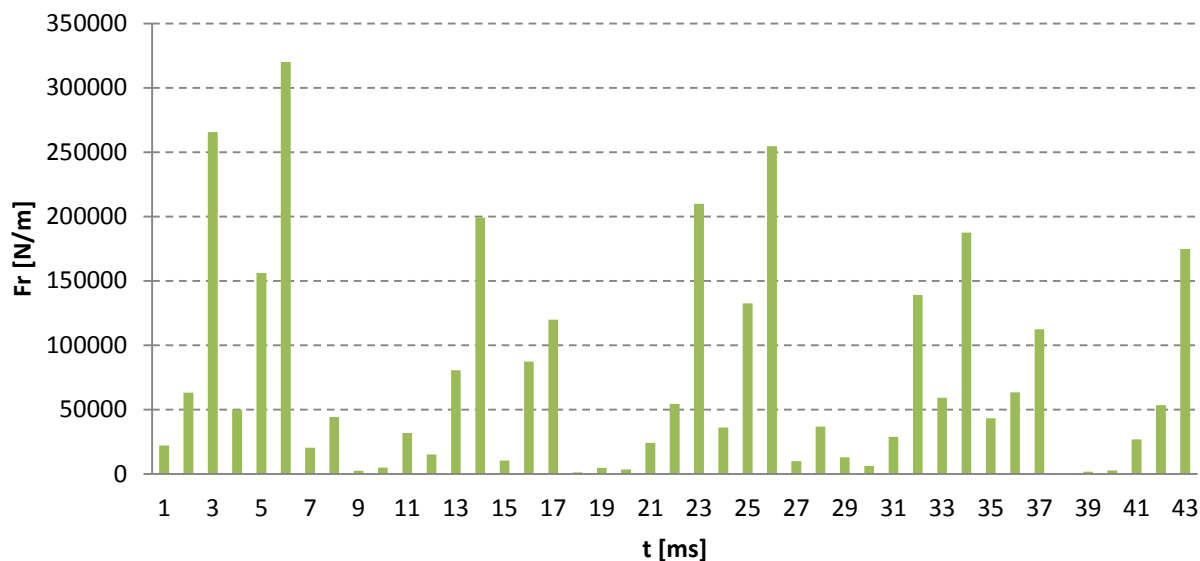
Následující grafy, vyobrazující velikost radiálních sil v závislosti na časovém průběhu jedné otáčky, jsou vyneseny pro dynamickou excentricitu, tedy motor, jehož rotor je vychýlen v jednom směru o určitou velikost, avšak s osou rotace ve středu stroje. Grafy jsou zobrazeny postupně ve směru bod +X, bod -Y, bod -X, bod +X. V každém časovém okamžiku je vynesena velikost maximální velikosti síly dosažené v daném bodě. Tyto velikosti následně budou sloužit k porovnání a zjištění vlivu excentricity.



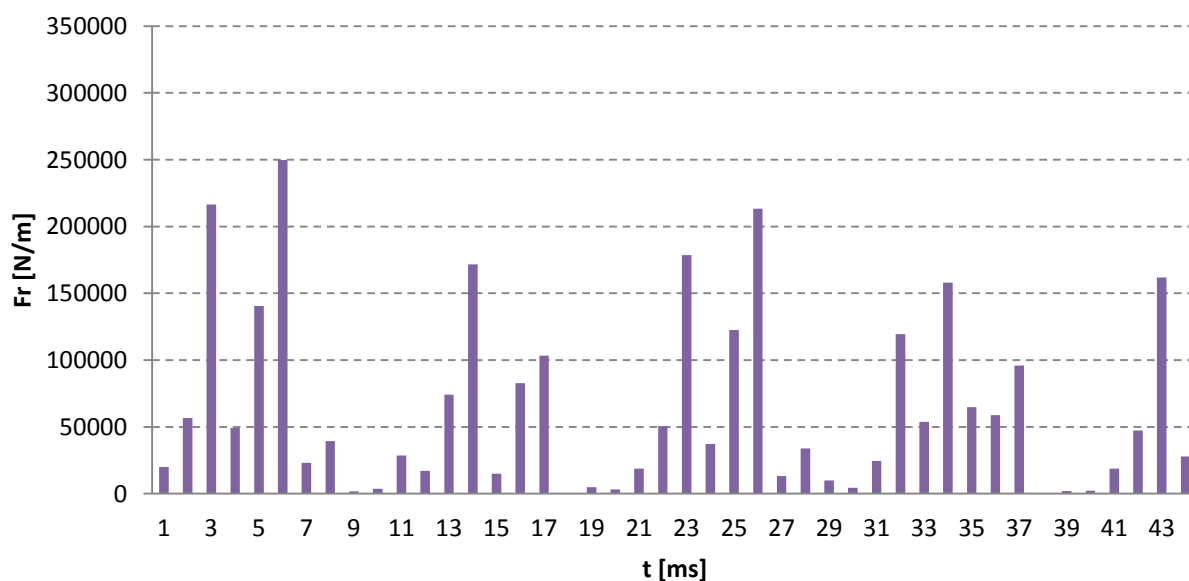
Obrázek 28: Velikost radiální síly v bodě +X



Obrázek 29: Velikost radiální síly v bodě -Y



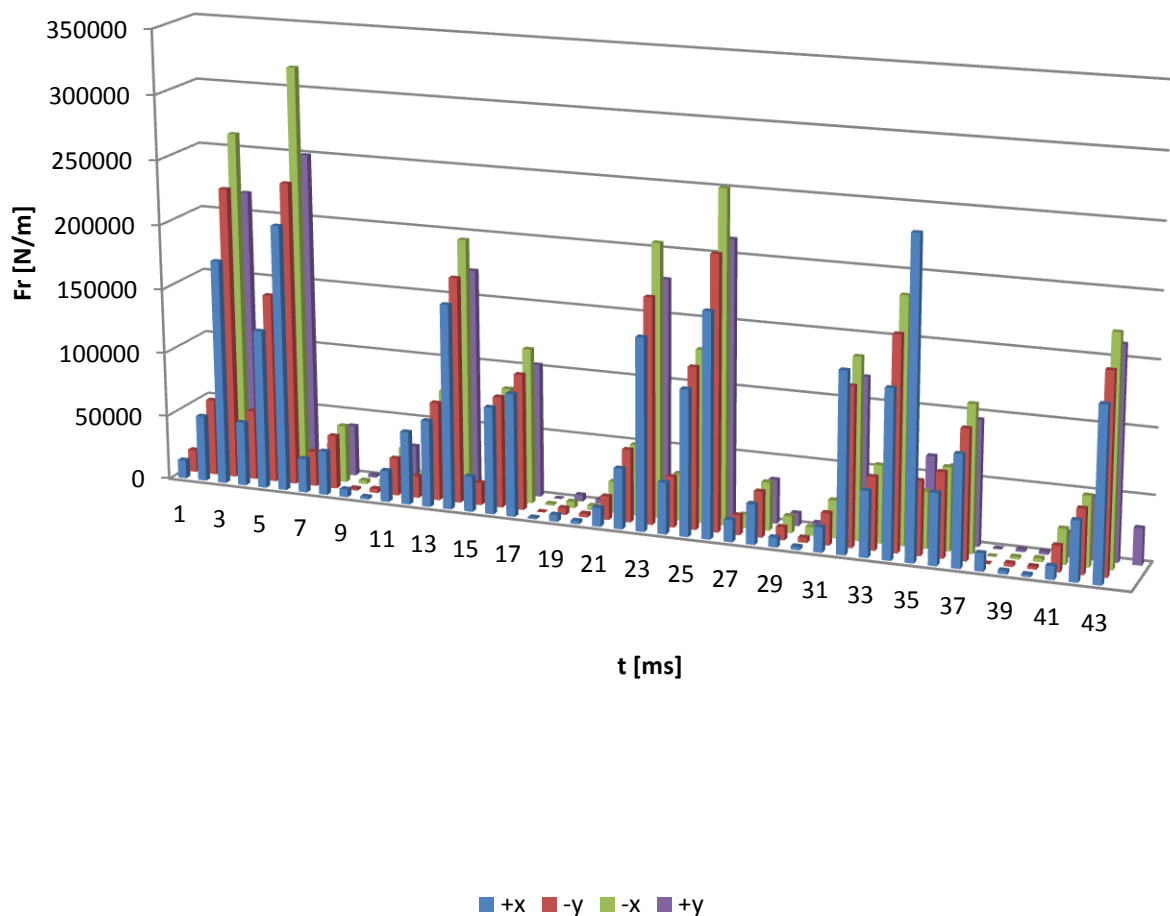
Obrázek 30: Velikost radiální síly v bodě -X



Obrázek 31: Velikost radiální síly v bodě +Y

Pro graf velikosti radiální síly v bodě +X je její největší velikost přes 240kN/m v čase 35ms. Průměrná velikost síly v tomto časovém rozmezí je v tomto případě 63kN/m. Pro graf -Y je nejvyšší síly Fr dosaženo v čase 6ms a její velikost dosahuje 235 kN/m. Průměrná hodnota je poté 65 kN/m. Pro bod -X je dosažena velikost síly 320 kN/m v čase 6ms s průměrnou velikostí síly 72kN/m. Na posledním grafu potom v bodě +Y dosahuje maximální síla Fr hodnoty 250kN/m při průměrné hodnotě 64kN/m.

Výsledky tedy ukazují, že radiální síla působí u dynamické excentricity nepatrně silněji než u excentricity statické. Z předpokladu bychom očekávali, že velikost sil bude spolu s posouvající se zmenšenou velikostí vzduchové mezery podobná v každém pozorovaném bodě +X, -Y, -Y a +Y. V bodě -X je však větší. Na tento stav má však vliv několik faktorů, jako závislost celé simulace na poloze rotoru v daných časových okamžicích a dále závislost na velikosti proudu v dané drážce při přepínání fází.

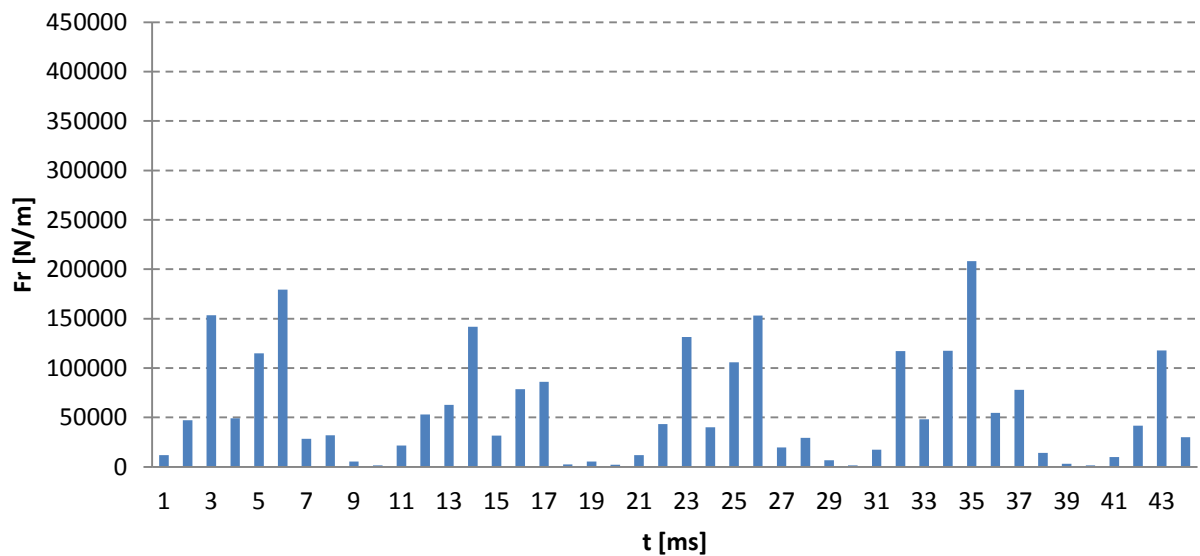


Obrázek 32: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor s dynamickou excentricitou

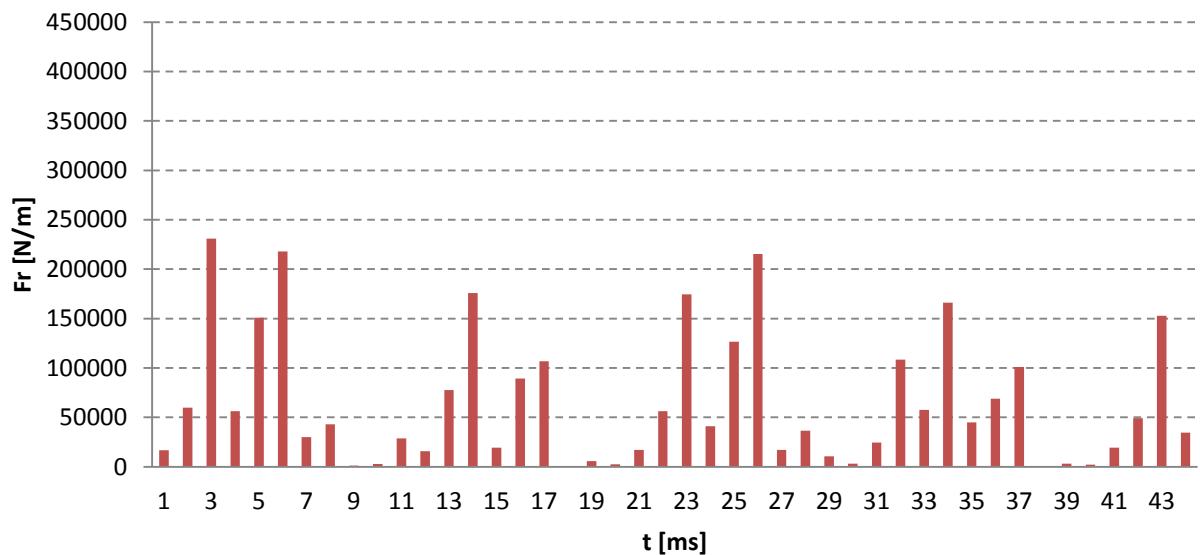
Výsledkem simulace s dynamickou excentricitou je tedy zjištění, že vznikne li v elektrickém stroji dynamická excentricita, dojde ke zvýšení radiální síly v místech se zúženou vzduchovou mezerou, avšak při simulaci záleží na okolnostech, v jakých se nachází ostatní stavy motoru.

7.4 Kombinovaná excentricita

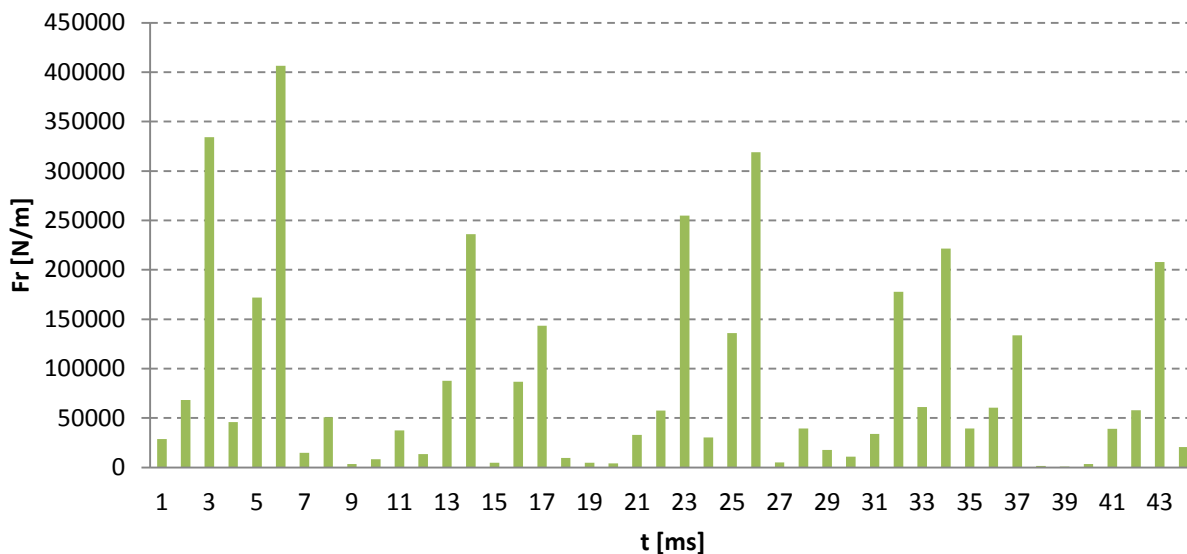
Pro poslední simulaci jsou níže vyneseny grafické závislosti, vyobrazující velikost radiálních sil v závislosti na časovém průběhu jedné otáčky. Tyto závislosti jsou vyneseny pro kombinovanou excentricitu. Grafy jsou zobrazeny postupně ve směru bod +X, bod -Y, bod -X, bod +X. V každém časovém okamžiku je vynesena velikost maximální síly dosažené v daném bodě. Tyto velikosti následně budou sloužit k porovnání a zjištění vlivu excentricity.



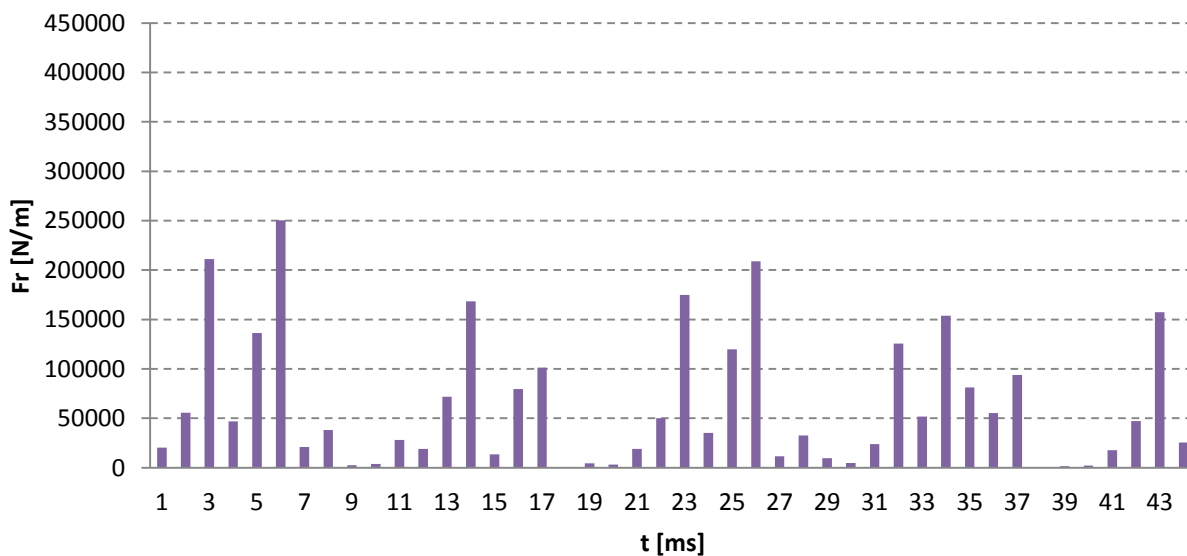
Obrázek 33: Velikost radiální síly v bodě +X



Obrázek 34: Velikost radiální síly v bodě -Y



Obrázek 35: Velikost radiální síly v bodě -X

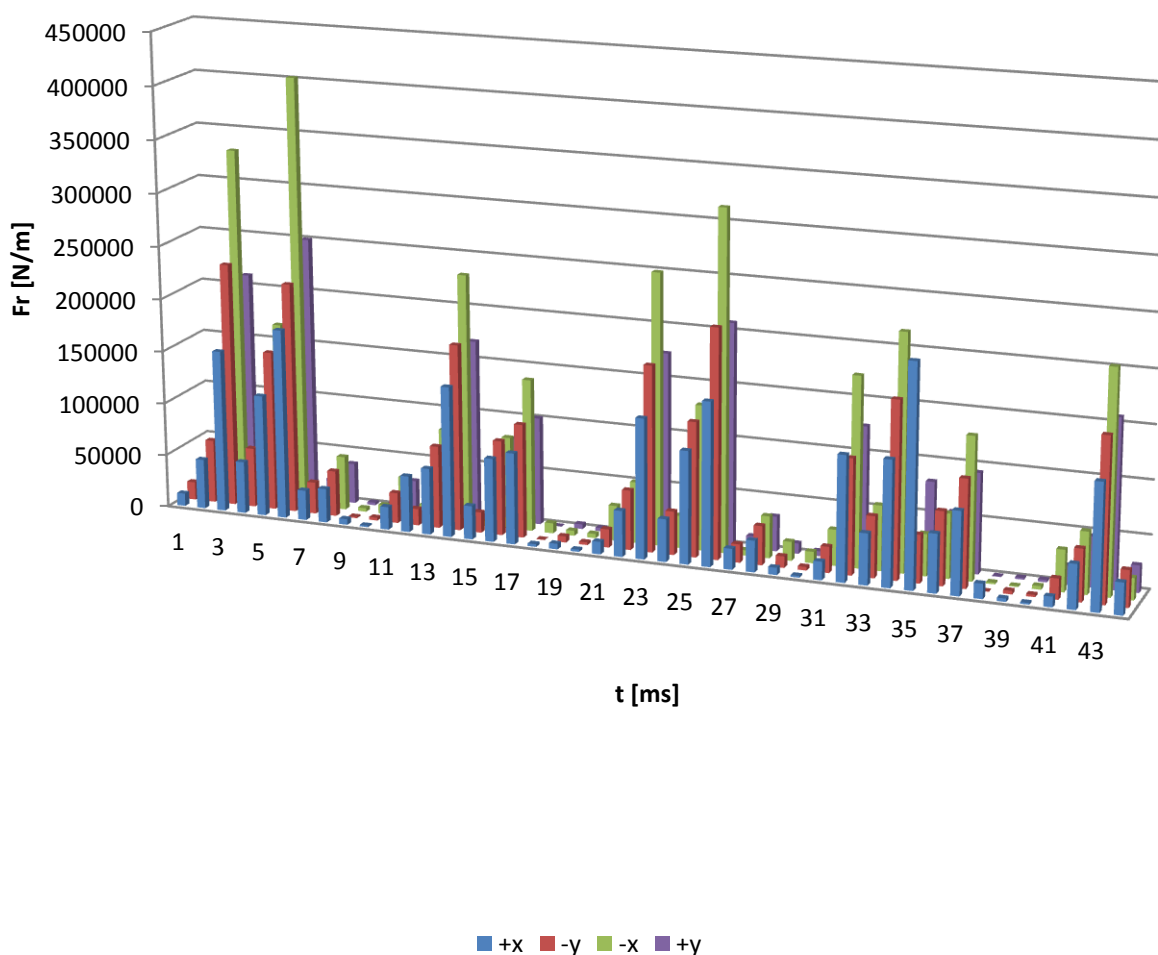


Obrázek 36: Velikost radiální síly v bodě +Y

Pro první graf v bodě +X dosahuje velikost maximální radiální síly hodnoty okolo 210kN/m , průměrná hodnota síly v bodě +X je 57kN/m. Druhý graf pro bod -Y má největší velikost okolo 230kN/m, průměrná hodnota síly v tomto bodě je potom 65kN/m. V třetím grafu v bodě -X dosahuje velikost síly největších hodnot ze všech vynesných grafů. Fr se zde pohybuje nad hranicí 400kN/m v čase 6ms. Průměrná síla je zde pak také největší a to 85kN/m. V grafu číslo 4 pro bod +Y je pak velikost radiální síly blízko grafu v bodě -Y s hodnotou 250kN/m s průměrnou hodnotou velikosti síly 64kN/m.

Ze zobrazených grafů lze pozorovat, že k největšímu silovému působení dochází v bodě -X s maximální velikostí síly přes 400kN/m. To odpovídá konstrukci, jelikož při modelování excentricity byla velikost vzduchové mezery nejmenší právě v tomto místě, a to při působení kombinované excentricity - tedy statické i dynamické dohromady. Tedy vzduchová mezera v tomto místě má nejmenší velikost ze všech druhů excentricit, a to 0,16 mm. Jelikož je rotor při svém pohybu přichylován výrazně blíže k bodu -X, dochází zde k většímu magnetickému tahu a tedy k větší velikosti působení radiálních sil. Naopak v bodě +X je působení těchto sil nejmenší, protože vzduchová mezera zde má šířku až 0,34 mm, což odpovídá teoretickému předpokladu.

Z 3D grafu na obrázku 37 je názorně vidět, že velikost radiální síly v bodě -X markantně převyšuje ostatní síly.



Obrázek 37: Porovnání velikosti radiálních sil pro motor s kombinovanou excentricitou

Výsledkem měření je tedy vyjádření, že kombinovaná excentricita způsobí vznik největších radiálních sil ve směru, v němž dochází k největšímu vychylování rotoru. Tuto excentricitu lze z hlediska velikosti radiálních sil považovat za nejvíce nepříznivou.

8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ NA MOTORU TM90-4S

Další provedenou prací bylo měření vibrací na motorech s velikostmi excentricit podle simulace. Jako měřené motory byly zvoleny třífázové asynchronní motory TM90-4S o výkonu 1,1kW. Při měření byl motor napájen z třífázové sítě kmitočtem 50Hz.

Při měření vibrací byl motor bez mechanické zátěže na hřídeli. Na této sestavě probíhalo měření celkem čtyřikrát. Při každém měření byl motor napájen 3f. soustavou 3x230V/50Hz. Proudů a výkonů v jednotlivých fázích uvádí tabulka. Při měření byly zaznamenány hodnoty zrychlení vibrací a posuvy vibrací pomocí dvou čidel. Čidla byla připevněna na motoru pomocí magnetů na kovovém nástavci. Signály z čidel byly přenášeny do měřicího přístroje PRŮFTECHNIK, který je schopen uchovávat ve své paměti naměřené průběhy. Výsledky získané z přístroje byly převedeny do počítače, kde byly dále zpracovány.

		Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
I1	[A]	1,621	1,601	1,631	1,702
I2	[A]	1,679	1,644	1,636	1,735
I3	[A]	1,598	1,618	1,615	1,725
P1	[kW]	0,055	0,047	0,054	0,047
P2	[kW]	0,046	0,050	0,054	0,054
P3	[kW]	0,038	0,039	0,052	0,044

Tabulka 3: Tabulka vstupních proudů a výkonů pro motor TM90-4S

Během měření dostáváme přístrojem VibXpert vypočtené hodnoty velikosti efektivní hodnoty zrychlení (RMS) a také velikost maximální výchylky (PEAK). Z dat vyplývá, že bezexcentrický motor 1 má nejmenší efektivní hodnotu zrychlení a rovněž i maximální výchylka není velká vzhledem k ostatním motorům. To značí, že tento motor je po mechanické stránce skutečně v pořádku a nevznikají zde vlivem excentricity tak velké vibrace, jež by způsobovaly vážnější kmitání stroje.

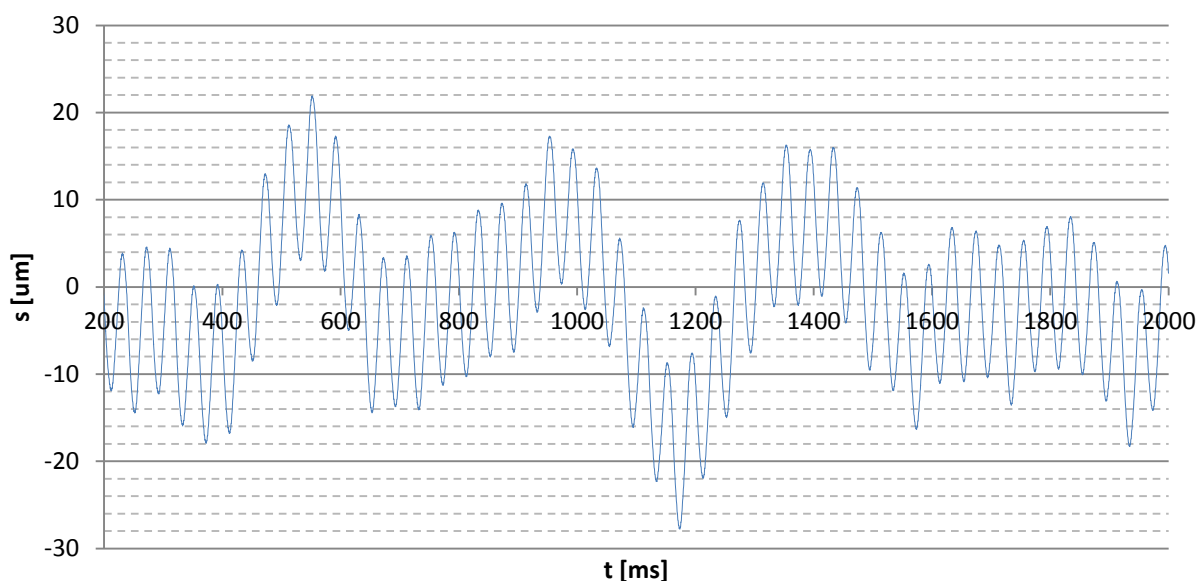
		Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
a (RMS)	[mm/s ²]	1.295	2.385	2.037	1.920
a (PEAK)	[mm/s ²]	3.829	6.679	5.391	6.917

Tabulka 4: RMS hodnoty zrychlení a špičkové hodnoty zrychlení pro jednotlivé motory

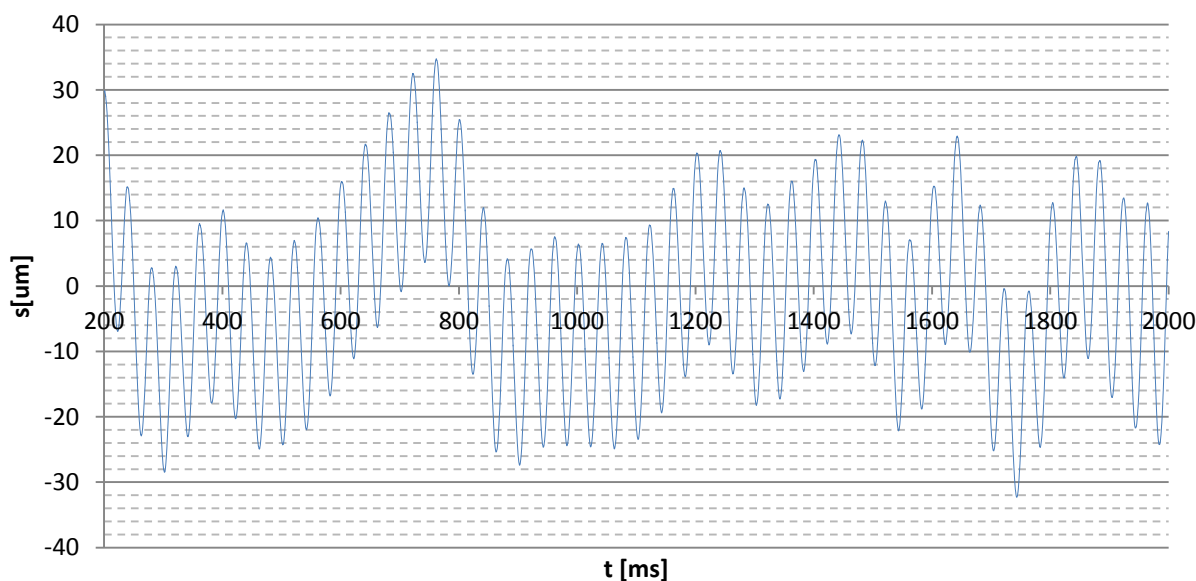
Motor 2 se statickou excentricitou projevuje téměř dvakrát větší velikost zrychlení vibrací než motor bez excentricity. Tento motor projevuje největší zrychlení vibrací ze všech tří excentrických motorů. Motor 3, s dynamickou excentricitou, dosahuje zhruba jeden a půl násobného zvětšení zrychlení v obou případech oproti motoru 1. Motor 4, s kombinovanou excentricitou, projevuje nejmenší míru efektivní hodnoty zrychlení vibrací, avšak má největší maximální výchylku.

8.1 Měření posuvů

Druhou měřenou veličinou jsou posuvy stroje, které vibrace způsobují při jejich provozu. Měřená data jsou pro časový rozsah dvou sekund, avšak kvůli nesprávné počáteční kalibraci nelze použít prvních 200ms průběhu, neboť zde dosahoval chybových hodnot.

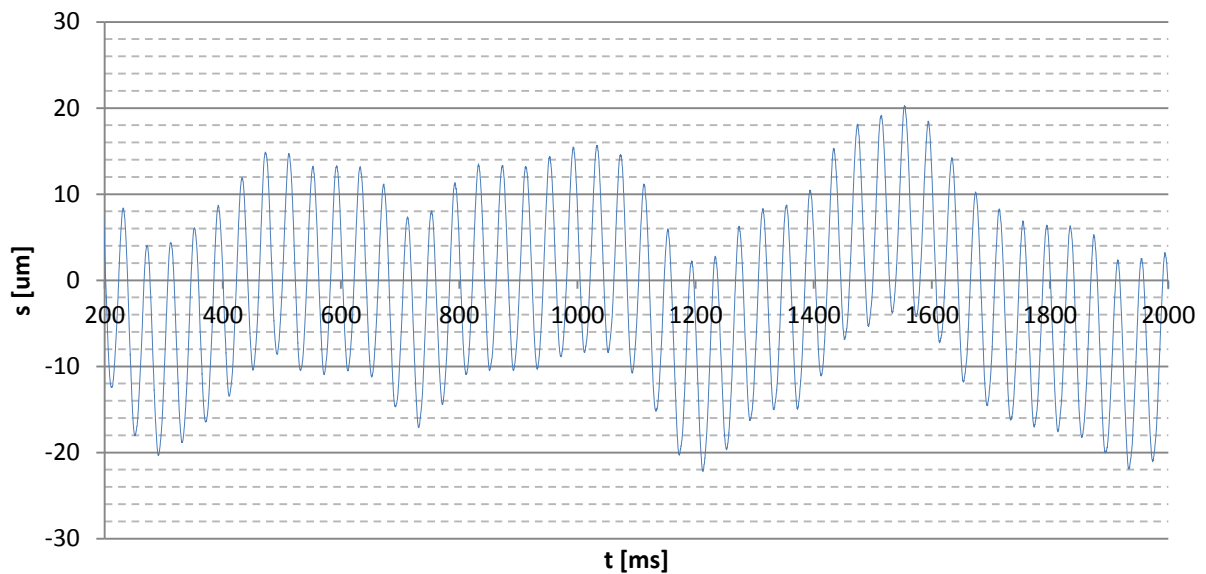


Obrázek 38: Průběh výchylky pro bezexcentrický stroj

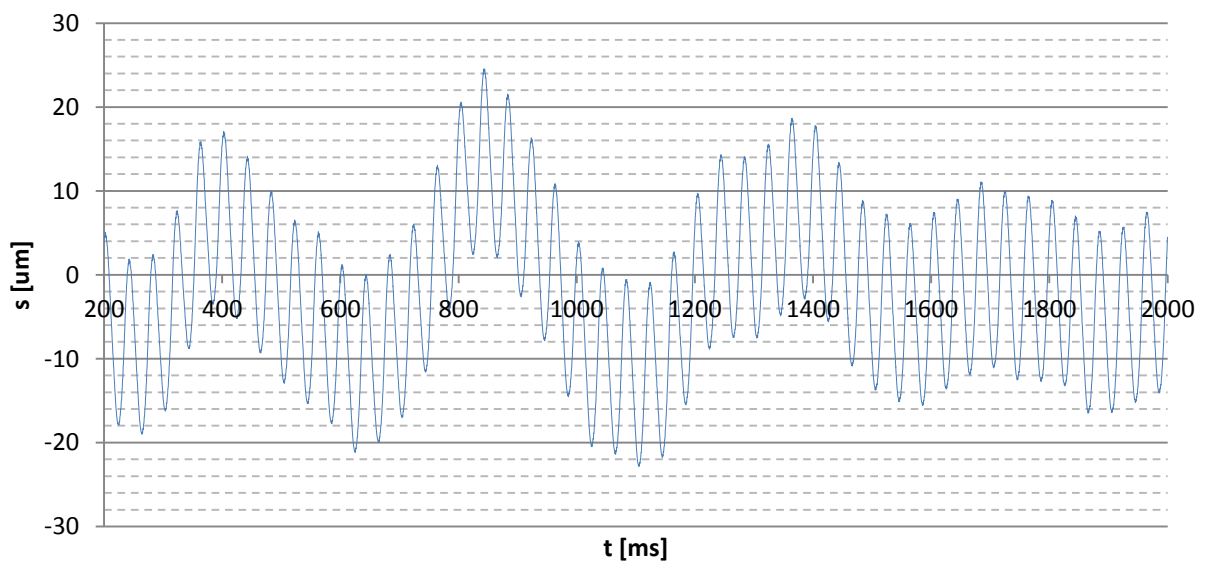


Obrázek 39: Průběh výchylky pro stroj s kombinovanou excentricitou

První grafický průběh udávající výchylku bezexcentrického stroje, má efektivní hodnotu posuvu 4,22 mikrometru v kladném i záporném směru. Tedy rozkmit celkem 8,4 mikrometru. Je to dle očekávání nejméně ze všech měřených strojů. Naproti tomu motor s kombinovaným druhem excentricity dosáhl efektivní hodnoty posuvu vibrací 5,83 mikrometru v kladném a 5,82 mikrometru v záporném směru. Zde tedy rozkmit dosáhl průměrně 11,6 mikrometru což je dle očekávání největší rozkmit ze všech. V obrázku 40 pro statickou excentricitu pak je efektivní velikost posuvu za dobu měření 4,65 mikrometru v kladném i záporném směru, což je velmi podobná hodnota jako u dynamické, kde je posuv 4,63 mikrometru. Celkový rozkmit posuvu je tedy u těchto dvou případů podobný kolem 9,2 mikrometru.



Obrázek 40: Průběh výchylky pro stroj se statickou excentricitou

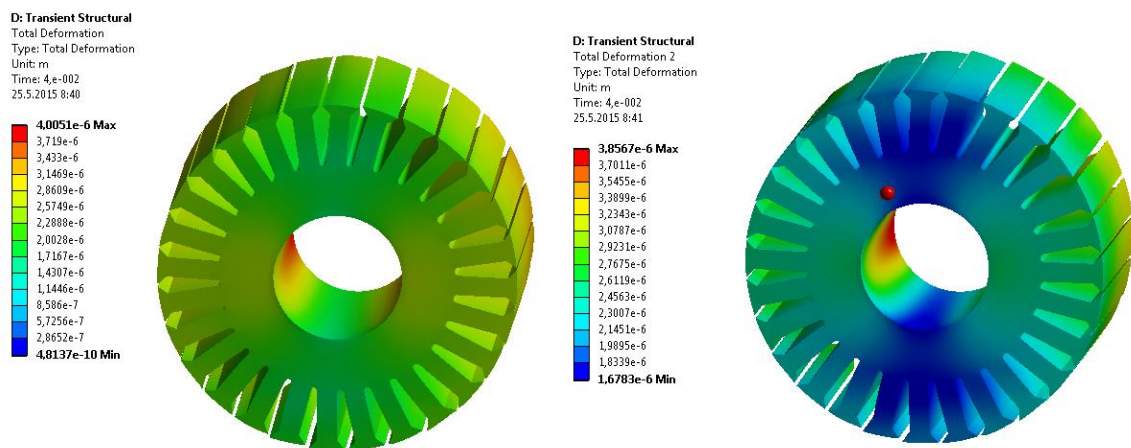


Obrázek 41: Průběh výchylky pro stroj s dynamickou excentricitou

8.2 Simulace vibrací v Ansys Workbench

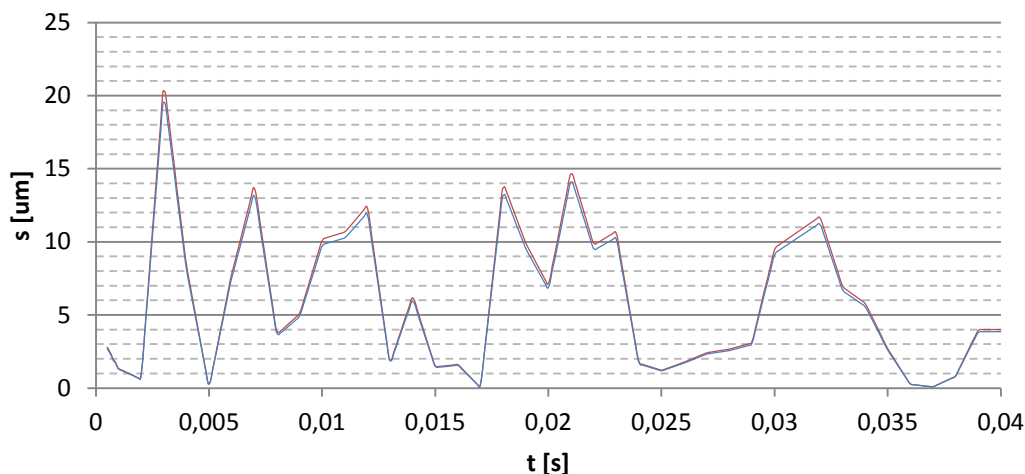
Poslední částí této práce, je porovnání velikosti naměřených posuvů reálného stroje s posuvy, jež nám dokáže spočítat simulační program. Cílem je zjistit, zda-li změřené posuvy vibrací budou odpovídat posuvům simulovaným.

Pro tuto analýzu byl zvolen program Ansys Workbench, který dokáže po propojení s původním modelem z programu Ansys Maxwell řešit složité úlohy v oblasti mechaniky. Jednou z jeho funkcí je, že dokáže simulovat působení síly na určitou část modelu a následně zaznamenávat projevy takového působení na zvolené části. Tyto projevy vyvolávají změny v geometrii modelu, jinými slovy program počítá deformace objektů vlivem působení definované síly. Tato síla je definovaná pomocí tabulky hodnot, která vychází z výsledků simulací na motoru s kombinovanou excentricitou. V této kapitole budeme simulovat pouze posuvy vibrací kombinované excentricity a to pro uvažování sil působících prvním případě na celý stroj v a v druhém případě pouze na rotor.



Obrázek 42: Výsledné rozložení deformace pro celý stroj a pouze rotor

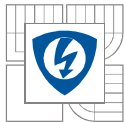
Na obrázku 42 je výsledek výpočtu na 3D modelu v jednom časovém okamžiku. Modře zobrazená část vykazuje nejmenší deformaci, kdežto červená část deformaci maximální. Z rozložení je vidět, že velikost maximální deformace se odráží ve směru, v němž působí největší míra excentricity. Při uvažování celého motoru je pak dosaženo větších hodnot posuvů.



Obrázek 43: Průběh výchylky pro stroj s kombinovanou excentricitou z programu Workbench



Posuvy získané simulací pro kombinovanou excentricitu jsou vyneseny v obrázku 43. Pro simulaci s celým strojem jsou hodnoty posuvů jen nepatrně větší, než při simulaci pouze s rotorem, řádově do jednoho mikrometru. Při porovnávání s výsledky z reálného měření, kdy se posuv u kombinované excentricity pohyboval asi na úrovni 11,6 mikrometrů, lze říct, že se simulace vcelku přiblížila realitě, kdy se špičkové hodnoty pohybují průměrně kolem 12 až 13 mikrometrů. Je však třeba zmínit, že velikost posuvů při vibracích motoru spočítaných programem jsou pouze elektromagnetického původu.



9 ZÁVĚR

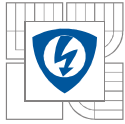
Tato diplomová práce pojednává o excentricitě a jejím vlivu na radiální síly u elektrických strojů, konkrétně v asynchronním motoru. Byla zde v po sobě navazujících kapitolách postupně sepsána teorie, týkající se asynchronního motoru a výskytu radiálních sil, spolu s faktory ovlivňujícími jejich velikost. Dále byl zmíněn úvod do problematiky excentricity a jejích typů.

Po seznámení se s teoretickým základem byl k vytvoření simulací vybrán software Ansys Maxwell, jež se díky možnostem simulací v oblasti elektromagnetismu jevil jako nejvhodnější. V tomto programu byl následně v modulu Rmxprt vymodelován 2D model skutečného stroje typu TM90-4S dle dostupné technické dokumentace. I když se však modelováním snažíme vystihnout realitu co nejpřesněji, dopouštíme se i zde mnohdy zjednodušení. Dokonalý model by obsahoval obrovské množství detailních údajů a složitější geometrie by násobně zvýšila výpočtovou náročnost. Pro zkoumání vlivu excentricity na radiální síly jsme tak potřebovali zejména modely statoru a rotoru s jejich vinutími a neuvažovali jsme další části kompletního motoru jako kostru atd. Konstrukce těchto modelů je popsána v kapitole 5. V kapitole 6 je pak popsán export do prostředí Maxwell v kterém jsou nastaveny zkoumané druhy excentricit. Excentricity jsou definovány vzhledem ke čtyřem strojům TM90-4S, kdy každý má jiný druh excentricity jemnovitě: statickou excentricitu, dynamickou excentricitu, kombinovanou excentricitu a nulovou excentricitu.

V kapitole 7 je nastíněn postup analyzování dat získaných simulacemi. Pomocí těchto dat jsou zde vyhodnoceny velikosti radiálních sil působících při jednotlivých typech excentricit. Vzhledem k simulaci s nulovou excentricitou se jako nejnebezpečnější jeví stroj s kombinovanou excentricitou, neboť vykazuje vznik výrazně vyšších radiálních sil. Stroje se statickou a dynamickou excentricitou pak mají velikost působících radiálních sil velmi podobnou, avšak zřetelně menší než u excentricity kombinované. Jako hlavní faktor ovlivňující velikost radiálních sil se tak jeví velikost vzduchvé mezery, způsobující změnu magnetického tahu ve směru vychylování.

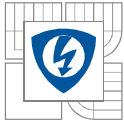
V kapitole 8 bylo provedeno praktické měření na stroji TM90-4S, kdy byly pomocí vibrometru měřeny vibrace jednotlivých excentrických strojů. Z tohoto měření nás pak zajímaly zejména posuvy vibrací. Tyto posuvy se opět nejvýrazněji projeví u kombinované excentricity. Následně byla pomocí softwaru Ansys Workbench provedena simulace velikost posuvů, vycházející z předchozích simulací velikosti radiálních sil kombinované excentricity. Porovnáním výsledků ze simulace a z reálného měření jsem došel k závěru, že výsledek simulace vcelku odpovídá hodnotám reálně změřeným.

Ve výsledku tedy můžeme potvrdit, že velikost excentricity má nezanedbatelný vliv na velikost radiálních sil, potažmo na velikost vibrací vznikajících v elektrickém stroji. Metody výpočtu pomocí softwaru rovněž poskytují vcelku reálné informace, které mohou být použity například při vývoji nebo diagnostice.



LITERATURA

- [1.] GIERAS, Jacek F, Joseph Cho LAI a Chong WANG. *Noise of polyphase electric motors*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor, 2006, xx, 372 p., [4] p. of plates. ISBN 978-082-4723-811.
- [2.] HELLER, Bedřich a Václav HAMATA. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Academia ČSAV, 1961.
- [3.] SVS FEM: RMxprt. SVS FEM. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/rmxprt>
- [4.] FORMÁNEK, Jakub. *Výpočet rozložení teplotního pole v asynchronním stroji*. Brno, 2013. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68931.
Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.
- [5.] Techsoft Engineering: ANSYS Maxwell. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys/ansys-maxwell/>
- [6.] SEDKY, Mohamed Moustafa Mahmoud. Diagnosis of Static, Dynamic and Mixed Eccentricity in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor by Using FEM. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering* [online]. 2014, 8(1): 6 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://waset.org/Publications/diagnosis-of-static-dynamic-and-mixed-eccentricity-in-line-start-permanent-magnet-synchronous-motor-by-using-fem/9997033>
- [7.] EMP s.r.o. Slavkov u Brna [online]. 2007 [cit. 2015-12-05]. Www.emp-slavkov.cz. Dostupné z WWW: <http://www.emp-slavkov.cz/tm_jmc.html>.
- [8.] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. 107 s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta.



PŘÍLOHY