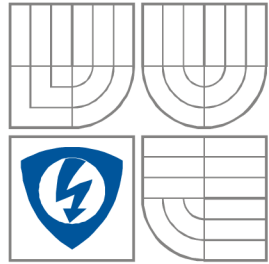


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

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

## **ZDROJE HLUKU U JEDNOFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ**

**NOISE SOURCES OF SINGLE-PHASE INDUCTION MOTORS**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELORS THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

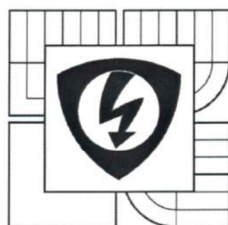
Zdeněk Knap

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Zdeněk Knap

**Ročník:** 3

**ID:** 138955

**Akademický rok:** 2012/13

**NÁZEV TÉMATU:**

## Zdroje hluku u jednofázových asynchronních motorů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Proved'te literární rešerši.
2. Definujte zdroje hluku
3. Určete možnosti potlačení hluku

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle doporučení vedoucího

**Termín zadání:** 17.9.2012

**Termín odevzdání:** 4.6.2013

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

**Konzultanti bakalářské práce:**

  
**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda oborové rady



**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Tato práce je zaměřena na pojmenování příčin vzniku hluku u jednofázových asynchronních motorů. Ze složek hluku je kladen důraz především na hluk způsobený průběhy elektromagnetických veličin a jejich vazbu na fyzické parametry stroje. Důraz je kladen hlavně na frekvenční spektra tohoto hluku. Z této rešerše pak vypracovává analýzu hlukového spektra reálného jednofázového motoru s rozběhovým kondenzátorem za pomoci programu MATLAB. Závěr práce obsahuje shrnutí podmínek pro omezení hluku magnetického původu a rizikové frekvence, na kterých má motor tendenci emitovat hluk.

## **Abstract**

This bachelor's thesis is aimed to find sources of acoustic noise on a single-phase induction motors. Main focus is noise of electromagnetic origin and its actual connection to motor parameters. Noise frequencies are the key subjects of this work. Based on this literature research, it includes analysis of real single-phase induction motor in mathematical software MATLAB. In the end, there is a summary of rules for reduction of the noise caused by electromagnetic fields and list of dangerous frequencies for analyzed motor.

## **Klíčová slova**

Akustický hluk, jednofázový asynchronní motor, vzduchová mezera, magnetomotorické napětí, magnetická vodivost, frekvence hluku, zdroje hluku, hluková analýza

## **Keywords**

Acoustic noise, single-phase induction motor, air gap, magnetomotive voltage, magnetic conductivity, noise frequencies, noise sources, noise analysis

## **Bibliografická citace**

KNAP, Z. *Zdroje hluku u jednofázových asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 49 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Zdroje hluku u jednofázových asynchronních motorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské práce doc. Ing. Čestmíru Ondruškovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc.

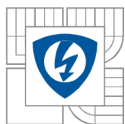
V Brně dne .....

Podpis autora .....



## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>SEZNAM TABULEK .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>   | <b>11</b> |
| <b>1 ÚVOD.....</b>   | <b>13</b> |
| <b>2 ZVUK A HLUK.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>3 HLUK TOČIVÝCH STROJŮ .....</b>  | <b>15</b> |
| <b>3.1 ROZDĚLENÍ ZDROJŮ HLUKU.....</b>   | <b>15</b> |
| 3.1.1 METODY URČOVÁNÍ PŘÍČIN HLUKU .....   | 15        |
| <b>3.2 HLUK AERODYNAMICKÉHO PŮVODU .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>3.3 HLUK MECHANICKÉHO PŮVODU.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>3.4 HLUK MAGNETICKÉHO PŮVODU .....</b>  | <b>17</b> |
| 3.4.1 VELIKOST MAGNETOMOTORICKÉHO <i>M</i> -FÁZOVÉHO VINUTÍ .....                            | 20        |
| 3.4.2 VELIKOST MAGNETOMOTORICKÉHO NAPĚTÍ KLECOVÉHO VINUTÍ .....                              | 21        |
| 3.4.3 VELIKOST MAGNETOMOTORICKÉHO NAPĚTÍ SOUSTŘEDNÉHO VINUTÍ .....                           | 23        |
| 3.4.4 VÝPOČET VODIVOSTI VZDUCHOVÉ MEZERY .....   | 24        |
| <b>3.5 JEVY OVLIVŇUJÍCÍ MAGNETICKÝ HLUK.....</b>   | <b>28</b> |
| 3.5.1 VLIV HARMONICKÝCH ŘÁDŮ MAGNETOMOTORICKÉHO NAPĚTÍ PŘI KONSTANTNÍ VZDUCHOVÉ MEZEŘE ..... | 28        |
| 3.5.2 VLIV EXCENTRICITY ROTORU .....   | 29        |
| 3.5.3 VLIV OTEVŘENÍ DRÁŽKY .....   | 29        |
| 3.5.4 VLIV SYCENÍ ŽELEZA .....   | 29        |
| 3.5.5 VLIV DRÁŽKOVÁNÍ .....  | 30        |
| <b>4 HLUK JEDNOFÁZOVÝCH MOTORŮ .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>4.1 MOTORY S BĚHOVÝM KONDENZÁTOREM .....</b>  | <b>33</b> |
| <b>4.2 MOTORY S ROZBĚHOVÝM KONDENZÁTOREM .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>5 ANALÝZA MOTORU.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>5.1 MOTOR .....</b>   | <b>35</b> |
| <b>5.2 VÝPOČTY ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ MOTORU .....</b>   | <b>35</b> |
| 5.2.1 VÝPOČET SKLUZŮ MOTORU .....  | 35        |
| 5.2.2 VÝPOČET Činitele VINUTÍ STATORU .....  | 36        |
| 5.2.3 URČENÍ CARTEROVÝCH ČINTELŮ .....   | 36        |
| <b>5.3 VÝPOČET RADIÁLNÍHO TLAKU.....</b>   | <b>37</b> |
| 5.3.1 VÝPOČET VODIVOSTI VZDUCHOVÉ MEZERY .....   | 37        |
| 5.3.2 VÝPOČET MAGNETOMOTORICKÉHO NAPĚTÍ STATORU .....  | 39        |
| 5.3.3 VÝPOČET MAGNETOMOTORICKÉHO NAPĚTÍ ROTORU .....   | 40        |
| 5.3.4 VÝPOČET RADIÁLNÍHO TLAKU .....   | 41        |
| <b>5.4 VÝPOČTY OSCILAČNÍCH KMITOČTŮ ZPŮSOBENÝCH MAGNETICKÝM POLEM .....</b>                  | <b>42</b> |
| 5.4.1 VLIVEM HARMONICKÝCH SLOŽEK MAGNETOMOTORICKÉHO NAPĚTÍ .....                             | 42        |



---

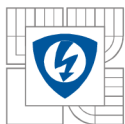
|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| 5.4.2 VLIVEM DRÁŽKOVÁNÍ .....       | 42        |
| 5.4.3 VLIVEM SYCENÍ ŽELEZA .....    | 43        |
| <b>6 ZÁVĚR.....</b>                 | <b>44</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>             | <b>46</b> |
| <b>PŘÍLOHY .....</b>                | <b>47</b> |
| <b>SKRIPT PROGRAMU MATLAB .....</b> | <b>47</b> |
| <b>KOMPAKTNÍ DISK .....</b>         | <b>49</b> |





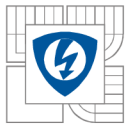
## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Obrázek 1- základní rozdělení zdrojů hluku (převzato z [1]) .....</i>   | <i>15</i> |
| <i>Obrázek 2- deformace rotoru vlnou a) 0. řádu b) 1. řádu (převzato z [2]) .....</i>  | <i>19</i> |
| <i>Obrázek 3- deformace rotoru vlnou a) 2. řádu b) 3. řádu c) 4. řádu (převzato z [2]).....</i>                                      | <i>19</i> |
| <i>Obrázek 4- koeficient účinníku pro rotorový proud, převzato z [8] .....</i>   | <i>22</i> |
| <i>Obrázek 5- rozložení soustředného vinutí, převzato z [2].....</i>   | <i>23</i> |
| <i>Obrázek 6- závislost určující hodnotu konstanty <math>\beta</math> (převzato z [2]) .....</i>                                     | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 7- koeficient amplitud vyšších harmonických magnetického pole podle poměru (<math>o/t_d</math>) (převzato z [2]).....</i> | <i>27</i> |
| <i>Obrázek 8- otevření drážky (převzato z [2]) .....</i>   | <i>29</i> |
| <i>Obrázek 9- deformace magnetické indukce vlivem sycení železa (převzato[2]).....</i>   | <i>30</i> |
| <i>Obrázek 10- průběh magnetického pole nad drážkou (převzato z [2]).....</i>  | <i>31</i> |
| <i>Obrázek 11- skript pro výpočet harmonických rozvoji vodivosti vzduchové mezery .....</i>  | <i>38</i> |
| <i>Obrázek 12- Průběh magnetické vodivosti vzduchové mezery.....</i>   | <i>39</i> |
| <i>Obrázek 13- skript pro výpočet magnetomotorického napětí soustředného vinutí statoru.....</i>                                     | <i>39</i> |
| <i>Obrázek 14- magnetomotorické napětí statoru ve vzduchové mezeře .....</i>   | <i>40</i> |
| <i>Obrázek 15- skript pro výpočet magnetomotorického napětí klecového vinutí rotoru .....</i>  | <i>40</i> |
| <i>Obrázek 16- magnetomotorické napětí rotoru .....</i>  | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 17- příkaz pro výpočet radiálního tlaku .....</i>   | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 18- radiální tlak ve vzduchové mezeře.....</i>  | <i>41</i> |



## SEZNAM TABULEK

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabulka 1- Faktory ovlivňující vzduchovou mezeru.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabulka 2- parametry analyzovaného motoru .....</i>       | <i>35</i> |
| <i>Tabulka 3- Podmínky omezení hluku.....</i>                | <i>44</i> |
| <i>Tabulka 4- Rizikové frekvence pro kmitání motoru.....</i> | <i>45</i> |

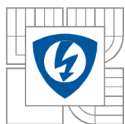


## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

- $\mu_0$  – permeabilita vakua (H/m)
- $2p$  - počet pólových dvojic (-)
- $A_0$  - hladina hluku při srovnávací rychlosti (dB)
- $B$  - magnetická indukce (T)
- $C$  - dopravní složka záleží na prostředí
- $D_0$  - průměr roztečné kružnice valivých částí (mm)
- $d_g$  – průměr valivé části ložiska (mm)
- $f$  – frekvence (Hz)
- $F$  - magnetomotorické napětí (A)
- $f_l$  - funkce s periodou drážkové rozteče popisující ovlivnění mag. vodivosti vlivem drážek statoru
- $f_l$  - funkce s periodou drážkové rozteče popisující ovlivnění mag. vodivosti vlivem drážek rotoru
- $f_c$  -frekvence hluku vlivem drážkování
- $f_l$  – kmitočet ložiskového hluku (Hz)
- $f_r$  -frekvence hluku vlivem harmonických složek magnetomotorického napětí při konstantní vzduchové mezeře
- $F_r$  – průběh magnetomotorického napětí rotoru (A)
- $f_s$  -frekvence hluku vlivem sycení železa
- $F_s$  – průběh magnetomotorického napětí statoru (A)
- $H$  - intenzita magnetického pole (A/m)
- $H_\Delta$  - diferenční pole mezi státorem a rotorem (H)
- $I_n$  – jmenovitý proud (A)
- $I_T$  – proud rotorovou tyčí (A)
- $k_l$  – činitel účinníku podle obrázku 4
- $k_{c1}$  – Carterův činitel pro stator
- $k_{c2}$  – Carterův činitel pro rotor
- $L_P$  – hladina intenzity zvuku (dB)
- $m_1$  – počet fází statoru
- $m_2$  – počet fází rotoru
- $n$  - otáčky ( $\text{min}^{-1}$ )
- $N_1$  – počet závitů statoru



- $N_2$  – počet závitů rotoru
- $n_r$  – rychlost otáčení se rotoru ( $\text{min}^{-1}$ )
- $n_r'$  – rychlost otáčení se rotoru vůči inverzní složce magnetického pole ( $\text{min}^{-1}$ )
- $n_s$  – rychlost otáčení se sousledné složky statorového pole ( $\text{min}^{-1}$ )
- $o$  - šířka otevření drážky (m)
- $p$  - tlak (Pa); počet pólů (-)
- $p_{e0}$  – prahový efektivní akustický tlak (Pa)
- $p_r$  – radiální tlak ve vzduchové mezeře ( $\text{N/m}^2$ )
- $R_m$  – magnetický odpor vzduchové mezery ( $\text{A}^{-1}$ )
- $s_1$  – skluz motoru vůči pracovnímu magnetickému poli (sousednému poli)
- $s_2$  – skluz motoru vůči inverzní složce magnetického pole
- $S_{stat}$  – plocha vzduchové mezery ( $\text{m}^2$ )
- $t$  - čas (s), šířka zubu (m)
- $U_0$  - srovnávací rychlost (m/s)
- $U_1$  - rychlost, pro kterou hledáme hlukovou hladinu (m/s)
- $\nu, \nu$  – řád harmonické
- $Z'$  - počet drážek statoru (-)
- $Z''$  - počet drážek rotoru (-)
- $Z_0$  - počet valivých částí ložiska
- $\alpha$  - úhlová souřadnice (rad)
- $\alpha_d$  – prostorový úhel, o který jsou posunuty jednotlivé drážky ( $^\circ\text{mech}$ )
- $\alpha_y$  – konstanta určující způsob vinutí, pro symetrické uspořádání pólů se rovná  $\pi$  ( $^\circ\text{el}$ )
- $\beta$  - exponent, konstanta
- $\Delta_1$  – přírůstek délky vzduchové mezery vlivem drážkování statoru (m)
- $\Delta_2$  – přírůstek délky vzduchové mezery vlivem drážkování rotoru (m)
- $\mathcal{A}$  - magnetická vodivost vzduchové mezery ( $\text{m}^{-1}$ )
- $\varphi_0$  - úhel pozice začátku vinutí ( $^\circ\text{el.}$ )
- $\varphi_1$  - úhel pozice konce vinutí ( $^\circ\text{el.}$ )
- $\omega_r$  - úhlová rychlost rotoru ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $c$  – konstanta
- $\delta$  – délka vzduchové mezery (m)



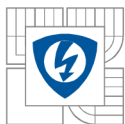
## 1 ÚVOD

Točivé elektrické stroje jsou v dnešní době zařízení, která využívají největší podíl elektrické energie. Jejich využití můžeme nalézt nejen jako zdroje elektrické energie, ale hlavně jako pohonné jednotky díky své schopnosti jednoduše přeměnit elektrickou energii zpět na energii mechanickou a to nejen jako velké stroje v průmyslu, ale čím dál více jako velké množství drobných pohonů pro automatizaci, vzduchotechniku a další účely.

S provozem těchto strojů se ovšem spojuje mnoho nežádoucích jevů, jako je právě i hluk, který je ve většině případů brán jako nežádoucí jev způsobující znečištění okolí. Při velké úrovni hluku je narušena hygiena pracovního prostředí a tím může dojít až k ovlivňování pracovníků v okolí.

Existují i metody, které berou hluk stroje jako pozitivní zdroj informace, kde podle analýzy tohoto hluku se snaží zjistit možné závady, ke kterým se na daném zařízení schyluje, a předejít jim. Zde je ovšem zdrojem hluku již závada, která se na zařízení objevila, a není tedy pro nás spojena přímo se strojem a jeho funkcí v normálním stavu.

Tato práce je pokračováním semestrálního projektu „Eliminace hluku u jednofázových asynchronních motorů“ a je z velké části založena na práci „Hluk elektrických strojů“ vypracované kolektivem výzkumných pracovníků brněnského Výzkumného a vývojového ústavu elektrických strojů točivých z roku 1964.



## 2 ZVUK A HLUK

Abych se mohl zabývat hlukem strojů, definuji nejdřív pojem zvuk. Zvuk je mechanické kmitání šířící se pružným prostředím. Pro nás důležitou částí zvuku je slyšitelný zvuk, který je vymezen frekvencí kmitání v rozmezí 16 Hz až 20000 Hz.

Frekvence zvuku  $f$  udávaná v jednotkách Herz – 1Hz spolu s hladinou intenzity zvuku, jsou dva základní parametry popisující zvuk.

Hladina intenzity zvuku  $L_I$  je brána jako fyzikální hodnota pro porovnávání intenzity zvuku. Určuje nám, jak moc je změna tlaku v daném bodě vyvolaná kmitáním, vyšší nebo nižší než je prahová efektivní hodnota tlaku, která je brána jako nejnižší hodnota změny tlaku prostředí, na které je lidské ucho schopno zareagovat. Tato hodnota je  $p_{e0} = 2,03 \cdot 10^{-5}$  Pa. Výsledná hodnota je pak vyjádřena v decibelech (dB), velikost je pak určena z definičního vztahu: [3]

$$L_P = 10 * \log\left(\frac{p}{p_{e0}}\right)^2 \quad 2.1$$

$L_P$  - hladina intenzity akustického tlaku (dB)

$P$  - měřený akustický tlak (Pa)

$p_{e0}$  - prahový efektivní akustický tlak (Pa)

Lidské ucho ovšem nevnímá všechny frekvence stejně citlivě. Jeho nejvyšší citlivost je v oblasti 0,5-4 kHz, tedy v oblasti lidského hlasu.

Kromě slyšitelného zvuku musíme také brát zřetel na reakci člověka na zvuk jinak než sluchem. Jako hlavní způsob tohoto vnímání je vnímání infrazvuku v rozsahu frekvencí 0,7-16Hz, kdy tento infrazvuk vnímáme jako vibrace a při vysokých intenzitách může dojít k pocitu nevolnosti nebo k ovlivnění soustředění člověka.

Hluk pak můžeme definovat jako „nežádoucí zvuk, který vyvolává nepříjemný nebo rušivý sluchový vjem. Je tvořen směsí tónů, šumů a rázů vznikajících neharmonickým kmitáním vzduchu s výrazně nepravidelným kmitočtem i amplitudou.“<sup>1</sup>

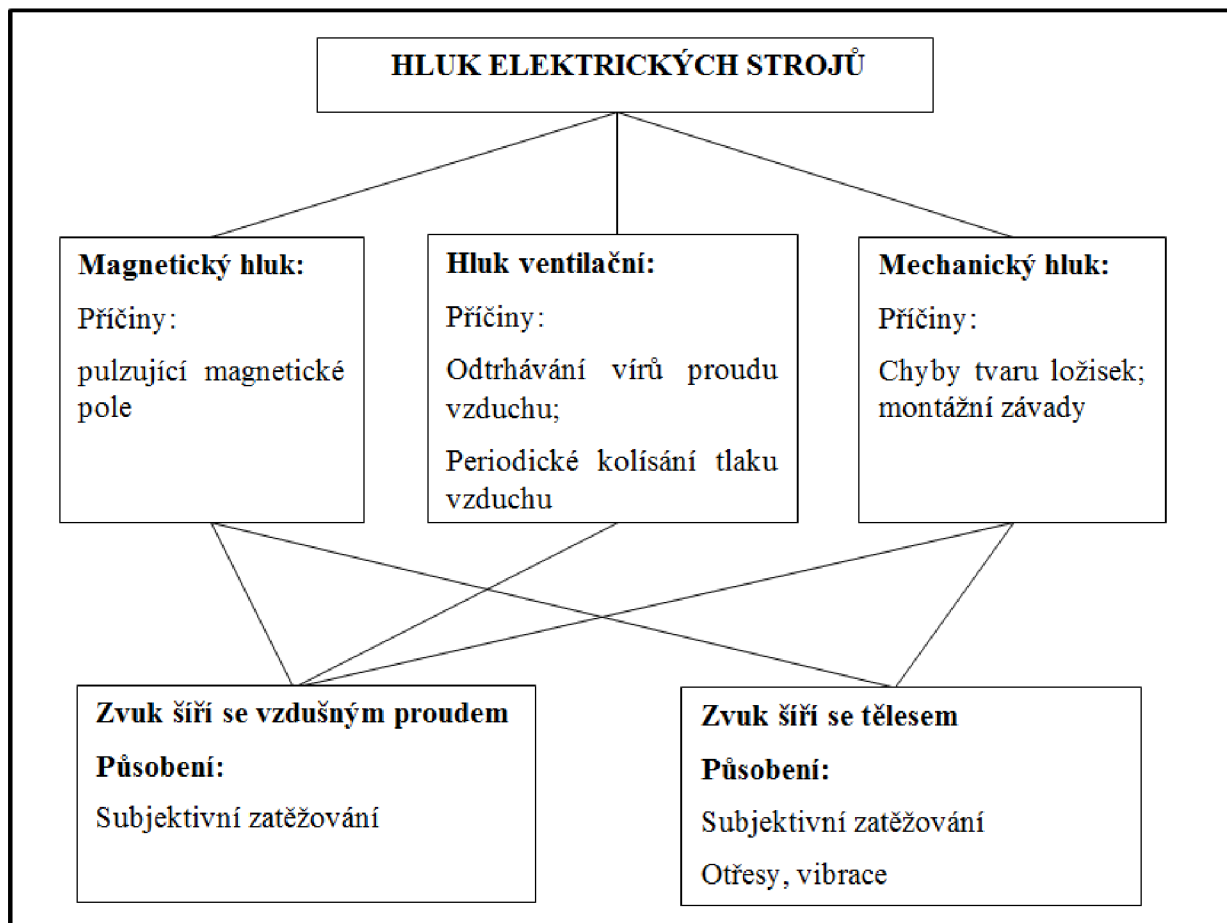
---

<sup>1</sup> RYŠKA, Pavel Ing. PhD. Možnosti hlukové analýzy v diagnostice elektrických strojů. In: [online]. 2009 [cit. 2012-11-01]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/101.pdf>

## 3 HLUK TOČIVÝCH STROJŮ

### 3.1 Rozdělení zdrojů hluku

Již v roce 1959 byl vytvořen tento základní diagram rozdělení zdrojů hluku.



Obrázek 1- základní rozdělení zdrojů hluku (převzato z [1])

I dnes toto schéma s velkou přesností zahrnuje základní problémy, které nás zajímají při snaze o vytvoření motoru pokud možno s co nejnižší emisí hluku do svého okolí. Přibylo ovšem mnoho parametrů ovlivňujících tyto fyzikální příčiny.

#### 3.1.1 Metody určování příčin hluku

U motorů se velmi výrazně projevuje aerodynamický hluk. Jednoduchou metodou, jak odlišit aerodynamický hluk od hluku magnetického původu, je odpojení motoru od sítě, popřípadě jeho odlehčení. Zmizí-li, byl to hluk magnetického původu. Hluk, který stroj vydává i po odpojení od sítě, je s velkou pravděpodobností hluk ventilační nebo hluk mechanického původu.

U motorů rychloběžných je velká část hluku způsobena ventilační složkou, s klesající rychlostí motoru ovšem začíná převládat hluk magnetický.

### 3.2 Hluk aerodynamického původu

Hluk aerodynamického původu, který může být nazýván hlukem ventilačním, je jednou z hlavních složek celkového hluku motoru. Aerodynamický hluk se vyskytuje hlavně u motorů vysokootáčkových. Se zvyšujícím se počtem pólových dvojic a tím se snižující se rotační rychlostí rotoru klesá hluk ventilačního původu a začíná převládat hluk magnetického původu. Ventilační hluk můžeme rozdělit na dvě složky, a to na:

1. **hluk nadměrný**, který lze snížit vhodným návrhem stroje;
2. **hluk nezbytný**, který je dán samotnou konstrukcí ventilačního systému. Pokud je motor chlazen vzduchem, nelze ho úplně vyredukovat.

Další dělení ventilačního hluku je definováno podle místa vzniku hluku a jeho frekvenčního spektra. Hluk vznikající na ventilátoru má dvě složky:

Složka **aerodynamického šumu** je tvořena vzdušnými víry vznikajícími za pevnými překážkami uvnitř motoru. Spektrum takového hluku je spojitě po celé délce slyšitelného spektra, tj. 16 Hz až 20 kHz, a jeho intenzita je přímo úměrná obvodové rychlosti otáčejícího se ventilátoru. Tato složka ventilačního hluku převládá především u malých strojů. Její hladinu pak můžeme vypočítat podle přepočtového vztahu vůči referenční hodnotě změřené při nominálním stavu. [1]

$$L_p = 20 \log \left[ A_0 \left( \frac{U_1}{U_0} \right)^\beta \right] + C \quad 3.1$$

- $L_p$  - hluková hladina šumu ventilátoru (dB)  
 $A_0$  - hladina hluku při srovnávací rychlosti (dB)  
 $U_1$  - rychlost, pro kterou hledáme hlukovou hladinu (m/s)  
 $\beta$  - exponent 2,5 až 3,5  
 $U_0$  - srovnávací rychlost (m/s)  
 $C$  - dopravní složka závisící na prostředí

Tento hluk se redukuje zmenšením průměru ventilátoru, což u strojů s malým průměrem rotoru bývá problém, protože narážíme na omezení dané maximálním oteplením stroje. Další možností je, pokud to okolnosti dovolí, úplně ventilátor odstranit. Zredukujeme proud vzduchu, který zapříčiňuje tento šum. Ve speciálních případech lze nahradit chlazení vzduchem jiným druhem chladiva. Toto řešení se ovšem u malých strojů, jako jsou jednofázové stroje, nevyužívá. Zde se velmi často využívá právě možnost odstranit ventilátor úplně.

Druhou složkou je **hluk sirénový**, neboli zvuk modulovaný, který vzniká periodickým narážením vzduchu na pevnou překážku a tím dochází k periodickému kolísání tlaku vzduchu. Frekvence tohoto zvuku je přímo úměrná otáčkám ventilátoru a počtu lopatek ventilátoru. Intenzita hluku je zde závislá na obvodové rychlosti ventilátoru a na vzdálenosti ventilátoru od překážek, do kterých vzduch naráží. Zvětšením této vzdálenosti lze tento sirénový hluk velmi výrazně potlačit.



### 3.3 Hluk mechanického původu

Mechanický hluk je z velké části tvořen hlukem ložisek rotoru. Tento hluk je spojen hlavně s vysokootáčkovými stroji. Jeho vznik je způsoben tvarovou deformací ložisek, která může být zapříčiněna nepřesností ve výrobě ložiska, nebo nevyvážením rotorové konstrukce, která má následně tendenci kmitat. Kmitočet ložiskového hluku je většinou v rozmezí od 50 do 200 Hz a je dán vztahem: [1]

$$f_l = \left[1 - \frac{d_g}{D_0}\right] \frac{1}{2} \frac{n}{60} Z_0 \text{ (Hz)} \quad 3.2$$

- $f_l$  – kmitočet ložiskového hluku (Hz)  
 $d_g$  – průměr valivé části ložiska (mm)  
 $D_0$  – průměr roztečné kružnice valivých částí (mm)  
 $n$  – otáčky ( $\text{min}^{-1}$ )  
 $Z_0$  – počet valivých částí ložiska

Jako možnosti redukce tohoto zdroje hluku byly nalezeny ložiskové podložky s možností přepětí. Při nastavení přepětí na optimální hodnotu dochází k velkému omezení vibrací a tím i zdroje hluku, v případě nízkého přepětí dochází k vysokofrekvenčním vibracím, v případě velkého přepětí dochází k přehřívání valivých částí ložisek a k nízkofrekvenčním vibracím.

Dalším předpokladem omezení mechanického hluku je výběr ložisek s malými tolerancemi a pečlivé vyvážení rotoru.

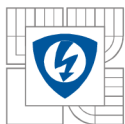
### 3.4 Hluk magnetického původu

Zdrojem magnetického hluku u asynchronních strojů jsou síly vznikající z vln vyšších harmonických indukcí ve vzduchové mezeře. Tyto síly jsou následně příčinou radiálních a Maxwellových sil. Tuto radiální sílu můžeme vyjádřit na jednotku plochy jako: [1]

$$p_r = \frac{B^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad 3.3$$

- $p_r$  – radiální tlak ve vzduchové mezeře ( $\text{N/m}^2$ )  
 $B$  – magnetická indukce ve vzduchové mezeře v místě obloukové souřadnice  $\alpha$  v čase  $t$  (T)  
 $\mu_0$  – permeabilita vakua (H/m)

Tato rovnice vyčísluje hodnotu radiální síly působící ve vzduchové mezeře na jednotku plochy soustavy SI; protože zanedbáváme vliv nasycení železa, předpokládáme, že jeho permeabilita je



nekonečná a můžeme do rovnice dosadit vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole a to  $B(\alpha, t) = \mu_0 H(\alpha, t)$ . Výsledkem je tedy vztah: [2]

$$p_{r_{\mu Fe=\infty}} = \frac{\mu_0}{2} H^2(\alpha, t) \quad 3.4$$

$p_{r_{\mu Fe=\infty}}$  - radiální tlak ve vzduchové mezeře při zanedbání sycení železa ( $\text{N/m}^2$ )

$H$  - intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře v místě obloukové souřadnice  $\alpha$  v čase  $t$  ( $\text{A/m}$ )

Rovnici 3.4 můžeme dále rozepsat na jednotlivé složky magnetické indukce, která je tvořena magnetomotorickým napětím statoru a rotoru a je dále vodivostí vzduchové mezery.[2]

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} [F_s(\alpha, t) + F_r(\alpha, t)]^2 * \Lambda^2(\alpha, t) \quad 3.5$$

$F_s(\alpha, t)$  – průběh magnetomotorického napětí statoru (A)

$F_r(\alpha, t)$  – průběh magnetomotorického napětí rotoru (A)

$\Lambda(\alpha, t)$  – průběh vodivosti vzduchové mezery (H)

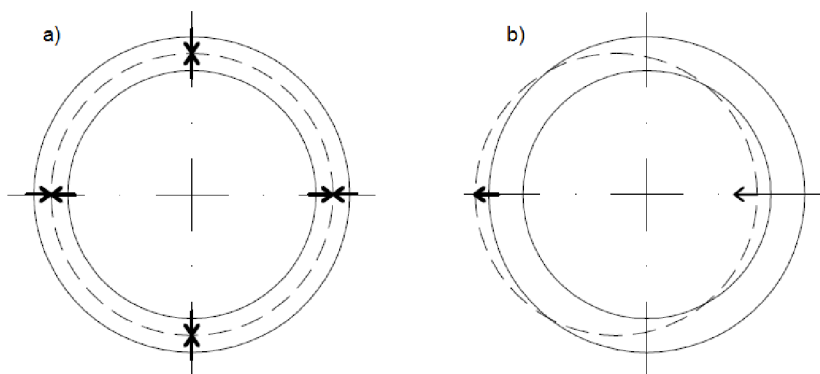
Tento tlak je časově proměnný a má různý počet prostorových vln o řádu  $r = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Tyto vlny obíhají ve vzduchové mezeře s úhlovou rychlostí  $\Omega_r/r$  a s amplitudou  $A_r$ . Frekvence kmitání bodu na rotoru je tedy  $f_r = \frac{\Omega_r}{2\pi}$ . Velikost jednotlivých kmitů v určitém bodě určeném úhlem  $\alpha$  od vztážené osy je pak dána vztahem: [1]

$$p_r = A_r \cos(r\alpha - \Omega_r t) \quad 3.6$$

Z hlediska chvění jsou nejnebezpečnější frekvence  $f_r$  blízké vlastní rezonanční kmitočtu rotoru. Díky rezonanci jsou tyto kmity umocněny, mohou být zdrojem značného hluku a mohou zvyšovat zatížení ložisek. Pro chvění jsou nejvýznamnější vlny 0,1,2,3,4 řádu. Vyšší řády vln působí již na příliš malém rameni a jsou tedy pro chvění zanedbatelné.

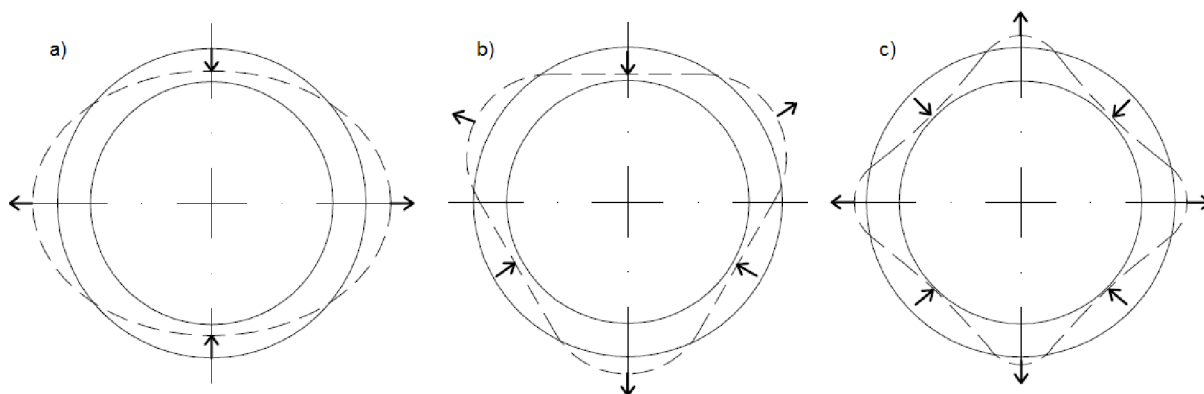
Vlna 0. řádu je rovnoměrně rozprostřena po povrchu rotoru a periodicky se mění ve všech bodech na povrchu rotoru v radiálním směru. Touto periodickou změnou rozměrů způsobují takzvané „dýchání“ rotoru. Vlna je zapříčiněna dvěma složkami magnetomotorického napětí se stejným počtem pólů ovšem s opačnou úhlovou rychlostí.

Vlna 1. řádu je zvláště nebezpečná, pokud je v blízkosti vlastní rezonanční frekvence statoru. Způsobuje totiž jednostranný tah na rotor a může vyvolat silné chvění statoru. Tato vlna je způsobena interferencí dvou vln magnetomotorického napětí s rozdílem pólových dvojic vln o jednu dvojici.



Obrázek 2- deformace rotoru vlnou a) 0. řádu b) 1. řádu (převzato z [2])

Vlny 2. 3. a 4. řádu způsobují prohýbání statorového prstence a následné vibrace rotorového svazku.



Obrázek 3- deformace rotoru vlnou a) 2. řádu b) 3. řádu c) 4. řádu (převzato z [2])

Má-li být motor bezhlučný, neměla by se v něm vyskytnout ani jedna z vln těchto řádů.

### 3.4.1 Velikost magnetomotorického $m$ -fázového vinutí

Profesor Václav Hamata ve svých pracích odvodil vzorec pro velikost magnetomotorického napětí mezi statorem a rotorem  $m$ -fázového vinutí asynchronního motoru. Tento vztah uvažuje motor jako skupinu  $m$  cívek o  $N$  závitěch vzájemně posunutých o  $(2\pi/m)$  elektrických stupňů.[2]

$$F_m(\alpha, t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} NI \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} * \frac{\sin Nv \frac{\alpha_d}{2}}{N \sin v \frac{\alpha_d}{2}} \left\{ \frac{\sin(v+1)\pi}{\sin \left[ \frac{(v+1)}{m} \right] \pi} * \sin \left[ (\omega t + v\alpha) - (v+1) \frac{2\pi}{m} \right] + \frac{\sin(v-1)\pi}{\sin \left[ \frac{(v-1)}{m} \right] \pi} * \sin \left[ (\omega t - v\alpha) - (v-1) \frac{2\pi}{m} \right] \right\} \quad 3.7$$

$N$  – počet závitů vinutí

$\alpha_d$  – prostorový úhel, o který jsou posunuty jednotlivé drážky ( $^\circ$ mech)

$v$  – řád harmonické magnetomotorického napětí

$\alpha_y$  – konstanta určující způsob vinutí, pro symetrické uspořádání pólů se rovná  $\pi$  ( $^\circ$ el)

Pokud bychom tuto rovnici aplikovali na 1 fázové vinutí, dostaneme jednodušší vztah:

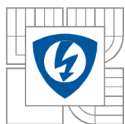
$$F_1(\alpha, t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} NI \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} * \frac{\sin Nv \frac{\alpha_d}{2}}{N \sin v \frac{\alpha_d}{2}} \{ \sin [(\omega t + v\alpha) - (v+1)2\pi] + \sin [(\omega t - v\alpha) - (v-1)2\pi] \} \quad 3.8$$

V této rovnici má výraz mezi sumou a složenou závorkou význam činitele vinutí stroje  $k_{vv}$ . Dále pro symetrická vinutí můžeme říci, že se zde vyskytují pouze vlny harmonického řádu:[2]

$$v = p(2cm \pm 1) \quad 3.9$$

$p$  – počet pólů

$c$  – kladné celé číslo (0,1,2,3,...)



Rovnici 3.8 můžeme přepsat do výsledného vztahu pro výpočet magnetomotorického napětí jednofázového asynchronního motoru:

$$F_1(\alpha, t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} NI \sum_{c=1}^{\infty} \frac{k_{vv}}{p(2c \pm 1)} \{ \sin[(\omega t + v\alpha) - (v+1)2\pi] + \sin[(\omega t - v\alpha) - (v-1)2\pi] \}$$
3.10

Pro tuto rovnici máme čtyři neznámé, a to:

- počet závitů vinutí  $N$
- amplitudu proudu vinutím  $I$
- napájecí frekvenci  $f$
- činitel vinutí  $k_{vv}$ .

### 3.4.1.1 Výpočet činitele vinutí

Činitel vinutí je popsán jako součin dvou parametrů vinutí. Činitele zkrácení kroku a činitele počtu drážek.

$$k_{vv} = k_{yv} * k_q$$
3.11

**Činitel počtu drážek  $k_q$**  je určen jako poměr mezi vektorovým součtem indukovaných napětí a jejich aritmetickým součtem.

**Činitel zkrácení kroku  $k_{yv}$**  je určen jako poměr určitého integrálu magnetické indukce  $v$  řádu  $v$  mezích vytyčených pozicí vinutí v drážce daného pólu v elektrických stupních k integrálu magnetické indukce stejného řádu pro cívku plného kroku, tedy s vinutím v drážce odpovídající  $0^\circ$  elektrických a  $180^\circ$  elektrických. V případě více cívek se počítá činitel pro každou cívku, výsledný činitel je jejich průměrem.

$$k_{yv} = \frac{\sum_{\varphi_0}^{\varphi_1} v \sin \omega t}{\sum_0^{180} v \sin \omega t}$$
3.12

- $v$  – řád harmonické  
 $\varphi_0$  - úhel pozice začátku vinutí ( $^\circ$ el.)  
 $\varphi_1$  - úhel pozice konce vinutí ( $^\circ$ el.)

### 3.4.2 Velikost magnetomotorického napětí klecového vinutí

U jednofázových asynchronních motorů se výhradně používá klecového vinutí u rotoru. Klecové vinutí se dá s velkou přesností považovat za symetrické  $m$ -fázové vinutí s počtem fází [2]:

$$m = \frac{Z''}{2p}$$
3.13

Toto vinutí produkuje pouze harmonické řady odpovídající vztahu [2]

$$v = cZ'' \pm 2p \quad 3.14$$

$c$  – kladné celé číslo (0,1,2,3,...)

Pro tyto řady magnetomotorického napětí pak platí [2]:

$$F_m(\alpha, t) = \frac{Z''}{2p} * \frac{I_T \sqrt{2}}{\pi} \sum_v \frac{1}{v} \sin(\omega t \pm v\alpha) \quad 3.15$$

$I_T$  – proud rotorovou tyčí (A)

Proud tyčí  $I_T$  pak určíme ze vztahu [8]

$$I_T = k_1 \frac{m_1 N_1 k_{v1}}{m_2 N_2 k_{v2}} I_n \quad 3.16$$

$m_1$  – počet fází statoru

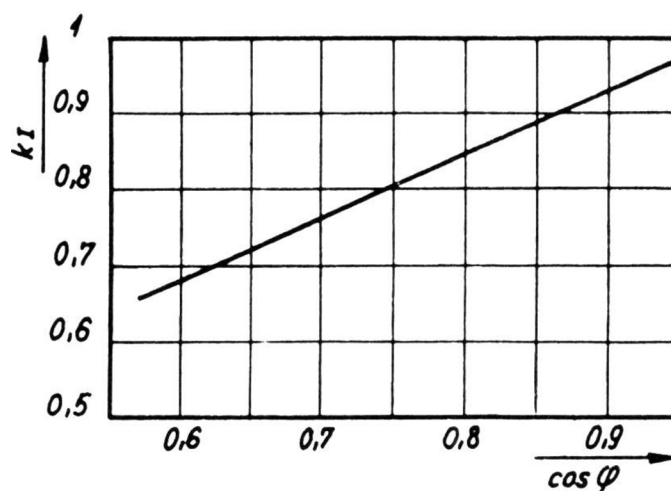
$m_2$  – počet fází rotoru

$N_1$  – počet závitů statoru

$N_2$  – počet závitů rotoru

$I_n$  – jmenovitý proud (A)

$k_1$  – činitel účinníku podle obrázku 4



Obrázek 4- koeficient účinníku pro rotorový proud, převzato z [8]

Pro klecové vinutí pak s velkou přesností platí, že počet fází  $m_2$  se rovná počtu drážek rotoru. Počet závitů cívky  $N_2 = 0,5$  a činitel vinutí  $k_{v2} = 1$ . Pro jednofázový motor s rotorem nakrátko tedy platí.

$$I_T = k_1 \frac{2N_1 k_{v1}}{Z''} I_N \quad 3.17$$

### 3.4.3 Velikost magnetomotorického napětí soustředného vinutí

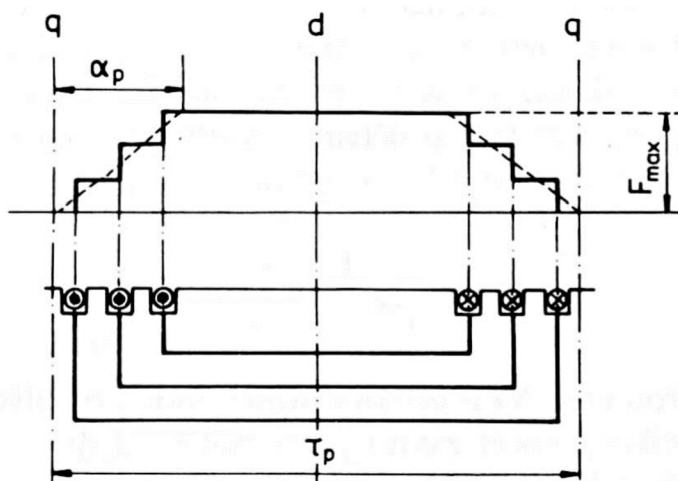
Stejně jako je pro rotorové vinutí typické klecové vinutí, tak u statoru se velmi často používá soustředného vinutí. Magnetomotorické napětí takového vinutí pak vypočítáme podle vztahu [2]:

$$F_m(\alpha) = \frac{4}{\pi} \frac{F_{max}}{\alpha_p} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v^2} \sin v \alpha_p \cos v \alpha \quad 3.18$$

U vinutí tohoto typu se prakticky vyskytují pouze liché násobky pracovní harmonické. Rovnice 3.18 je vztažena pro dvoupólový stroj. Musíme tedy pracovní harmonické přepočítat podle počtu pólových dvojic. Bude tedy rovna [2]:

$$v = (2c \pm 1)p \quad 3.19$$

$c$  – kladné celé číslo (0, 1, 2, 3, ...)



Obrázek 5- rozložení soustředného vinutí, převzato z [2]

### 3.4.4 Vypočet vodivosti vzduchové mezery

Vzduchová mezera, jakožto jeden ze členů rovnice 3.5, je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících radiální tlak ve vzduchové mezeře. Její průběh je z velké části dán konstrukčními vlastnostmi motoru a je ovlivněn hlavně těmito faktory:

Tabulka 1- Faktory ovlivňující vzduchovou mezery

| Faktor                        | Způsob ovlivnění                       |
|-------------------------------|--|
| excentricita vzduchové mezery | změna fyzické výšky vzduchové mezery   |
| průhyby jha                   | změna fyzické výšky vzduchové mezery   |
| sycení plechů                 | zvyšování vodivosti vzduchové mezery   |
| sycení a otevírání drážek     | změna efektivní výšky vzduchové mezery |

V případě, že bychom předpokládali rotor a stator jako dva hladké válce a ideálně rovnoměrné radiální siločáry magnetického pole a nekonečnou permeabilitu železa, můžeme prohlásit, že vodivost magnetické mezery  $\Lambda$  bude pro jednotkové magnetomotorické napětí rovna [6]

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu_0 S_{stat}}{\delta} \quad 3.20$$

$\Lambda$  – vodivost vzduchové mezery ( $\text{m}^{-1}$ )

$R_m$  – magnetický odpor vzduchové mezery ( $\text{A}^{-1}$ )

$\delta$  – délka vzduchové mezery (m)

$S_{stat}$  – plocha vzduchové mezery ( $\text{m}^2$ )

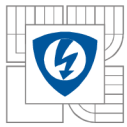
U reálných motorů do tohoto vztahu vstupuje mnoho ovlivňujících faktorů. Jeden z nejdůležitějších je vliv drážkování statoru a rotoru. Statorové a rotorové drážky zde výrazně mění délku vzduchové mezery a tím významně poklesá indukce ve vzduchové mezeře, vzhledem k tomu, že hodnoty relativní permeability hliníku a mědi jsou velmi blízké 1, zanedbáváme jejich vliv jakožto materiálů vedoucího magnetického pole. Hodnotu délky vzduchové mezery musíme tedy dosazovat s ohledem na její proměnlivý průběh závislý na hodnotě úhlové souřadnice  $\alpha$  [6]:

$$\delta(\alpha) = \delta + \Delta_1(\alpha) + \Delta_2(\alpha) \quad 3.21$$

$\Delta_1(\alpha)$  – přírůstek délky vzduchové mezery vlivem drážkování statoru (m)

$\Delta_2(\alpha)$  – přírůstek délky vzduchové mezery vlivem drážkování rotoru (m)





Velikost poklesu magnetické indukce, potažmo magnetické vodivosti vzduchové mezery, s velkou přesností je schopen vyjádřit Carterův činitel (výpočet Caretrova činitele v odstavci 3.4.4.1).

Velikost střední hodnoty vodivosti vzduchové mezeru můžeme určit jako[6]

$$A_{stř} = \frac{\mu_0 S_{stat}}{\delta} \frac{1}{k_{c1} k_{c2}} \quad 3.22$$

$k_{c1}$  – Carterův činitel pro stator

$k_{c2}$  – Carterův činitel pro rotor

Rovnice 3.5 ovšem počítá s hodnotou vodivosti vzduchové mezery přímo v daném bodě určeném úhlovou souřadnicí. Tuto hodnotu můžeme s velkou přesností vypočítat podle vztahu[6]

$$A(\alpha) = \frac{\mu_0 S_{stat}}{\left(\frac{1}{f_1(\alpha)} + \frac{1}{f_2(\alpha)} - \delta\right)} \quad 3.23$$

$f_1(\alpha)$  - funkce s periodou drážkové rozteče popisující ovlivnění mag. vodivosti vlivem drážek statoru

$f_2(\alpha)$  - funkce s periodou drážkové rozteče popisující ovlivnění mag. vodivosti vlivem drážek rotoru

Průběh funkce  $f_1(\alpha)$  můžeme stanovit na základě vzorce[6]:

$$f_1(\alpha) = a_0 - \sum_v a_v \cos(vZ'\alpha) \quad 3.24$$

Průběh funkce  $f_2(\alpha)$  je stejný jako pro  $f_1(\alpha)$  s rozdílem, že používáme rotorové hodnoty[6]:

$$f_2(\alpha) = b_0 - \sum_v b_v \cos(vZ''\alpha) \quad 3.25$$

Koeficienty  $a_v$  pro stator, resp.  $b_v$  pro rotor, získáme z následujícího vztahu s výjimkou 0. řádu.[6]

$$a_v = \frac{\beta}{\delta} F_v \left( \frac{o}{t_d} \right) \quad 3.26$$

$v$  - řád harmonické (1,2,3,...)

$\beta$  - konstanta určující poměr mezi tloušťkou magnetické mezery a šířkou drážky

$\delta$  - tloušťka vzduchové mezery (m)

$F_v \left( \frac{o}{t_d} \right)$  - koeficient amplitudy  $v$ . harmonické magnetického pole podle poměru šířky drážky a drážkové rozteče

Koeficient 0. řádu získáme ze zjednodušeného vztahu [6]

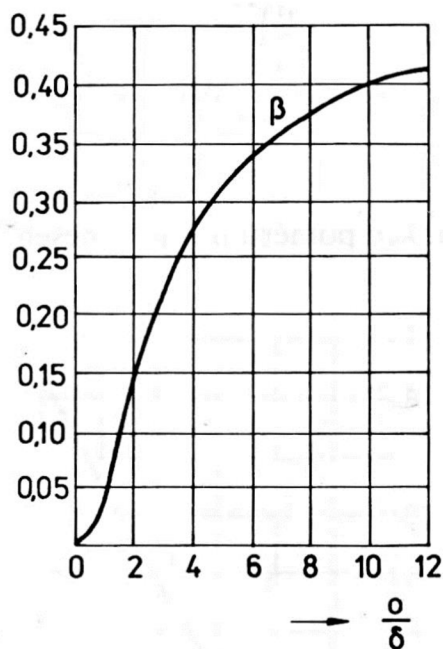
$$a_0 = \frac{1}{k_{c1} \delta} \quad 3.27$$

Funkce pro stanovení koeficientů amplitud vyšších harmonických je dána vztahem [6]

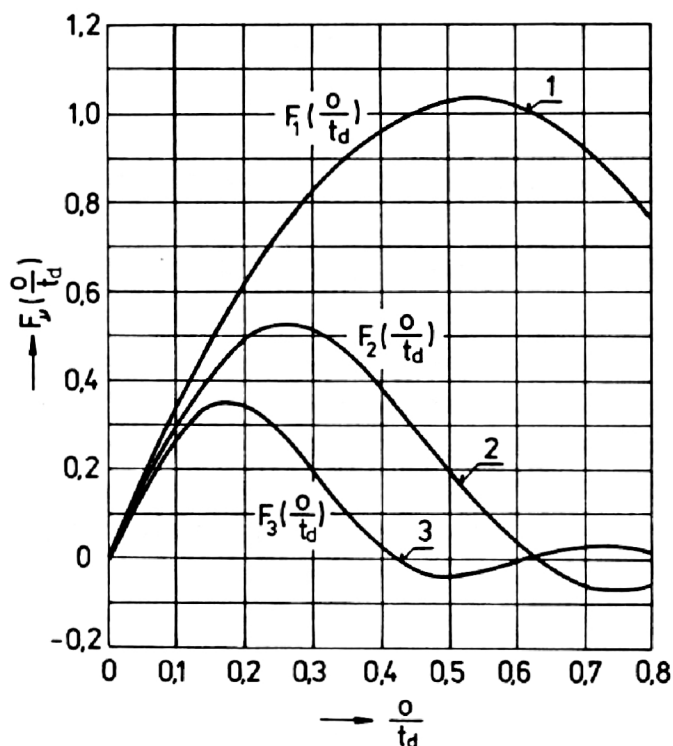
$$F_v \left( \frac{o}{\tau_d} \right) = \frac{1}{v} * \frac{4}{\pi} \left\{ \left[ 0,5 + \frac{\left( v \frac{o}{\tau_d} \right)^2}{0,78 - 2 \left( v \frac{o}{\tau_d} \right)^2} \right] \sin \left( 1,6\pi * v \frac{o}{\tau_d} \right) \right\} \quad 3.28$$

- $v$  - řád harmonické
- $o$  - šířka otevření drážky (m)
- $\tau_d$  - drážková rozteč (m)

Tato závislost je také vynesena v obrázku 6.



Obrázek 6- závislost určující hodnotu konstanty  $\beta$  (převzato z [2])



Obrázek 7- koeficient amplitud vyšších harmonických magnetického pole podle poměru  $(o/t_d)$   
 (převzato z [2])

### 3.4.4.1 Carterův činitel

Vypočítáme-li střední hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, bude její hodnota nad zubem vyšší o konstantu  $k_c$  nazývanou Carterův činitel.

$$B_{max} = \frac{1}{k_c} B_s \quad 3.29$$

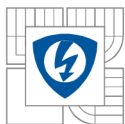
Hodnota tohoto činitele je závislá na fyzických rozměrech magnetického obvodu, a to na šířce drážky, délce vzduchové mezery a drážkové rozteči. Podle Cartera platí [6]

$$k_c = \frac{\tau_d}{\tau_d - \gamma \delta} \quad 3.30$$

Kde  $\gamma$  se rovná [6]

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{o}{2\delta} * \tan^{-1} \left( \frac{o}{2\delta} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{o}{2\delta} \right)^2} \right\} \quad 3.31$$

Je-li drážkovaný jak stator, tak rotor, musíme vypočítat Carterův činitel pro obě části a výsledný činitel bude pak roven [6]



$$k_{c12} = k_{c1}k_{c2} \quad 3.32$$

### 3.5 Jevy ovlivňující magnetický hluk

#### 3.5.1 Vliv harmonických řádů magnetomotorického napětí při konstantní vzduchové mezeře

Pokud prohlásíme vzduchovou mezeru motoru za konstantní prostředí v celém rozsahu úhlu  $\alpha$  a v čase  $t$ , jsou pro nás z hlediska hluku nejdůležitější tyto dva řady harmonických frekvencí magnetomotorického napětí  $v$   $\mu$ . [1]

$$\begin{aligned} v &= Z' \pm p \\ \mu &= Z'' \pm p \end{aligned} \quad 3.33$$

$Z'$  – počet drážek statoru

$Z''$  – počet drážek rotoru

$p$  – počet pólových dvojic

Kvůli tomu, aby tyto harmonické složky magnetomotorického napětí svojí vzájemnou interferencí nezpůsobily deformace podle rovnice 3.6, neměly by splňovat motory tato pravidla: [1]

$$\begin{aligned} |Z' - Z''| &= 0; 1; 2; \dots \\ |Z' - Z''| &= 2p; 2p + 1; 2p + 2; \dots \end{aligned} \quad 3.34$$

Takto vybuzená síla pak v místě o radiálních souřadnicích  $\alpha$  kmitá na frekvenci [1]

$$f_r = f k_{vv} \frac{Z''}{p} (1 - s) \quad 3.35$$

Z tohoto vztahu lze vidět, že frekvence kmitání je přímo závislá na skluzu motoru a tedy i na jeho otáčkách. Od této frekvence, nebo frekvenčního rozsahu, by měla být vzdálena rezonanční frekvence rotoru, neboť obzvlášť při rozběhu nebo velmi nízkých otáčkách zde hrozí zesílení kmitání rotoru rezonančním jevem. Mimo to, že je zde problém s rezonanční frekvencí způsobenou pracovní (sousednou) složkou skluzu, musíme tento vztah počítat také pro inverzní skluz podle kapitoly 4. Proto nám místo jedné frekvence vycházející z rovnice 3.35 dvě frekvence

$$\begin{aligned} f_{r1} &= f k_{vv} \frac{Z''}{p} (1 - s_1) \\ f_{r2} &= f k_{vv} \frac{Z''}{p} (1 - s_2) \end{aligned} \quad 3.36$$

$s_1$  – skluz motoru vůči pracovnímu magnetickému poli (sousednému poli)

$s_2$  – skluz motoru vůči inverzní složce magnetického pole

### 3.5.2 Vliv excentricity rotoru

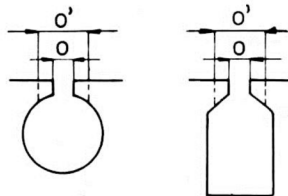
Jak lze vyčíst z rovnice 3.5 je radiální tlak ve vzduchové mezeře závislý na druhé mocnině vodivosti vzduchové mezery, ta je pak nepřímo úměrná výšce vzduchové mezery. Z toho vyplývá, že jakákoli drobná excentricita vyvolá snížení vodivosti vzduchové mezery na jedné straně mezi rotorem a státorem a zvýšení na straně druhé. Výraznější excentricita pak vede k náchylnosti motoru na kmitání odpovídající obrázku 2b). Druhá možnost je, že tato vlna způsobená změnou vodivosti interferuje s vlnou stejného řádu, ale jiného kmitočtu. V takovém případě hrozí riziko vzniku „dýchání“ rotoru neboli kmitání nultého řádu odpovídajícího obrázku 2a).

Na excentricitu je velice důležité si dávat pozor, obzvláště u motorů vyhovujících podmínce[2]:

$$\begin{aligned} |Z' - Z''| &= 3 * p \pm 1 & 3.37 \\ |Z' - Z''| &= p \pm 1 \end{aligned}$$

### 3.5.3 Vliv otevření drážky

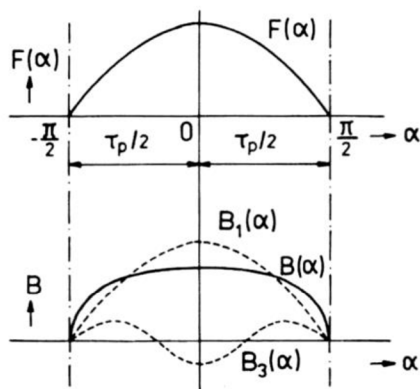
Vlivem ztenčení fyzických rozměrů zubů zavírajících drážku roste sycení magnetickou indukcí přes hodnotu nasycení železa. Jeho relativní permeabilita neboli schopnost vést magnetické pole prudce klesá a nevede na svých koncích tak dobře pole. Z toho důvodu se zavedla fiktivní veličina otevření drážky. Tato veličina udává šířku vzduchové drážky s ekvivalentními vlastnostmi jako reálná drážka s přesycenými zuby v okolí.



Obrázek 8- otevření drážky (převzato z [2])

### 3.5.4 Vliv sycení železa

Z důvodu sycení magnetického obvodu statoru nebo rotoru není materiál schopen přenášet větší intenzity lineárně.



Obrázek 9- deformace magnetické indukce vlivem sycení železa (převzato[2])

Průběh indukovaného napětí je tedy deformován vlivem vyšších harmonických frekvencí pracovní harmonické.[2]

$$f_s = f \left[ \frac{Z'}{2p} \pm \frac{Z''}{2p} \right] (1 - s) \quad 3.38$$

Pro jednotlivé složky skluzu pak můžeme přepsat podle odstavce 4 na:

$$f_s = f \left[ \frac{Z'}{2p} \pm \frac{Z''}{2p} \right] (1 - s_1) \quad 3.39$$

$$f_s = f \left[ \frac{Z'}{2p} \pm \frac{Z''}{2p} \right] (1 - s_2)$$

Pravidlo stanovené pro omezení hluku vznikajícího touto deformací magnetomotorického napětí je [2]:

$$|Z' - Z''| = 2p \quad 3.40$$

$$|Z' - Z''| = 2 * 2p$$

### 3.5.5 Vliv drážkování

Harmonické průběhy magnetomotorického napětí mají stejné řády, jako je uvedeno u napětí v odstavci 3.5.1. Nepřináší tedy žádné další podmínky na počet drážek statorového nebo rotorového vinutí. Musíme si ovšem dát pozor na to, že v průběhu magnetického tlaku mohou vzniknout dvě harmonické vlny stejného řádu, které mají ovšem rozdílnou frekvenci kmitání. Interferencí těchto vln může vzniknout kmitání nultého řádu odpovídající obrázek 2a). Takto rozvibrovaný stator má sklon vydávat velký hluk z důvodů velkého ramena síly. Nemá-li se tedy vyskytovat tato síla, nesmí platit: [2]

$$|Z' - Z''| = p \quad 3.41$$

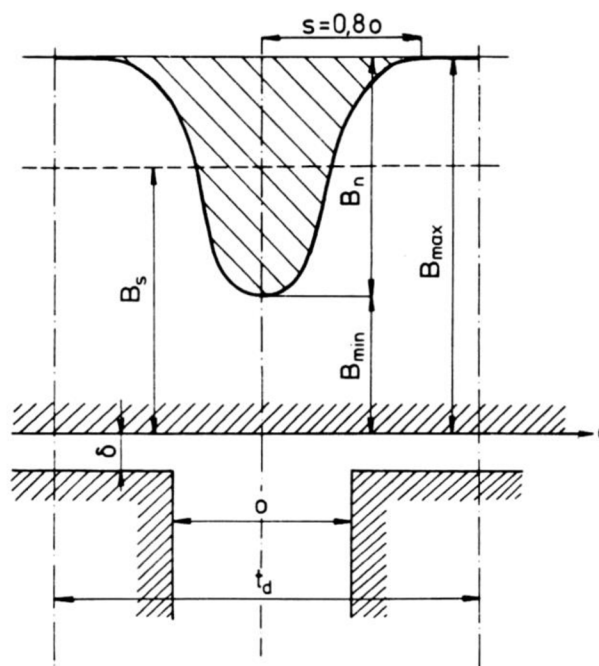
Vzniká zde množství dalších sil s menší amplitudou a se sudým řádem harmonické. Tyto kmity se vyskytují na frekvencích:[2]

$$f_c = 2f \left[ \frac{Z''}{p} (1 - s) \pm 1 \right] \quad 3.42$$

Tuto rovnici musíme, podle odstavce 4, přepsat pro jednotlivé skluzy odpovídající souběžné a protiběžné složce pulzního magnetického pole jednofázového stroje.

$$f_{c1} = 2f \left[ \frac{Z''}{p} (1 - s_1) \pm 1 \right] \quad 3.43$$

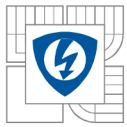
$$f_{c2} = 2f \left[ \frac{Z''}{p} (1 - s_2) \pm 1 \right]$$



Obrázek 10- průběh magnetického pole nad drážkou (převzato z [2])

Časový průběh tohoto vlnění pak vyvolává tlak odpovídající tomuto vztahu: [2]

$$p_r = \frac{\mu_0}{4} H_{\Delta}^2 \{1 - \cos[(\omega \mp Z'' \omega_R)t + (Z'' - Z' \mp p)\alpha]\} \quad 3.44$$



- $H_{\Delta}$  - diferenční pole mezi státorem a rotorem (H)  
 $\omega_r$  - úhlová rychlost rotoru ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $t$  - šířka zubu (m)  
 $p$  - počet pólových dvojic

Kde diferenční pole vypočítáme ze vztahu: [6]

$$H_{\Delta} = \frac{F_1}{2} \left[ \frac{p}{Z' + p} b_1 + \frac{p}{Z'' + p} a_1 \right] \quad 3.45$$

- $F_1$  - magnetomotorické napětí vypočítané podle rovnice 3.10

Pro omezení těchto sil by neměla být splněna tato podmínka: [2]

$$|Z' - Z''| = p; p \pm 1; p \pm 2; \dots \quad 3.46$$

Tlak vypočítaný podle vztahu 3.44 neodpovídá tlaku akustickému. Tento tlak působí statorový svazek a snaží se ho rozkmitat ve smyslu obrázků 2 nebo 3. Výsledný průhyb statorového svazku a tím fyzické rozkmitání vzduchu, které vnímáme jako akustický hluk, je velmi závislé na mechanické pevnosti tohoto svazku.



## 4 HLUK JEDNOFÁZOVÝCH MOTORŮ

Připojíme-li jednofázové vinutí na střídavé napětí, vznikne ve vzduchové mezeře pulzující magnetické pole. Toto magnetické pole můžeme rozdělit na dvě složky s poloviční amplitudou a se stejnými rychlostmi otáčení, ale v rozdílném směru. Takto vzniklé pole není ovšem schopno roztočit rotor, protože jednotlivé složky pole vytvářejí stejně velké momenty rozdílných směrů. V případě, že by byl rotor roztočen vnější silou, motor se bude nadále točit tímto směrem. Pro odstranění této vlastnosti se zapojuje do jednofázových motorů přídavná fáze s posunutou osou vinutí o  $90^\circ$ , která dodá moment pro rozběh a uvede motor do pohybu.

Podle toho, jestli motor odpojuje přídavnou fázi, nebo ji má připojenou pevně bez možnosti odpojení, dělíme jednofázové motory na motory s běhovým kondenzátorem a na motory s rozběhovým kondenzátorem. Toto dělení musíme taktéž respektovat pro analýzu zdrojů hluku.

### 4.1 Motory s běhovým kondenzátorem

První skupinou jednofázových motorů jsou motory s běhovým kondenzátorem. Běhový kondenzátor je zde trvale připojen na pomocnou fázi. Proud touto fází je vlivem kapacity posunut o  $90^\circ$  a spolu s hlavním vinutím vytváří dvoufázové točivé pole.

Výhodou těchto motorů je vyšší moment při nižších rozměrech a fakt, že běhový kondenzátor kompenzuje induktivní charakter motoru a zlepšuje tak celkový účinnost stroje. Jejich celková účinnost je ovšem nižší než u motorů, které přídavnou fázi odpojují, a kondenzátor musí být dimenzován na trvalý provoz.

U tohoto druhu motorů je taktéž složitější provést analýzu hluku z důvodu časté nesymetrie vinutí hlavní pracovní fáze a pomocné fáze, protože mají často rozdílný počet vinutí. Chování těchto motorů se navíc v problematice hluku blíží spíše trojfázovým motorům, neboť se zde neprojevuje vliv protiběžné složky pulzního magnetického pole jako u motorů bez pomocné fáze.

### 4.2 Motory s rozběhovým kondenzátorem

Motory s rozběhovým kondenzátorem se od motorů s běhovým kondenzátorem liší hlavně schopností odpojit přídavnou fázi po dosažení určitých otáček. Tohoto se často dosahuje použitím odstředivého vypínače, který po dosažení daných otáček vybaví. V tom okamžiku ovšem skokově klesá moment motoru, ale pulzní pole již udrží motor otáčet se.

První složka pulzního pole, která rotuje po směru otáčení motoru. Tato složka se nazývá sousledná složka pole, tato složka se při běhu stará o vytvoření momentu motoru. Druhou složkou je pole točící se proti směru otáčení rotoru, tato složka se nazývá inverzní složka.

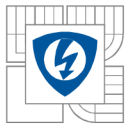
Je-li rychlost otáčení sousledné složky  $n_s = \frac{60f}{p}$ , můžeme vypočítat, že motor se točí vůči pracovnímu poli rychlostí [2]

$$n_r = n_s(1 - s_1) \quad 4.1$$

$n_r$  – rychlost otáčení se rotoru ( $\text{min}^{-1}$ )

$n_s$  – rychlost otáčení se sousledné složky statorového pole ( $\text{min}^{-1}$ )

Skluzy vůči pracovní složce magnetického pole je



$$s_1 = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad 4.2$$

potom vzhledem k inverzní složce magnetického pole má rotor rychlost. [2]

$$n_r' = n_s(s_1 - 2) \quad 4.3$$

$n_r'$  – rychlost otáčení se rotoru vůči inverzní složce magnetického pole ( $\text{min}^{-1}$ )

Vzhledem k protiběžné složce můžeme definovat vztah pro skluz  $s_2$ , který je definován jako poměrné zpoždění otáček rotoru proti protiběžné složce magnetického pole statoru. Jeho velikost je pak [2]

$$s_2 = \frac{-n_s - n_s(1 - s_1)}{n_s} = 2 - s_1 \quad 4.4$$

Pro navrhování motoru, s ohledem na jeho budoucí hlučnost, analyzujeme jednotlivé složky zvlášť, přičemž složka sledující souslednou složku magnetického pole se chová naprosto stejně jako točivé magnetické pole třífázového vinutí. Můžeme tedy do všech rovnic vztažených pro třífázový motor dosadit hodnoty námi řešeného motoru s tím, že dosadíme za skluz  $s = s_1$ . Vzhledem k tomu, že tyto vztahy pro třífázový motor jsou většinou odvozovány pro obecné platnosti radiálních sil, lze je také použít pro inverzní složku magnetického pole a to tak, že za  $s = s_2$ . Vzhledem k tomu, že v normálním chodu pracuje motor daleko od synchronních otáček inverzní složky, bere se tato složka v úvahu více méně pouze pro rozběh motoru, jeho brždění nebo reverzací. V ostatních případech je vliv této složky téměř zanedbatelný.

## 5 ANALÝZA MOTORU

### 5.1 Motor

Pro analýzu byl vybrán jednofázový motor společnosti Siemens Mohelnice. Základní parametry tohoto stroje jsou:

Tabulka 2- parametry analyzovaného motoru

| Parametr                             | Označení        | Hodnota | Jednotka          |
|--------------------------------------|-----------------|---------|-------------------|
| Jmenovité napětí                     | $U_n$           | 230,00  | V                 |
| Jmenovitý proud                      | $I_n$           | 2,65    | A                 |
| Jmenovité otáčky                     | $n_n$           | 1395,00 | $\text{min}^{-1}$ |
| Účinník                              | $\cos(\varphi)$ | 0,95    |                   |
| Jmenovitá frekvence                  | $f_n$           | 50,00   | Hz                |
| Počet drážek statoru                 | $Z'$            | 24,00   |                   |
| Počet drážek rotoru                  | $Z''$           | 18,00   |                   |
| Počet pólových dvojic                | $2p$            | 2,00    |                   |
| Počet závitů vinutí cívky            | $N_z$           | 96,00   |                   |
| Výška vzduchové mezery               | $\Delta$        | 0,20    | mm                |
| Otevření drážky statoru              | $o'_s$          | 2,55    | mm                |
| Otevření drážky rotoru               | $o'_r$          | 1,00    | mm                |
| Průřez drážky rotoru                 | $S_{dr}$        | 58,20   | $\text{mm}^2$     |
| Vnitřní průměr statoru               | $D_{is}$        | 65,40   | mm                |
| Vnější průměr rotoru                 | $D_{or}$        | 65,00   | mm                |
| Počet závitů hlavního vinutí statoru | $N$             | 96      |                   |
| Proud tyčí rotoru                    | $L_{tyč}$       | 150     | A                 |
| Délka rotorového svazku              | $l_{fe}$        | 55,00   | mm                |

### 5.2 Výpočty základních parametrů motoru

#### 5.2.1 Výpočet skluzů motoru

Podle rovnic 4.2 a 4.4

$$s_1 = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\frac{f_n * 60}{2p} - n_r}{\frac{f_n * 60}{2p}} = \frac{\frac{50 * 60}{2} - 1395}{\frac{50 * 60}{2}} = 0,07 \quad (5.1)$$

$$s_2 = \frac{-n_s - n_s(1 - s_1)}{n_s} = 2 - s_1 = 2 - 0,07 = 1,93$$

## 5.2.2 Výpočet činitele vinutí statoru

Podle odstavce 3.4.1.1 a schématu vinutí dosadím do vztahu 3.12 pro činitel kroku cívky

$$\begin{aligned}k_{yv} &= \frac{\sum_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sin \varphi d\varphi}{\sum_0^{180} \sin \varphi d\varphi} = \frac{2 \int_{30}^{150} \sin \varphi d\varphi + \int_0^{180} \sin \varphi d\varphi}{3 \int_0^{180} \sin \varphi d\varphi} \\ &= \frac{2[-\cos 150 - -\cos 30] + [-\cos 180 - -\cos 0]}{3[-\cos 180 - -\cos 0]} = 0,9107\end{aligned}\quad 5.2$$

Střed os vinutí je vždy ve středu pólu, činitel drážek  $k_q$  je tedy roven 1.

Výsledný činitel vinutí motoru pro 1. harmonickou bude tedy roven:

$$k_{vv} = k_{yv} * k_q = 0,9107 * 1 = 0,9107 \quad 5.3$$

## 5.2.3 Určení Carterových činitelů

Pro určení Carterova činitele pro stator a pro rotor postupujeme podle odstavce 3.4.4.1

### 5.2.3.1 Drážkové rozteče

**Stator:**

$$\tau_{ds} = \frac{\pi D_{os}}{Z'} = \frac{\pi * 65,4}{24} = 8,561mm \quad 5.4$$

**Rotor:**

$$\tau_{dr} = \frac{\pi D_{or}}{Z''} = \frac{\pi * 65}{18} = 11,345mm \quad 5.5$$

Dále si vypočítáme konstanty  $\gamma$  potřebné pro dosazení do rovnice 3.30, podle rovnice 3.31

**Stator:**

$$\begin{aligned}\gamma_s &= \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{o}{2\delta} * \tan^{-1} \left( \frac{o}{2\delta} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{o}{2\delta} \right)^2} \right\} \\ &= \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{2,55}{2 * 0,2} * \tan^{-1} \left( \frac{2,55}{2 * 0,2} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{2,55}{2 * 0,2} \right)^2} \right\} = 9,113\end{aligned}\quad 5.6$$

**Rotor:**

$$\begin{aligned} \gamma_r &= \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{o}{2\delta} * \tan^{-1} \left( \frac{o}{2\delta} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{o}{2\delta} \right)^2} \right\} \\ &= \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{1}{2 * 0,2} * \tan^{-1} \left( \frac{1}{2 * 0,2} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{1}{2 * 0,2} \right)^2} \right\} = 2,528 \end{aligned} \quad 5.7$$

**Stator:**

$$k_{c1} = \frac{\tau_{ds}}{\tau_{ds} - \gamma_s \delta} = \frac{8,561}{8,561 - 9,113 * 0,2} = 1,27 \quad 5.8$$

**Rotor:**

$$k_{c2} = \frac{\tau_{dr}}{\tau_{dr} - \gamma_r \delta} = \frac{11,345}{11,345 - 2,528 * 0,2} = 1,047 \quad 5.9$$

**Carterův činitel** podle vztahu 3.32.

$$k_{c12} = k_{c1} k_{c2} = 1,27 * 1,047 = 1,33 \quad 5.10$$

## 5.3 Výpočet radiálního tlaku

Pro výpočet tlaku podle rovnice 3.5 z odstavce 3.4 musíme určit kromě průběhů magnetomotorických napětí statoru a rotoru magnetickou vodivost vzduchové mezery.

### 5.3.1 Výpočet vodivosti vzduchové mezery

Tento výpočet je popsán v odstavci 3.4.4

Podle rovnice 3.28 vypočítáme koeficient  $F_v \left( \frac{o}{\tau_d} \right)$  potřebný k výpočtu koeficientů  $a_o, a_v$  podle rovnice 3.26. Provedeme zde pouze výpočet pro 1. harmonickou vyšší harmonické jsou v dalších výpočtech zahrnuty jako výsledky ze skriptu z programu MATLAB, ukázkou výpočtového skriptu ukazuje obrázek 11.

**Stator**

$$\begin{aligned} F_{v=1s} \left( \frac{o_s}{\tau_{ds}} \right) &= \frac{1}{v} * \frac{4}{\pi} \left\{ \left[ 0,5 + \frac{\left( v \frac{o_s}{\tau_{ds}} \right)^2}{0,78 - 2 \left( v \frac{o_s}{\tau_{ds}} \right)^2} \right] \sin \left( 1,6\pi * v \frac{o_s}{\tau_{ds}} \right) \right\} \\ &= \frac{4}{\pi} \left\{ \left[ 0,5 + \frac{\left( \frac{2,55}{8,561} \right)^2}{0,78 - 2 \left( \frac{2,55}{8,561} \right)^2} \right] \sin \left( 1,6\pi * \frac{2,55}{8,561} \right) \right\} = 0,8219 \end{aligned} \quad 5.11$$

Koeficient  $a_o$  určíme podle rovnice 3.27.

$$a_o = \frac{1}{k_{c1} \delta} = \frac{1}{1,27 * 0,2 * 10^{-3}} = 3937$$

Konstantu  $\beta$  pro stator určíme podle obrázku 6 jako  $\beta = 0,415$

$$a_{v=1} = \frac{\beta}{\delta} F_{v=1s} \left( \frac{o_s}{\tau_{ds}} \right) = \frac{0,415}{0,2 * 10^{-3}} * 0,8219 = 1705 \quad 5.12$$

### Rotor

Postupujeme stejně jako u statoru, a stejně jako u statoru zde uvedeme pouze výpočet 0. a 1. harmonické.

$$F_{v=1r} \left( \frac{o_r}{\tau_{dr}} \right) = \frac{1}{v} * \frac{4}{\pi} \left\{ \left[ 0,5 + \frac{\left( v \frac{o_r}{\tau_{dr}} \right)^2}{0,78 - 2 \left( v \frac{o_r}{\tau_{dr}} \right)^2} \right] \sin \left( 1,6\pi v * \frac{o_r}{\tau_{dr}} \right) \right\} \quad 5.13$$

$$= \frac{4}{\pi} \left\{ \left[ 0,5 + \frac{\left( \frac{1}{11,345} \right)^2}{0,78 - 2 \left( \frac{1}{11,345} \right)^2} \right] \sin \left( 1,6\pi * \frac{1}{11,345} \right) \right\} = 0,2785$$

Konstantu  $\beta$  pro rotor určíme podle obrázku 6 jako  $\beta = 0,32$

$$b_{v=1} = \frac{\beta}{\delta} F_{v=1r} \left( \frac{o_r}{\tau_{dr}} \right) = \frac{0,415}{0,2 * 10^{-3}} * 0,2785 = 445 \quad 5.14$$

Koeficient  $b_0$  určíme podle rovnice 3.27.

$$b_0 = \frac{1}{k_{c2} \delta} = \frac{1}{1,045 * 0,2 * 10^{-3}} = 4784 \quad 5.15$$

Následuje určení průběhů funkcí podle rovnic 3.24, respektive 3.25, a jejich dosazení do rovnice 3.23. Tento výpočet provádíme ve skriptu určeného pro program MATLAB pomocí cyklu až do řádu 99. harmonické.

```
SUMA=0;
for c=1:1:99
    FoTau=(4/(pi()*c))*(0.5+((c*o_stat/TauD_stat)^2)/(0.78-2*(c*o_stat/TauD_stat)^2))*sin(1.6*pi()*c*o_stat/TauD_stat);
    SUMA=SUMA+((betaA1/air_gap)*FoTau*cos(c*Z1.*alfa));
end
f10=(1/(Kc1*air_gap))-SUMA;

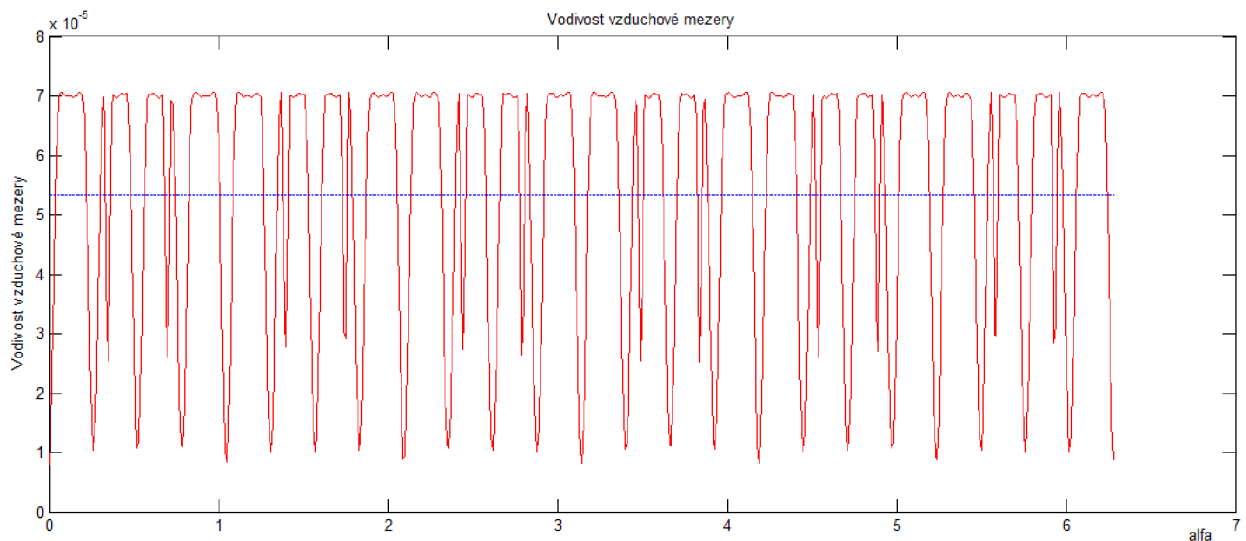
SUMA=0;
for c=1:1:99
    FoTau=(4/(pi()*c))*(0.5+((c*o_rot/TauD_rot)^2)/(0.78-2*(c*o_rot/TauD_rot)^2))*sin(1.6*pi()*c*o_rot/TauD_rot);
    SUMA=SUMA+((betaB1/air_gap)*FoTau*cos(c*Z2.*alfa));
end
f20=(1/(Kc2*air_gap))-SUMA;

S=2*pi()*Dvnejsirot/2+air_gap)*lFe;
delka_mezery=(1./f10+1./f20-air_gap);

vodivost_mezery=(4e-7*pi()*S)./delka_mezery;
```

Obrázek 11- skript pro výpočet harmonických rozvoje vodivosti vzduchové mezery

Výsledný průběh magnetické vodivosti vzduchové mezery můžeme zobrazit v grafu na obrázku 12, červený průběh.



Obrázek 12- Průběh magnetické vodivosti vzduchové mezery

### 5.3.2 Výpočet magnetomotorického napětí statoru

Výpočet magnetomotorického napětí je popsán v odstavci 0. Z tohoto odstavce použijeme rovnici 3.18. Do této rovnice musíme doplnit amplitudu indukovaného napětí cívky  $F_{max}$  a úhel  $\alpha_p$  popisující úhel zabírající drážky vyplněné vinutím daného pólu podle obrázku 5.

Z diagramu vinutí určíme, že  $\alpha_p = 30^\circ$

Amplitudu indukovaného napětí vypočítáme jako součin počtu závitů a amplitudou proudu.

$$F_{max} = N\sqrt{2}I_n = 96 * \sqrt{2} * 2,65 = 359,6A \quad 5.16$$

Dále je pro rovnici určit řady harmonických, které by se mohly vyskytovat v indukcích tohoto vinutí. Podle vztahu 3.19 určíme základní řady:

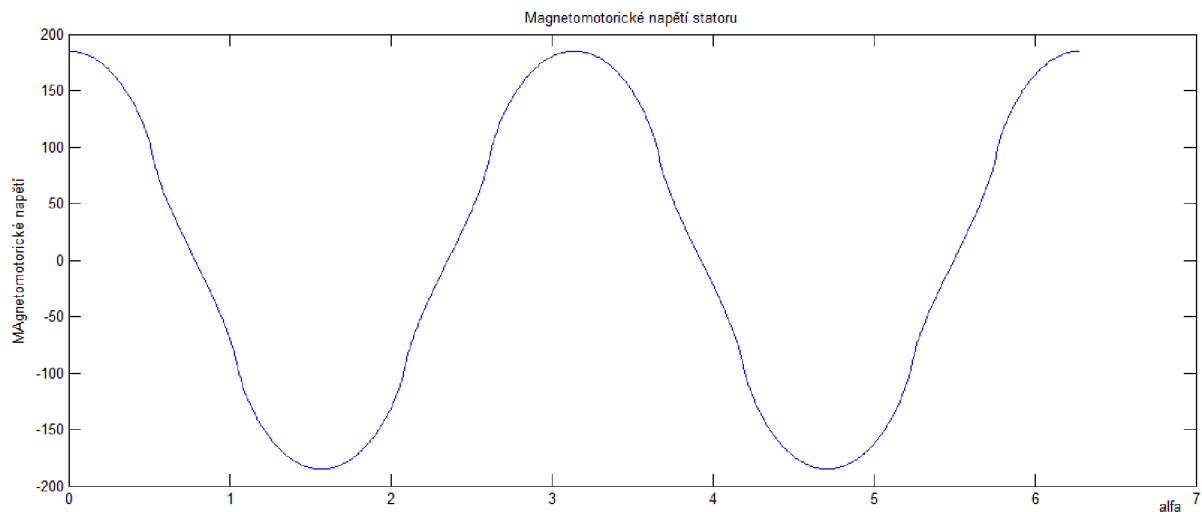
$$v = (2c \pm 1)2p = (2c \pm 1) * 4 \quad 5.17$$

Tento výpočet a následný výpočet rovnice 3.18, provádíme opět pomocí skriptu v programu MATLAB.

```
SUMA=0;
for c=0:1:100
    k=(2*c-1)*p2;
    if k>-1
        SUMA=SUMA+((1/(k*k))*sin(k*alfaP)*cos(k.*alfa));
    end
end
F_stat=(4*Fmax)/(pi()*alfaP)*SUMA;
```

Obrázek 13- skript pro výpočet magnetomotorického napětí soustředného vinutí statoru

Průběh takto vypočteného napětí pak ukazuje následující graf.



Obrázek 14- magnetomotorické napětí statoru ve vzduchové mezeře

### 5.3.3 Výpočet magnetomotorického napětí rotoru

Postup výpočtu magnetomotorického napětí pro rotor uvádí odstavec 3.4.2. Zde je proces jednodušší. Jedná se o pouhé dosazení do vzorce 3.15. Pro řády odpovídající podmínce 3.14 a to

$$v = cZ'' \pm 2p = 18c \pm 2 \quad 5.18$$

Jediný parametr, který musíme dopočítat, je proud tyčí rotoru  $I_T$  podle rovnice 3.17.

$$I_T = k_1 \frac{2N_1 k_{v1}}{Z''} I_N = 0,95 * \frac{2 * 3 * 96 * 0,91}{18} * 2,65 = 73,36A \quad 5.19$$

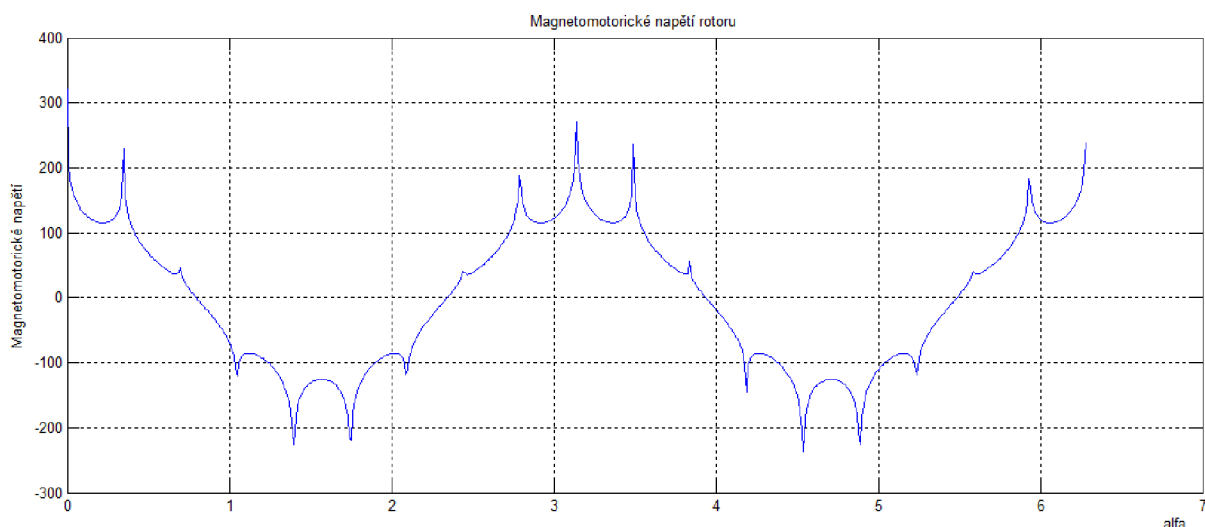
Výpočet rovnice 3.15 pro řády odpovídající vztahu 5.18 pro  $c$  od 0 do 100 provádí následující skript. Hodnota času 5ms odpovídá času amplitudy napětí.

```
cas=0.005;
SUMA=0;
for c=0:1:100
    k=c*Z2+p2;
    SUMA=SUMA+(1/k)*(sin(2*pi()*fn.*cas+k.*alfa));
    if (c>0)
        k=c*Z2-p2;
        SUMA=SUMA+(1/k)*(sin(2*pi()*fn.*cas+k.*alfa));
    end
end
F_klec=(Z2*Ityc*sqrt(2))/(p2*pi())*SUMA;
```

Obrázek 15- skript pro výpočet magnetomotorického napětí klecového vimutí rotoru

Výsledkem tohoto výpočtu je pak graf zobrazený na obrázku 16





Obrázek 16- magnetomotorické napětí rotoru

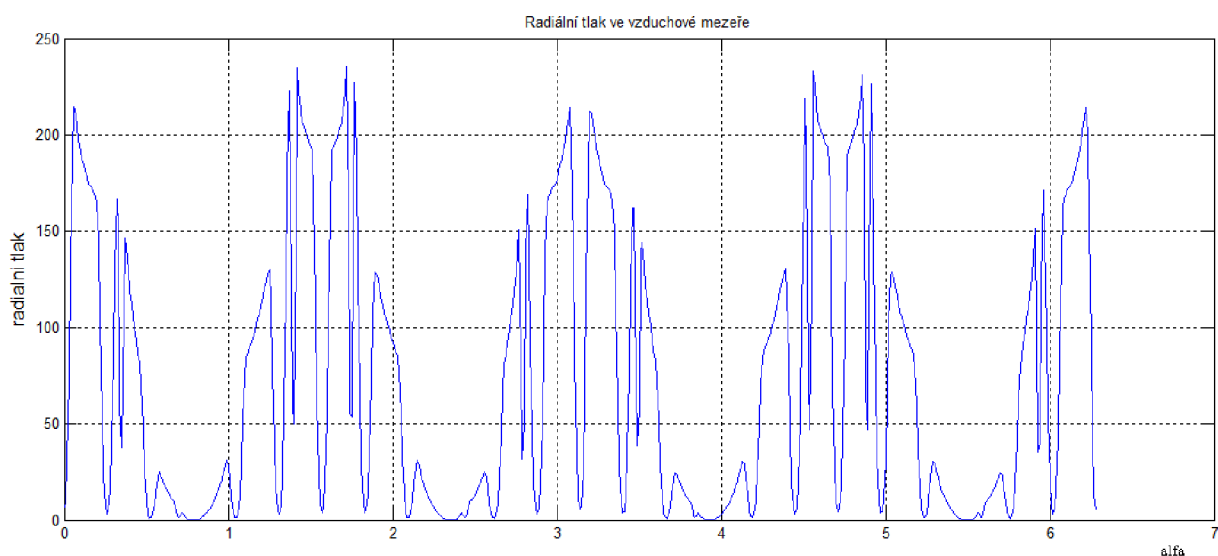
### 5.3.4 Výpočet radiálního tlaku

Samotný radiální tlak pak určíme ze vztahu 3.5. Neboť se jedná o výpočet sestávající se z průběhů tří veličin proměnných v úhlové souřadnici vzduchové mezery. Provádím opět tento výpočet v programu MATLAB jednoduchým příkazem

```
p=(1/(8e-7*pi()))*((F_klec+F_stat).^2).*vodivost_mezery.^2;
```

Obrázek 17- příkaz pro výpočet radiálního tlaku

Výsledkem tohoto výpočtu je pak zobrazení radiálního tlaku ve vzduchové mezeře v závislosti na úhlové pozici.



Obrázek 18- radiální tlak ve vzduchové mezeře

## 5.4 Výpočty oscilačních kmitočtů způsobených magnetickým polem

### 5.4.1 Vlivem harmonických složek magnetomotorického napětí

Vlivem interferencí magnetomotorického napětí je nebezpečí vzniku kmitání o frekvenci určené rovnicemi 3.36. Dosazením obou složek skluzu do této rovnice dostaneme první dvě frekvence, na kterých má motor sklon hlučet.

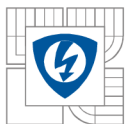
$$\begin{aligned}f_{r1} &= f k_{vv} \frac{Z''}{p} (1 - s_1) = 50 * 0,9107 * \frac{18}{4} (1 - 0,07) = 190,56\text{Hz} \\f_{r2} &= f k_{vv} \frac{Z''}{p} (1 - s_2) = 50 * 0,9107 * \frac{18}{4} (1 - 1,97) = -190,56\text{Hz}\end{aligned}\tag{5.20}$$

Záporná hodnota  $f_{r2}$  nám říká, že radiální síla opisuje vzduchovou mezeru v opačném smyslu než je směr šíření se protiběžné složky pulzního magnetického pole statoru. Jeho směr bude tedy shodný s otáčením rotoru.

### 5.4.2 Vlivem drážkování

Vlivem neharmonických průběhů proudů indukovaných do klece rotoru a jeho nižšího počtu drážek je magnetické pole rotoru zdrojem většího počtu kmitů s menší amplitudou odpovídající sudým násobkům pracovní harmonické frekvence. Tyto kmity jsou mimo jiné také závislé na skluzu motoru, je nutné je tedy počítat dvakrát jak pro skluz vůči pracovní složce, tak vůči složce protiběžné. Frekvenci těchto kmitů pak určuje rovnice 3.43.

$$\begin{aligned}f_{c1} &= 2f \left[ \frac{Z''}{p} (1 - s_1) \pm 1 \right] = 2 * 50 \left[ \frac{18}{4} (1 - 0,07) + 1 \right] = 518,5\text{Hz} \\f_{c2} &= 2f \left[ \frac{Z''}{p} (1 - s_1) \pm 1 \right] = 2 * 50 \left[ \frac{18}{4} (1 - 0,07) - 1 \right] = 318,5\text{Hz} \\f_{c3} &= 2f \left[ \frac{Z''}{p} (1 - s_2) \pm 1 \right] = 2 * 50 \left[ \frac{18}{4} (1 - 1,93) + 1 \right] = -318,5\text{Hz} \\f_{c4} &= 2f \left[ \frac{Z''}{p} (1 - s_2) \pm 1 \right] = 2 * 50 \left[ \frac{18}{4} (1 - 1,93) - 1 \right] = -518,5\text{Hz}\end{aligned}\tag{5.21}$$



### 5.4.3 Vlivem sycení železa

Deformace magnetomotorického napětí vlivem nelineárního přenosu magnetické indukce může způsobit kmitání na frekvencích určených podle vztahu 3.39

$$\begin{aligned}f_{s1} &= f \left[ \frac{Z'}{2p} + \frac{Z''}{2p} \right] (1 - s_1) = 50 \left[ \frac{24}{2} + \frac{18}{2} \right] (1 - 0,07) = 224,13Hz \\f_{s2} &= f \left[ \frac{Z'}{2p} - \frac{Z''}{2p} \right] (1 - s_1) = 50 \left[ \frac{24}{2} - \frac{18}{2} \right] (1 - 0,07) = 34,88Hz \\f_{s3} &= f \left[ \frac{Z'}{2p} + \frac{Z''}{2p} \right] (1 - s_2) = 50 \left[ \frac{24}{2} + \frac{18}{2} \right] (1 - 1,93) = -224,13Hz \\f_{s4} &= f \left[ \frac{Z'}{2p} \pm \frac{Z''}{2p} \right] (1 - s_2) = 50 \left[ \frac{24}{2} - \frac{18}{2} \right] (1 - 1,93) = -34,88Hz\end{aligned} \tag{5.22}$$

## 6 ZÁVĚR

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že magnetický hluk je neoddělitelně spjat s provozem asynchronních strojů. Zdroje hluku jsou přímo závislé na základních funkčních prvcích motorů a lze je pouze omezit vhodným návrhem stroje úpravou jeho dimenzování.

Pravidla pro omezení hluku ovšem nemůžou být brána jako hlavní podmínky pro návrh stroje hlavně z důvodu stále zvyšujícího se nároku na účinnosti elektrických točivých strojů.

Podle mnou studované literatury a teorií pro omezení magnetického hluku motoru by měla být dodržována následující pravidla

Tabulka 3- Podmínky omezení hluku

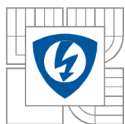
| Hluk vzniklý vlivem   | Podmínka omezení  |
|---|---|
| Harmonických složek magnetomotorického napětí při konstantní vzduchové mezeře | $ Z' - Z''  = 0; 1; 2; \dots$<br>$ Z' - Z''  = p; p + 1; p + 2; \dots$                      |
| Sycení železa   | $ Z' - Z''  = 2p$<br>$ Z' - Z''  = p$   |
| Excentricity rotoru   | $ Z' - Z''  = 3 * p \pm 1$<br>$ Z' - Z''  = 2p \pm 1$                                       |
| Drážkování rotoru   | $ Z' - Z''  = 3 * p \pm 1$<br>$ Z' - Z''  = p$<br>$ Z' - Z''  = p; p \pm 1; p \pm 2; \dots$ |

Z analýzy jednofázového motoru můžu prohlásit, že podle ukazatelů; vypsanych v tabulce 3, může mít tento motor sklon ke vzniku hluku z důvodu vzniků interferencí magnetomotorických napětí, vlivem drážkování rotoru. Důvodem je že:

$$|Z' - Z''| = p + 2$$

$$|Z' - Z''| = p$$

Rizikové frekvence pro hluk způsobený magnetickým polem bych pak očekával na frekvencích:

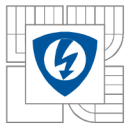


Tabulka 4- Rizikové frekvence pro kmitání motoru

| Hluk vzniklý vlivem   | Frekvence                                 |
|---|---|
| Harmonických složek magnetomotorického napětí při konstantní vzduchové mezeře | $f_{r1} = 190Hz$                          |
| Sycení železa   | $f_{s1} = 224,13Hz$<br>$f_{s2} = 34,88Hz$ |
| Drážkování rotoru   | $f_{c1} = 518Hz$<br>$f_{c2} = 318Hz$      |

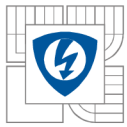
Frekvence 224Hz a 35Hz nejsou tak kritické, neboť motor je vhodně navržen pro jejich potlačení, zvýšenou hlučnost ovšem očekávám v okolí frekvencí 190Hz, 318Hz a 518Hz.

Bohužel k danému motoru jsem nezískal hlukovou analýzu, nemůžu vypočtené hodnoty srovnat s měřením.



## LITERATURA

- [1] KAŠÍK, Antonín. *Hluk točivých elektrických strojů: vypracoval kolektiv pracovníků útvaru pro výzkum a laboratoře*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1964, 265 s.
- [2] HAMATA, Václav. *Hluk elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1987, 171 s.
- [3] Akustika.: *WebFyzika: Fyzikální webové stránky* [online]. Fakulta stavební ČVUT v Praze [cit. 2012-10-28]. Dostupné z: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/akustika.pdf>
- [4] HAŠA, Jaroslav. *Chvění a hluk asynchronních strojů*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1968, 87 s.
- [5] *Snižování hlučnosti strojů: 3. září 1985, Praha*. Plzeň: Dům techniky ČSVTS, 1985, 60 s.
- [6] HELLER, Bedřich a Václav HAMATA. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961, 202 s.
- [7] KNAP, Z. *Eliminace hluku u jednofázových asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 21 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [8] Návrh vinutí rotoru AM. : *Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze* [online]. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: [http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/X14OEO/5\\_Vinuti\\_rotoru\\_AM.pdf](http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/X14OEO/5_Vinuti_rotoru_AM.pdf)



## PŘÍLOHY

### Skript programu MATLAB

```
clc;
alfa=0:0.01:2*pi();
U= 230;
I= 2.65;
n=1395;
fn=50;
Z1=24;
Z2=18;
p2=2;
p=4;
air_gap=0.2e-3;
s1=((3000/p2*2-n)/(3000/p2*2));
s2=2-s1;
Kvr=0.9107;
Dvnitrnizat=65.4e-3;
Dvnejsirot=65e-3;
o_stat=2.55e-3;
o_rot=1e-3;
lFe=55e-3;
N1=96;

%uhlova souradnice ve vzduchove mezere
%nominalni napeti
%nominalni proud
%nominalni otacky
%nominalni frekvence
%Pocet drazek statoru
%Pocet drazek rotoru
%Pocet polovych dvojic
%pocet polů
%vzduchova mezera
%skluz 1
%skluz 2
%Cinitel vinuti
%vnitni prumer statoru
%vnejsi prumer statoru
%otevreni drazky statoru
%otevreni drazky rotoru
%delka rotoru
%pocet zavitu statorove civky

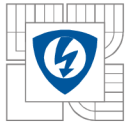
%Drazkova roztec statoru
TauD_stat=pi()*Dvnitrnizat/Z1;
O_tauD_stat=o_stat/TauD_stat;

%Drazkova roztec statoru
TauD_rot=pi()*Dvnejsirot/Z2;
O_tauD_rot=o_rot/TauD_rot;

%uhel zabrany drazkami jednoho polu/2
alfaP= 2*pi()*30/360;
%amplituda MMN nad jednim polem
Fmax= sqrt(2)*pocet_zavitu*I ;

%MMN soustredneho vinuti statoru
SUMA=0;
for c=0:1:100
    k=(2*c-1)*p2;
    if k>-1
        SUMA=SUMA+((1/(k*k))*sin(k*alfaP)*cos(k.*alfa));
    end
end
F_stat=(4*Fmax)/(pi()*alfaP)*SUMA;

%proud tyci
```



```
k_tyc=(6*N1*Kvr)/(Z2);  
k_tyc2=0.95;  
Ityc=k_tyc*k_tyc2*I;
```

```
cas=0.005;  
%MMN klece rotoru  
SUMA=0;  
for c=0:1:100  
    k=c*Z2+p2;  
    SUMA=SUMA+(1/k)*(sin(2*pi()*fn.*cas+k.*alfa));  
    if (c>0)  
        k=c*Z2-p2;  
        SUMA=SUMA+(1/k)*(sin(2*pi()*fn.*cas+k.*alfa));  
    end  
end  
F_klec=(Z2*Ityc*sqrt(2))/(p2*pi()*SUMA);
```

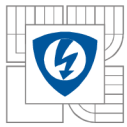
```
%podle obrazku 5  
betaA1=0.42;  
betaB1=0.32;  
  
%vodivost vzduchove mezery  
gamma_stat=(4/pi()*((o_stat/(2*air_gap))*atan(o_stat/(2*air_gap))-  
log(sqrt(1+(o_stat/(2*air_gap))^2))));  
Kc1=TauD_stat/(TauD_stat-(gamma_stat*air_gap));  
gamma_rot=(4/pi()*((o_rot/(2*air_gap))*atan(o_rot/(2*air_gap))-  
log(sqrt(1+(o_rot/(2*air_gap))^2))));  
Kc2=TauD_rot/(TauD_rot-(gamma_rot*air_gap));
```

```
SUMA=0;  
for c=1:1:99  
    FoTau=(4/(pi()*c))*(0.5+((c*o_stat/TauD_stat)^2)/(0.78-  
2*(c*o_stat/TauD_stat)^2))*sin(1.6*pi()*c*o_stat/TauD_stat);  
    SUMA=SUMA+((betaA1/air_gap)*FoTau*cos(c*Z1.*alfa));  
end  
f10=(1/(Kc1*air_gap))-SUMA;
```

```
SUMA=0;  
for c=1:1:99  
    FoTau=(4/(pi()*c))*(0.5+((c*o_rot/TauD_rot)^2)/(0.78-  
2*(c*o_rot/TauD_rot)^2))*sin(1.6*pi()*c*o_rot/TauD_rot);  
    SUMA=SUMA+((betaB1/air_gap)*FoTau*cos(c*Z2.*alfa));  
end  
f20=(1/(Kc2*air_gap))-SUMA;
```

```
S=2*pi()*Dvnejsirot/2+air_gap)*IFe;  
delka_mezery=(1./f10+1./f20-air_gap);
```





```
vodivost_mezery=(4e-7*pi()*(S))./delka_mezery;

str_vodivost_mezery=(4e-7*pi()*S)/(Kc1*Kc2*air_gap);

p=(1/(8e-7*pi()))*((F_klec+F_stat).^2).*vodivost_mezery.^2;

%hluk pri konstantni mezere
f_mezera1=fn*Kvr*(Z2/(p2))*(1-s1);
f_mezera2=fn*Kvr*(Z2/p2)*(1-s2);

%syzeni zeleza
f_zeleza1=fn*((Z1/p2/2)+(Z2/p2/2))*(1-s1);
f_zeleza2=fn*((Z1/p2/2)-(Z2/p2/2))*(1-s1);
f_zeleza3=fn*((Z1/p2/2)+(Z2/p2/2))*(1-s2);
f_zeleza4=fn*((Z1/p2/2)-(Z2/p2/2))*(1-s2);

%drazkovani
f_drazka1=2*((Z2/p2)*(1-s1)+1)*fn;
f_drazka2=2*((Z2/p2)*(1-s1)-1)*fn;
f_drazka3=2*((Z2/p2)*(1-s2)+1)*fn;
f_drazka4=2*((Z2/p2)*(1-s2)-1)*fn;

subplot(3,1,1);
plot(alfa,F_stat,'r',alfa,F_klec,'b'), title('Magnetomotorické napětí')

subplot(3,1,2)
plot(alfa,vodivost_mezery,'r',alfa,str_vodivost_mezery,'b'), title('Vodivost vzduchova mezery');

subplot(3,1,3);
plot(alfa,p), title('p drazka');

figure;
subplot(1,1,1)
plot(alfa,F_stat), title('Magnetomotorické napětí statoru')
figure;
plot(alfa,F_klec,'b'), title('Magnetomotorické napětí rotoru')
figure;
plot(alfa,vodivost_mezery,'r',alfa,str_vodivost_mezery,'b'), title('Vodivost vzduchové mezery');
figure;
plot(alfa,p), title('Radiální tlak ve vzduchové mezeře');
```

## Kompaktní disk

Kompaktní disk přiložený k této práci obsahuje

- Soubor programu MATLAB
- Elektronickou verzi práce ve formátu .xdoc a .pdf