

# 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

## **ELIMINACE HLUKU ŠESTIPÓLOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU**

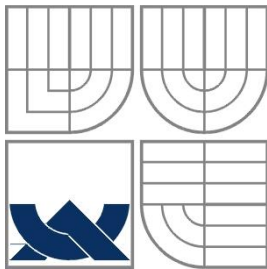
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

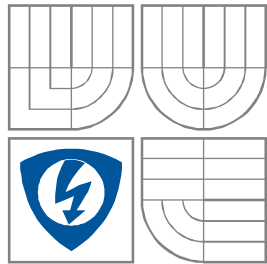
JAKUB LEXA

BRNO 2013



**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

# **ELIMINACE HLUKU ŠESTIPÓLOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU**

**NOISE SUPPRESSION OF SIX POLE INDUCTION MACHINE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

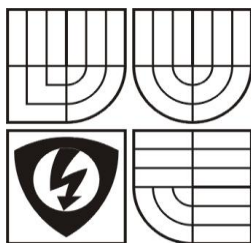
**JAKUB LEXA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. ČESTMÍR ONDŮŠEK, 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 výkonová elektronika

**Student:** Jakub Lexa

**Ročník:** 3

**ID:** 134541

**Akademický rok:** 2012/2013

**NÁZEV TÉMATU:**

## Eliminace hluku šestipólového asynchronního motoru

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Provedte literární rešerši dané problematiky
2. Analyzujte příčiny hluku magnetického původu.
3. Vypočtete frekvenci maximální složky hluku

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle doporučení vedoucího

**Termín zadání:** 17.9.2012

**Termín odevzdání:** 4.6.2013

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

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

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá hlukem elektromagnetického původu šestipólového trojfázového asynchronního motoru. Úkolem práce bylo provedení literární rešerše. Analýza problému obsahuje matematické výpočty v prostředí Matlab a následně je porovnává se skutečným motorem. Poslední částí práce je souhrn podmínek pro asynchronní motory s nízkou hlučností.

## **Abstract**

This thesis deals with noise of electromagnetic origin of six pole three-phases induction machine. Task thesis was rendering literature review. Analysis of the problem consists of various analytical calculations using Matlab and subsequent comparison of results with measured data on real induction machine. The last part of thesis is a summary of conditions for induction machine with low noise.

## **Klíčová slova**

Magnetomotorické napětí; magnetická vodivost; asynchronní stroj; hluk; radiální tlak; frekvence; eliminace; Matlab; drážkování; Carterův činitel; činitel vinutí; analýza.

## **Keywords**

Magnetomotiv voltage; magnetic conductivity; induction machine; noise; radial pressure; frequency; elimination; Matlab; gouging; Carters factor; winding factor; analysis.

## **Bibliografická citace**

LEXA, J. *Eliminace hluku šestipólového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Eliminace hluku šestipólového asynchronního 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.

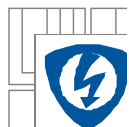
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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 a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

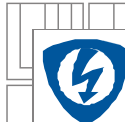
V Brně dne ..... Podpis autora .....



## Obsah

SEZNAM TABULEK .....	8
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ ÚVAHY O HLUKU ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	12
2 PŘÍČINY ELEKTROMAGNETICKÉHO HLUKU .....	14
2.1 MĚŘITKA ELEKTROMAGNETICKÝCH PŘÍČIN HLUKU .....	14
2.2 RADIÁLNÍ TLAK VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE .....	14
2.3 MAGNETOMOTORICKÁ NAPĚTÍ JEDNOTLIVÝCH VINUTÍ.....	20
2.4 MAGNETICKÁ VODIVOST VZDUCHOVÉ MEZERY.....	21
3 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....	25
3.1 MATLAB R2012A .....	25
3.2 PROGRAMOVÉ PROSTŘEDÍ .....	25
4 ANALÝZA ELEKTROMAGNETICKÉHO HLUKU .....	26
4.1 ANALYZOVANÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	26
4.2 DEFINOVÁNÍ PROMĚNNÝCH .....	26
4.3 VÝPOČTY MAGNETOMOTORICKÝCH NAPĚTÍ STATORU A ROTORU .....	27
4.4 VÝPOČET MAGNETICKÉ VODIVOSTI VZDUCHOVÉ MEZERY .....	32
4.5 VÝPOČET RADIÁLNÍHO TLAKU.....	35
4.6 VÝPOČET FREKVENCE MAXIMÁLNÍ SLOŽKY HLUKU .....	36
5 PODMÍNKY PRO BEZHLUČNÉ ASYNCHRONNÍ STROJE .....	38
6 ZÁVĚR.....	40
LITERATURA .....	41
PŘÍLOHY .....	42
PŘÍLOHA 1 - SKRIPT VÝPOČTOVÉHO PROGRAMU MATLAB .....	42
PŘÍLOHA 2 - NAMĚŘENÁ HODNOTA MAXIMÁLNÍ SLOŽKY ELEKTROMAGNETICKÉHO HLUKU TŘETIOKTÁVOVOU ANALÝZOU .....	46
PŘÍLOHA 3 - ÚDAJE A ROZMĚRY ANALYZOVANÉHO TROJFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....	47

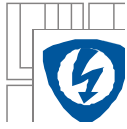




---

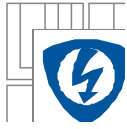
## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Štítkové hodnoty asynchronního motoru.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 2: Definované proměnné v programu MATLAB .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 3: Vypočtené hodnoty činitele statorového vinutí .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 4: Odečtená hodnota koeficientu proudu rotoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 5: Vypočtené hodnoty proudu v tyči rotoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 6: Vypočtené výsledky Carterova koeficientu .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 7: Hodnoty veličiny <math>\theta</math> .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 8: Vypočtená hodnota frekvence maximální složky hluku.....</i>	<i>37</i>



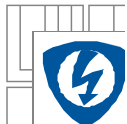
## SEZNAM OBRÁZKŮ

2-1 Působení sil v případě $r=0$ .....	18
2-2 Působení sil v případě $r=1$ .....	19
2-3 Působení sil a) v případě $r=2$ ; b) v případě $r=3$ ; c) v případě $r=4$ .....	20
3-1 Prostředí programu MATLAB .....	25
4-1 Průběh magnetomotorického napětí statorového vinutí po obvodu vzduchové mezery .....	29
4-2 Závislost činitele rotorového proudu na účinníku (převzato[7]).....	30
4-3 Průběh magnetomotorického napětí rotorového vinutí po obvodu vzduchové mezery .....	32
4-4 Průběh magnetické vodivosti vzduchové mezery po obvodu vzduchové mezery.....	34
4-5 Průběh radiálního tlaku ve vzduchové mezeře po obvodu vzduchové mezery.....	35
4-6 Průběh hladiny akustického tlaku ve vzduchové mezeře .....	36



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	amplituda vzniklé síly
B	magnetická indukce
D	průměr
F	magnetomotorické napětí
H	intenzita magnetického pole
I	efektivní hodnota proudu
N	počet závitů
Q	počet drážek
R	poloměr
S	plocha
a	koeficient Fourierova rozvoje
b	koeficient Fourierova rozvoje
c	celé kladné číslo
d	excentricita
f	frekvence
k	činitel
m	počet fází
o	otevření drážky
p	počet pólových dvojic, tlak
r	řád chvění
t	čas, šířka drážky
$\Lambda$	magnetická vodivost
$\Omega$	otáčivá rychlost
$\alpha$	obvodová souřadnice
$\gamma$	počet drážek pod pólovým nástavcem
$\delta$	tloušťka vzduchové mezery
$\varepsilon$	poměrná excentricita
$\zeta$	řád harmonické
$\mu$	permeabilita
$\nu$	řád harmonické
$\xi$	řád harmonické
$\rho$	řád harmonické rotoru



---

$\sigma$	řád harmonické statoru
$\varphi$	fázový úhel
$\omega$	otáčivá rychlost

# 1 ÚVOD

## 1.1 Základní úvahy o hluku elektrických strojů

Hluk elektrických strojů byl považován za jakousi vadu na kráse, než za provozní parametr. Postupné zdůrazňování ekologie provozu elektrických strojů dovedlo, že se tento provozní parametr stal jedním z rozhodujících parametrů stroje.

Elektrické stroje jsou dnes považovány za nejpoužívanější pohonné jednotky a jsou pevně spjaty s výrobou a rozvodem elektrické energie. Elektrické pohony nejsou používány pouze v průmyslovém odvětví, ale i dopravě, domácnostech apod. Vysoká adaptibilita a regulační schopnost elektrických strojů přispěla k jejich velkému obecnému rozšíření.

Protože elektrické stroje nejsou pouze zdrojem mechanické energie, ale i zdrojem tepla a hluku, je jejich provoz provázen nežádoucími parazitními jevy. Mezi něž patří i hluk. Hlučnost v životním prostředí s rozvojem techniky narůstá ve velké míře a je snaha tento jev co nejvíce eliminovat. Jak lépe hluk eliminovat, než přímo u jeho zdroje. Proto se tato práce zabývá eliminací hluku šestipólového asynchronního motoru.

Nejprve si řekneme pár slov o obecném pojmu zvuk. Zvukem rozumíme každou změnu tlaku prostředí, které jsou rozpoznány lidským uchem. Počet změn za jednotku času je kmitočet zvuku. Jednotkou kmitočtu je jeden Hertz (Hz), který udává jeden kmit za jednu sekundu. Změna tlaku musí probíhat dostatečně rychle, aby ho lidské ucho mohlo zaznamenat. Kmitočtový rozsah zdravého lidského ucha je od 20 Hz do 20 kHz. Řada zvuků se stává rušivým někdy až nebezpečným. Tyto zvuky se řadí do skupiny, která se nazývá hluk.

Soubor nežádoucích zvuků elektrických strojů vyvolaných rychlou změnou tlaku vzduchu je nazýván hluk elektrických strojů. Za příčiny těchto změn se označují tyto dvě:

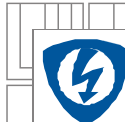
- a) kmitání stroje nebo jeho částí
- b) aerodynamické jevy (tzv. ventilační hluk)

Protože první příčina může být způsobena dvěma odlišnými jevy, uvedeme si tři základní složky hluku elektrických strojů, jimiž je tvořen celkový hluk elektrických strojů:

1. Hluk elektromagnetického původu
2. Hluk mechanického původu
3. Hluk ventilačního původu

*Hluk elektromagnetického původu* je nejtypičtější složkou hluku elektrického točivého stroje. Tento hluk způsobují elektromagnetické síly, které rozkmitají kostru stroje, popř. jeho jiných částí. Další příčinnou je změna mechanických rozměrů magnetického obvodu úměrná magnetickému toku tzv. magnetostricke magnetického obvodu. Vhodným návrhem elektrického stroje je možné dospět ke snížení složky elektromagnetického hluku. Např. optimálního poměru satorových a rotorových drážek, zesílením konstrukce v místech se zvýšeným namáháním způsobeným elektromagnetickými silami.

*Hluk mechanického původu* je složka hluku způsobená především valivými ložisky a nevyváženými rotujícími částmi stroje. Hluk od ložisek vychází z nerovností valivých částí i od drah na kroužcích ložisek. Mechanický hluk se velice dobře šíří konstrukcí stroje, proto je nutné a



zároveň i velice dobrou eliminací tohoto hluku oddělení stavební konstrukce od konstrukce stroje pružnými spoji. Další eliminací je pečlivé vyvážení rotujících částí stroje, zvláště pak u strojů s vysokými otáčkami.

*Hluk ventilačního původu* je rozhodující převážně u strojů s vysokými otáčkami. Zdroji ventilačního hluku jsou rotorová křídélka, radiální či axiální chladicí kanály, vstupní a výstupní kryty. Tyto zdroje jsou ovšem převyšovány samotným ventilátorem a jeho blízkým okolím. Jde o aerodynamický hluk vznikající turbulentním prouděním v okolí lopatek ventilátoru. Příným zdrojem hluku jsou tlakové pulsace na hranách lopatek ventilátoru. Pulsace jsou nerovnoměrné v prostorovém i časovém uspořádání, jimi vyzařované frekvenční spektrum je širokopásmové. Kdežto diskrétní spektrum ventilačního hluku vzniká, jsou-li před ventilátorem nebo za ním umístěny rozváděcí lopatky, žaluzie apod.

Tato práce je zpracována převážně na poznacích studie literatury [1].

## 2 PŘÍČINY ELEKTROMAGNETICKÉHO HLUKU

### 2.1 Měřítka elektromagnetických příčin hluku

Tato kapitola se zabývá první složkou hluku elektrických strojů. Touto složkou je hluk elektromagnetického původu, který způsobují elektromagnetické síly v čase proměnné mezi statorem a rotorem.

Jakýkoliv točivý elektrický stroj je sestavený ze dvou částí rotoru a statoru, které jsou vybaveny vinutím. Proud procházející vinutím vytváří magnetomotorické napětí, které pomocí Fourierovy řady můžeme časově i prostorově rozložit. Obdobně lze rozložit i vodivost vzduchové mezery mezi statorem a rotorem. Z časového a prostorového rozložení vyplývá průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

Radiální sílu lze v každém místě vzduchové mezery vyjádřit podle Maxwella, jako sílu působící na jednotku plochy, tedy jako tlak[1]:

$$p_r = \frac{B^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad (2.1)$$

kde je:  $p_r$  radiální tlak ve vzduchové mezeře  
 $B(\alpha, t)$  okamžitá hodnota magnetické indukce v místě úhlu  $\alpha$  od dané osy v čase  $t$   
 $\mu_0$  permeabilita vakua

Při zanedbání vlivu nasycení železa lze za magnetickou indukci (2.1) dosadit součin permeability vakua a intenzity magnetického pole[1]:

$$p_r = \frac{\mu_0}{2} H^2(\alpha, t) \quad (2.2)$$

kde je:  $H(\alpha, t)$  okamžitá hodnota intenzity magnetického pole v místě úhlu  $\alpha$  od dané osy v čase  $t$

Společně s časově a prostorově proměnlivou magnetickou indukci mezi statorem a rotorem vzniknou i síly působící mezi statorem a rotorem, taktéž časově a prostorově rozložené. Vzniklé síly dokážou rozechvát části stroje a tím způsobit hluk. U většiny strojů je zásadní chvění statoru, jakožto tenkostěnného válce. Síly uvnitř vzduchové mezery nerozkmítají rotor, protože rotor je z mechanického hlediska považován za mohutný válec.

### 2.2 Radiální tlak ve vzduchové mezeře

Radiální tlak lze označit jako působení vzniklých sil v důsledku magnetické indukce vyvolané magnetomotorickým napětím ve vzduchové mezeře na jednotku plochy. Magnetomotorická napětí statoru  $F_S$  a rotoru  $F_R$  můžeme vyjádřit rovnicemi[1]:

$$F_S(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_v \cos(v\alpha \mp \omega_v t) \quad (2.3)$$

$$F_R(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{\mu} \cos(\mu\alpha \mp \omega_{\mu} t + \varphi_{\mu}) \quad (2.4)$$

kde je:  $v, \mu$  řády satorové a rotorové harmonické  
 $\omega$  úhlový kmitočet  
 $\varphi$  fázový posun mezi fázory vyšších harmonických stejného řádu statoru a rotoru

Pro magnetickou vodivost vzduchové platí rovnice[1]:

$$\Lambda(\alpha, t) = \Lambda_0 + \sum_{\sigma=1}^{\infty} \Lambda_{\sigma} \cos(\sigma\alpha + \varphi_{\sigma}) + \sum_{\rho=1}^{\infty} \Lambda_{\rho} \cos[\rho(\alpha - \omega_R t) + \varphi_{\rho}] + \dots \quad (2.5)$$

kde je:  $\sigma, \rho$  řády harmonických na satorové a rotorové straně  
 $\omega_R$  úhlová rychlost rotoru  
 $\varphi_{\sigma}, \varphi_{\rho}$  fázové posuny vyšších harmonických proti ose  $\alpha=0$

Pomocí rovnic magnetomotorických napětí (2.3), (2.4) a rovnice popisující magnetickou vodivost ve vzduchové mezeře (2.5) lze vyjádřit okamžitou hodnotu magnetické indukce uvnitř této mezery[1]:

$$B(\alpha, t) = [F_S(\alpha, t) + F_R(\alpha, t)]\Lambda(\alpha, t) \quad (2.6)$$

Po dosazení rovnice pro magnetickou indukci (2.6) do rovnice pro radiální tlak (2.1) získá rovnice radiálního tlaku tvar[1]:

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} [F_S(\alpha, t) + F_R(\alpha, t)]^2 \Lambda^2(\alpha, t) \quad (2.7)$$

Jak je patrné z rovnic magnetomotorických napětí pro stator (2.3) a rotor (2.4), má každá z těchto rovnic dvě hodnoty (znaménka + a -). Proto je nutné rovnici pro radiální tlak ve vzduchové mezeře (2.7) řešit pro jednotlivé případy odděleně. Mohou nastat tedy tyto případy:

a) Rovnice s kladnými znaménky:

$$F_S(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_v \cos(v\alpha + \omega_v t)$$

$$F_R(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{\mu} \cos(\mu\alpha + \omega_{\mu} t + \varphi_{\mu}).$$

Pro správné dosazení do rovnice radiálního tlaku (2.6) je nutné vyjádřit umocněný součet dvou členů  $F_S$  a  $F_R$ . Po matematické úpravě obdrží rovnice tvar[1]:



$$\begin{aligned}
 [F_S(\alpha, t) + F_R(\alpha, t)]^2 &= \sum_{v'=0}^{\infty} \sum_{v''=0}^{\infty} \frac{F_{v'} F_{v''}}{2} \cos[(v' \pm v'')\alpha + (\omega_{v'} \pm \omega_{v''})t] + \\
 + \sum_{\mu'=0}^{\infty} \sum_{\mu''=0}^{\infty} \frac{F_{\mu'} F_{\mu''}}{2} \cos[(\mu' \pm \mu'')\alpha + (\omega_{\mu'} \pm \omega_{\mu''})t + (\varphi_{\mu'} \pm \varphi_{\mu''})] + \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} F_v F_{\mu} \cos[(v \pm \mu)\alpha + (\omega_v \pm \omega_{\mu})t \pm \varphi_{\mu}]
 \end{aligned} \quad (2.8)$$

b) Rovnice se zápornými znaménky:

$$F_S(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_v \cos(v\alpha - \omega_v t)$$

$$F_R(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{\mu} \cos(\mu\alpha - \omega_{\mu} t + \varphi_{\mu})$$

si lze opět vyjádřit jako umocněný součet dvou členů  $F_S$  a  $F_R$ . Po matematické úpravě obdrží rovnice tvar[1]:

$$\begin{aligned}
 [F_S(\alpha, t) + F_R(\alpha, t)]^2 &= \sum_{v'=0}^{\infty} \sum_{v''=0}^{\infty} \frac{F_{v'} F_{v''}}{2} \cos[(v' \pm v'')\alpha - (\omega_{v'} \pm \omega_{v''})t] + \\
 + \sum_{\mu'=0}^{\infty} \sum_{\mu''=0}^{\infty} \frac{F_{\mu'} F_{\mu''}}{2} \cos[(\mu' \pm \mu'')\alpha - (\omega_{\mu'} \pm \omega_{\mu''})t + (\varphi_{\mu'} \pm \varphi_{\mu''})] + \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} F_v F_{\mu} \cos[(v \pm \mu)\alpha - (\omega_v \pm \omega_{\mu})t \pm \varphi_{\mu}]
 \end{aligned} \quad (2.9)$$

c) Dalším možným případem jsou rovnice:

$$F_S(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_v \cos(v\alpha + \omega_v t)$$

$$F_R(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{\mu} \cos(\mu\alpha - \omega_{\mu} t + \varphi_{\mu})$$

matematickou úpravou obdrží rovnice tvar[1]:

$$\begin{aligned}
 [F_S(\alpha, t) + F_R(\alpha, t)]^2 &= \sum_{v'=0}^{\infty} \sum_{v''=0}^{\infty} \frac{F_{v'} F_{v''}}{2} \cos[(v' \pm v'')\alpha + (\omega_{v'} \pm \omega_{v''})t] + \\
 + \sum_{\mu'=0}^{\infty} \sum_{\mu''=0}^{\infty} \frac{F_{\mu'} F_{\mu''}}{2} \cos[(\mu' \pm \mu'')\alpha - (\omega_{\mu'} \pm \omega_{\mu''})t + (\varphi_{\mu'} \pm \varphi_{\mu''})] + \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} F_v F_{\mu} \cos[(v \pm \mu)\alpha + (\omega_v \pm \omega_{\mu})t \pm \varphi_{\mu}]
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

d) Dalším a posledním případem rovnic pro magnetomotorická napětí rotoru a statoru jsou:

$$F_S(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_v \cos(v\alpha - \omega_v t)$$

$$F_R(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} F_{\mu} \cos(\mu\alpha + \omega_{\mu} t + \varphi_{\mu})$$

matematickou úpravou obdrží rovnice tvar[1]:

$$\begin{aligned} [F_S(\alpha, t) + F_R(\alpha, t)]^2 &= \sum_{v'=0}^{\infty} \sum_{v''=0}^{\infty} \frac{F_{v'} F_{v''}}{2} \cos[(v' \pm v'')\alpha - (\omega_{v'} \pm \omega_{v''})t] + \\ &+ \sum_{\mu'=0}^{\infty} \sum_{\mu''=0}^{\infty} \frac{F_{\mu'} F_{\mu''}}{2} \cos[(\mu' \pm \mu'')\alpha + (\omega_{\mu'} \pm \omega_{\mu''})t + (\varphi_{\mu'} \pm \varphi_{\mu''})] + \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} F_v F_{\mu} \cos[(v \pm \mu)\alpha - (\omega_v \pm \omega_{\mu})t \pm \varphi_{\mu}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

Druhou mocninu vodivosti magnetické mezery pro první tři členy (2.5) lze vyjádřit ve tvaru[1]:

$$\begin{aligned} \Lambda^2(\alpha, t) &= \Lambda_0^2 + 2\Lambda_0 \sum_{\sigma=1}^{\infty} \Lambda_{\sigma} \cos(\sigma\alpha + \varphi_{\sigma}) + \\ &+ 2\Lambda_0 \sum_{\rho=1}^{\infty} \Lambda_{\rho} \cos[\rho(\alpha - \omega_R t) + \varphi_{\rho}] + \sum_{\sigma=1}^{\infty} \sum_{\sigma''=1}^{\infty} \frac{\Lambda_{\sigma'} \Lambda_{\sigma''}}{2} \cos[(\sigma' \pm \sigma'')\alpha + (\varphi_{\sigma'} \pm \varphi_{\sigma''})] + \\ &+ \sum_{\rho'=1}^{\infty} \sum_{\rho''=1}^{\infty} \frac{\Lambda_{\rho'} \Lambda_{\rho''}}{2} \cos[(\rho' \pm \rho'')(\alpha - \omega_R t) + (\varphi_{\rho'} \pm \varphi_{\rho''})] + \\ &+ \sum_{\sigma=1}^{\infty} \sum_{\rho=1}^{\infty} \Lambda_{\sigma} \Lambda_{\rho} \cos[(\sigma \pm \rho)\alpha \pm \rho\omega_R t + \varphi_{\sigma} \pm \varphi_{\rho}] \end{aligned} \quad (2.12)$$

Při respektování všech možností časového a prostorového rozložení magnetomotorických napětí statoru a rotoru uvedené v rovnicích (2.8),(2.9),(2.10),(2.11) a rozloženou rovnici pro magnetickou vodivost vzduchové mezery (2.12) lze dosadit do vztahu (2.7) pro výpočet časově a prostorově rozloženého radiálního tlaku  $p_r$  [1]:

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} \sum_{\zeta=0}^{\infty} F_{\zeta} \cos(\zeta\alpha - \omega_{\zeta} t + \varphi_{\zeta}) \left[ \Lambda_0^2 + \sum_{\xi=1}^{\infty} \Lambda_{\xi} \cos(\xi\alpha - \omega_{\xi} t + \varphi_{\xi}) \right] \quad (2.13)$$

- kde je:  $\zeta$  řád harmonické magnetomotorického napětí, který vznikne interferencí harmonických magnetomotorických napětí statoru a rotoru  $v$  a  $\mu$   
 $\xi$  řád harmonické magnetické vodivosti vzduchové mezery, který vznikne kombinací harmonických periodické křivky, která omezuje vzduchovou mezeru na straně statoru a rotoru

Ve vzduchové mezeře vznikají časově proměnné radiální síly s různým počtem prostorových vln. Vzniknou tak postupné silové vlny, které mají obecný tvar[1]:

$$p_r = A_r \cos(r\alpha - \Omega_r t) \quad (2.14)$$

- kde je:  $r$  libovolné číslo nabývající hodnot 0;1;2;3;...  
 $A_r$  amplituda vzniklé síly

$\Omega_r$  úhlový kmitočet síly řádu  $r$

Kmitočet časových změn radiálního tlaku ve vzduchové vyjadřuje vztah:

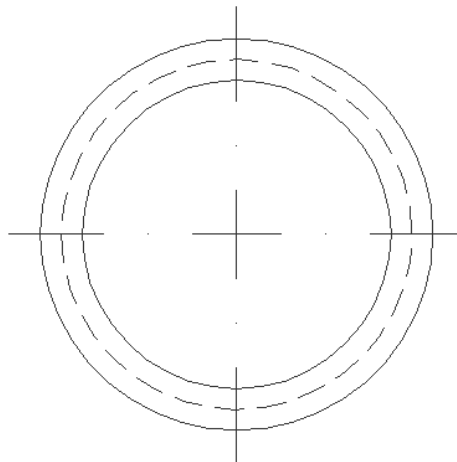
$$f_r = \frac{\Omega_r}{2\pi} \quad (2.15)$$

Zásadní vliv na rozkmitání statoru má počet prostorových vln působících sil uvnitř vzduchové mezery. Pokud je počet vln velký, síly působí na krátkém rameni a rozechvění nenastává nebo je malé. Horší případ nastane, pokud je počet prostorových vln malý. Nejhorší případ však nastane, pokud je kmitočet časových změn  $f_r$  blízký mechanickému kmitočtu statoru, v tomto případě dochází k největší deformaci statoru. Nyní budou probrány 4 případy deformačních vln, pro které platí  $r=0; 1; 2; 3; 4$ .

a) v případě kdy je  $r=0$  se v rovnici pro radiální tlak (2.14) vyskytuje složka:

$$p_0 = A_0 \cos \Omega t \quad (2.16)$$

kteřá vzniká interferencí dvou vln se stejnou vlnovou délkou o různé rychlosti. Vzniklá vlna má za následek ve všech směrech konfázní radiální kmitání statoru jak je vidět na obrázku 2-1.

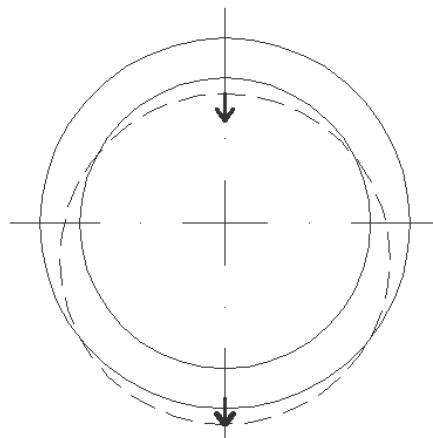


2-1 Působení sil v případě  $r=0$

b) v případě kdy je  $r=1$  se v rovnici pro radiální tlak (2.14) vyskytuje složka:

$$p_1 = A_1 \cos(\alpha - \Omega t), \quad (2.17)$$

kteřá vzniká interferencí dvou harmonických indukcí, u nichž je rozdíl jejich pólových dvojic roven jedné. Tato složka vytváří jednostranný tah s úhlovou rychlostí  $\Omega_r$  (Obr. 2-2) vyvolávající při rezonanci s vlastním mechanickým kmitočtem stroje silné chvění.

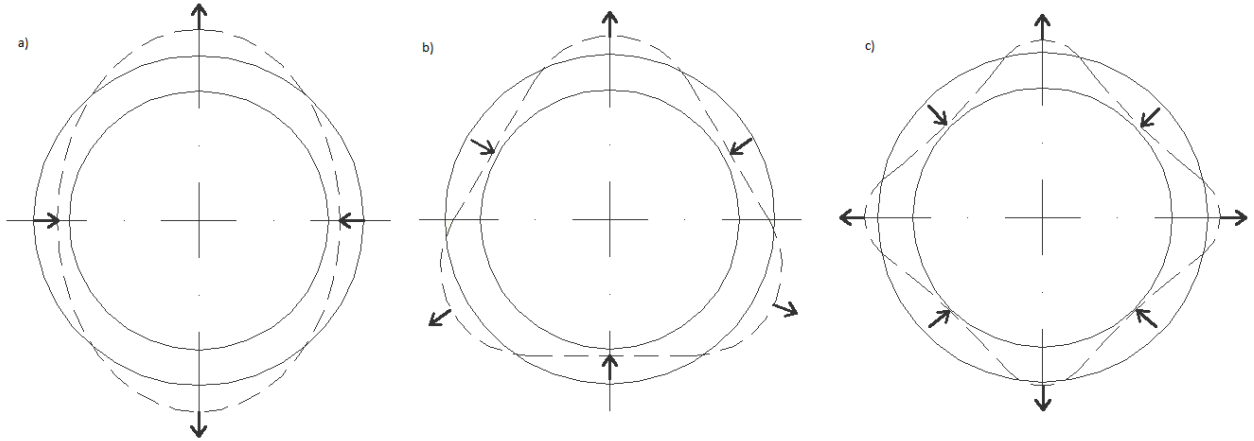


### 2-2 Působení sil v případě $r=1$

c) v případě kdy je  $r=2;3;4$  se v rovnici pro radiální tlak (2.14) vyskytují složky způsobující průhyby statorového prstence (Obr. 2-3) [1]:

$$p'_r = P_\zeta \cos(\zeta\alpha - \omega_\zeta + \varphi_\zeta) \quad (2.18)$$

$$p_1' = P_{\zeta\zeta} \cos[(\zeta-\xi)\alpha - (\omega_\zeta - \omega_\xi)t + (\varphi_\zeta - \varphi_\xi)] \quad (2.19)$$



2-3 Působení sil a) v případě  $r=2$ ; b) v případě  $r=3$ ; c) v případě  $r=4$

V uvedené kapitole byla popsána hlavní příčina elektromagnetického hluku asynchronních strojů, kterou způsobuje interference pracovní a vyšších harmonických kmitočtů magnetomotorických napětí společně s vodivostí vzduchové mezery mezi státorem a rotorem.

### 2.3 Magnetomotorická napětí jednotlivých vinutí

Každý elektrický točivý stroj je vybaven minimálně dvěma vinutími. Jedno je zpravidla umístěno na pevné části (stator), druhé na rotující (rotor) a mezi nimi je vzduchová mezera. Vinutí jsou u asynchronních strojů uložena v drážkách.

Jsou-li tato vinutí protékána proudem, vytváří magnetomotorické napětí  $F_m$ . Tato napětí vyvolaná různými typy vinutí mají rozdílné vlivy na vznikající radiální síly.

#### a) Vliv soustředného vinutí

Vzniklé magnetomotorické napětí vytvořené soustředným vinutím má stupňovitý průběh, který lze nahradit lichoběžníkovým tvarem. Průběh magnetomotorického napětí popisuje Fourierův rozvoj ve tvaru [1]:

$$F_m(\alpha) = \frac{4}{\pi} \frac{F_{\max}}{\alpha_p} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v^2} \sin(v\alpha_p) \cos(v\alpha) \quad (2.20)$$

kde je:  $F_{\max}$  maximální hodnota magnetomotorického napětí

$v$  řád harmonické (pouze liché násobky)

$\alpha$  úhel po obvodu stroje

#### b) Vliv klecového vinutí

Klecové vinutí s počtem drážek  $Q_2$  je schopné produkovat stupňové harmonické magnetomotorického napětí [1]:

$$F_m(\alpha, t) = \frac{Q_2}{2p} \frac{I_T \sqrt{2}}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin(\omega t \pm v\alpha) \quad (2.21)$$

kde je:  $Q_2$  počet drážek

$v$  řád harmonické

$\alpha$	úhel po obvodu stroje
$p$	počet pólových dvojic
$I_T$	efektivní hodnota proudu v jedné tyči vinutí

Pro klecové vinutí rotoru platí pro  $\nu$ -tou harmonickou vztah[1]:

$$\nu = cQ_2 \pm p \quad (2.22)$$

kde je: $Q_2$	počet drážek rotoru
$p$	počet pólových dvojic
$c$	celé kladné číslo; $c=0,1,2,3,\dots$

### c) Vliv třífázového vinutí

Časově a prostorově rozložené magnetomotorické napětí  $m$ -fázového vinutí vyjadřuje rovnice[1]:

$$F_m(\alpha, t) = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} N_f I \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu} k_{\nu\nu} \sin[\omega t \pm \nu\alpha] \quad (2.23)$$

kde je: $m$	počet fází
$\nu$	řád harmonické
$\alpha$	úhel po obvodu stroje
$N_f$	počet závitů v sérii na fázi
$I$	efektivní hodnota proudu ve vinutí
$k_{\nu\nu}$	činitel vinutí

Pro symetrické třífázové vinutí s celým počtem drážek a stejnou šířkou pásma platí pro  $\nu$ -tou harmonickou vztah[1]:

$$\nu = p(2mc \pm 1) \quad (2.24)$$

potom lze pro třífázové vinutí upravit rovnici (2.20) do tvaru:

$$F_m(\alpha, t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_f I \sum_{c=0}^{\infty} \frac{1}{p(6c \pm 1)} k_{\nu\nu} \sin[\omega t \pm (6c \pm 1)p\alpha] \quad (2.25)$$

kde je: $c$	celé kladné číslo; $c=0,1,2,3,\dots$
-------------	--------------------------------------

## 2.4 Magnetická vodivost vzduchové mezery

Jak již bylo uvedeno, je vedle magnetomotorického napětí druhým činitelem pro vznik radiálního tlaku magnetická vodivost vzduchové mezery (viz kapitola 2.2). Průběh magnetické vodivosti  $\Lambda(\alpha, t)$  je závislý na konstrukci stroje, jak je popsáno v následující kapitole.

**a) Vliv drážkování**

Je-li jedna strana vzduchové mezery tvořena hladkým pólem (např. stator) a druhá strana je drážkovaná (např. rotor) klesá hodnota magnetické indukce v ose drážky z maximální hodnoty  $B_{max}$  na minimální hodnotu  $B_{min}$ . Pokles indukce na hodnotu  $B_{min}$  je dán konstrukčními rozměry drážky. Závisí tedy na velikosti otevření drážky  $o$ , na tloušťce vzduchové mezery  $\delta$  a na drážkové rozteči  $t_d$ , která je vzdáleností os dvou sousedních zubů. Střední hodnotu magnetické indukce  $B_s$  lze vyjádřit rovnicí[1]:

$$B_s = \frac{1}{k_c} B_{max} \quad (2.26)$$

kde je:  $k_c$  Carterův koeficient

$$k_c = \frac{t_d}{t_d - \gamma \delta} \quad (2.27)$$

kde je:  $\gamma$  počet drážek pod pólovým nastavcem

Rovnice pro vodivost vzduchové mezery je ve tvaru[1]:

$$\Lambda(\alpha) = a_0 - \sum_{v=1}^{\infty} a_v \cos v Q_1 \alpha \quad (2.28)$$

kde je:  $Q_1$  počet drážek statoru

$$a_0 = \frac{1}{k_{c1} \delta} \quad (2.29)$$

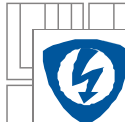
$$a_v = \frac{\beta}{\delta} \frac{1}{v \pi} \left[ 0,5 + \frac{\left( \frac{v o}{t_d} \right)^2}{0,78 - 2 \left( \frac{v o}{t_d} \right)^2} \right] \sin 1,6 \pi \frac{v o}{t_d} \quad (2.30)$$

Je-li stroj oboustranně drážkovaný (stator i rotor), musí se uvažovat s Carterovým koeficientem pro stator  $k_{c1}$  i rotor  $k_{c2}$ . Výsledný koeficient má tvar:

$$k_{c12} = k_{c1} k_{c2} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta_1} \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \delta_2} \quad (2.31)$$

Při oboustranně drážkovaném stroji se příspěvek rotorové magnetické vodivosti vzduchové mezery vypočte podle stejných rovnic jako příspěvek statorové magnetické vodivosti. A pro výslednou fiktivní vzduchovou mezeru v místě pod úhlem  $\alpha$  platí vztah[1]:

$$\delta(\alpha) = \frac{1}{\Lambda_1(\alpha)} + \frac{1}{\Lambda_2(\alpha)} - \delta \quad (2.32)$$



kde je: $\delta(\alpha)$	fiktivní vzduchová mezera
$\Lambda_1(\alpha)$	příspěvek statorové magnetické vodivosti
$\Lambda_2(\alpha)$	příspěvek rotorové magnetické vodivosti
$\delta$	tloušťka vzduchové mezery

Pro výpočet magnetické vodivosti potřebné pro výpočet radiálního tlaku podle rovnice (2.7) platí následující vztah(2.32), který vyjadřuje magnetickou vodivost vzduchové mezery pro celou vnitřní plochu jha statoru.

$$\Lambda_{1,2}(\alpha) = \frac{\mu_0 S}{\delta(\alpha)} \quad (2.33)$$

kde je: $\mu_0$	permeabilita vakua
S	vnitřní plocha jha statoru
$\delta(\alpha)$	fiktivní vzduchová mezera

#### b) Vliv sycení na změnu otevření drážek

Jeden z parametrů, na kterém, je závislá magnetická vodivost vzduchové mezery, je otevření drážky  $o$ . Asynchronní motory jsou nejčastěji provedeny s polouzavřenými drážkami. Vlivem velkých rozběhových proudů dochází k velkému drážkovému rozptylu a zbytkovými magnetickými poli dojde k nasycení špiček zubů polouzavřených drážek. Otevření drážky  $o$  se změní na fiktivní hodnotu  $o'$ . K největšímu otevření drážek dochází při maximální absolutní hodnotě proudového obsahu drážky.

Otevření drážek je periodickou funkcí podél pólové rozteče s periodou  $T_p = \pi/p$ . Průběh fiktivního otevření drážek má poloviční periodu oproti pracovní harmonické a lze podle Fourierova rozvoje napsat vztah pro fiktivní otevření drážky[1]:

$$o'(\alpha, t) = (o_0 + o_1) - o_1 \cos(p\alpha - \omega t) \quad (2.34)$$

kde je: $o_0$	střední hodnota otevření drážky
$o_1$	amplituda první harmonické

#### c) Vliv excentricity rotoru

Dalším parametrem magnetické vodivosti vzduchové mezery je soustřednost rotoru a statoru. Vzduchová mezera se uvažuje jako mezera mezi dvěma nesoustřednými válci, jejichž osy jsou rovnoběžné, ale posunuté o vzdálenost  $d$ . Při podmínce kdy bude excentricita  $d \ll r$  ( $r$  je poloměr rotoru), lze šířku vzduchové mezery vyjádřit vztahem[1]:

$$\delta(\alpha) = \delta_0(1 - \varepsilon \cos \alpha) \quad (2.35)$$

Kde  $\delta_0$  je střední šířka vzduchové mezery:



$$\delta_0 = R - r \quad (2.36)$$

a  $\varepsilon$  je poměrná excentricita:

$$\varepsilon = \frac{d}{\delta_0} \quad (2.37)$$

Magnetickou vodivost vzduchové mezery při excentricitě rotoru lze vyjádřit ve tvaru[1]:

$$\Lambda(\alpha) = \frac{\lambda_0}{\delta_0} (1 - \varepsilon \cos \alpha) \quad (2.38)$$

Je-li poměrná excentricita  $\varepsilon \ll 0,7$  lze nultý člen  $\lambda_0$  rovnice (2.34) vyjádřit ve tvaru[1]:

$$\lambda_0 = \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon^2}{2}} \quad (2.39)$$

Rovnici (2.38) lze použít, mluví-li o statické excentricitě. Je-li však potřeba řešit dynamickou excentricitu, tedy případ kdy rotor rotuje kolem své vyosené osy, musí se zavést obvodový úhel  $\alpha' = \alpha - \omega_\varepsilon t$ . Rovnice (2.38) pak dostane tvar:

$$\Lambda(\alpha) = \frac{\lambda_0}{\delta_0} (1 - \varepsilon \cos(\alpha - \omega_\varepsilon t)) \quad (2.40)$$

## 3 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

V bakalářské práci je pro veškeré výpočty využit program MATLAB R2012a.

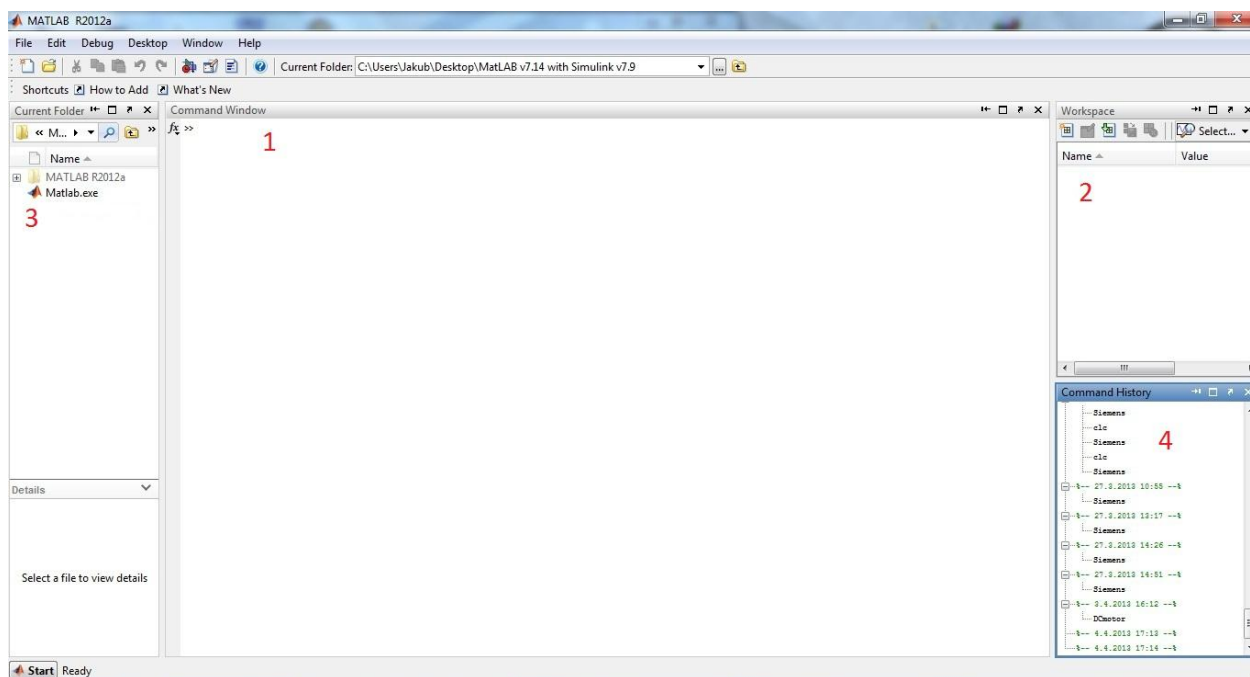
### 3.1 MATLAB R2012a

Program MATLAB R2012a je interaktivní programové prostředí, které umožňuje počítání s maticemi, vytváření 2D, 3D grafů apod. Jazyk MATLAB byl původně vytvořen jako matematický jazyk, který byl postupem času vyvinut na univerzální programovací jazyk. Program MATLAB vyvíjí společnost MathWorks.

### 3.2 Programové prostředí

Pracovní prostředí programu MATLAB má několik panelů:

1. **Command window** - v tomto panelu lze program využívat jako kalkulačku, příkaz je ihned po napsání a odeslání vyhodnocen
2. **Workspace** - tento panel zobrazuje a zároveň umožňuje práci s dostupnými proměnnými
3. **Current folder** - zobrazuje obsah aktuálního adresáře a zároveň ho umožňuje měnit
4. **Command history** - obsahuje všechny použité příkazy a umožňuje použít a upravit již použité příkazy



3-1 Prostředí programu MATLAB

## 4 ANALÝZA ELEKTROMAGNETICKÉHO HLUKU

Teoretická analýza elektromagnetické složky hluku asynchronního motoru je provedena metodou analytických výpočtů probraných v kapitole 2 pomocí programu MATLAB R2012a. Výpočty jsou provedeny pro stejnou hodnotu napájecího proudu a otáček rotoru jako při měření elektromagnetického hluku asynchronního motoru, tedy pro proud statorového vinutí  $I_1=3,52$  A a nulové otáčky rotoru  $n=0$  min<sup>-1</sup>.

### 4.1 Analyzovaný asynchronní motor

Předmětem analýzy elektromagnetického hluku je šestipólový trojfázový asynchronní motor s kotvou nakrátko řady 1LA7113-6AA.

Tabulka 1: Štítkové hodnoty asynchronního motoru

TYP	1LA7113-6AA
Napětí	400 V; Y; 50 Hz
Jmenovitý proud	5,2 A
Výkon	2,2 kW
Otáčky	940 min <sup>-1</sup>
Účinnost	0,78
Počet pólů	2p=6

### 4.2 Definování proměnných

Před výpočtem je nutné v programu MATLAB nadefinovat jednotlivé proměnné použité ve výpočtech a přiřadit jim číselné hodnoty. Číselné hodnoty jsou získány přímo od výrobce analyzovaného šestipólového trojfázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Nadefinované proměnné pro analytické výpočty udává následující tabulka.

Tabulka 2: Definované proměnné v programu MATLAB

NÁZEV VELIČINY	HODNOTA VELIČINY	POUŽITÉ OZNAČENÍ VE VÝPOČTU
Počet pólů	3	p
Počet drážek statoru	36	Q1
Počet drážek rotoru	33	Q2
Frekvence napájecího napětí	50 Hz	f1
Počet závitů fáze statoru	87 z	N1
Počet závitů fáze rotoru	0.5 z	N2
Počet fází statorového vinutí	3	m1

Počet fází rotorového vinutí	33	m2
Proud fází statoru	3.52 A	I1
Krok statorového vinutí	5	y
Počet drážek na pól a fázi statoru	2	q1
Pólová rozteč	6	tp
Vzdálenost os sousedních zubů statoru	$9.468 \cdot 10^{-3}$ mm	td1
Vzdálenost os sousedních zubů rotoru	$10.329 \cdot 10^{-3}$ mm	td2
Otevření drážky statoru	$3.05 \cdot 10^{-3}$ mm	o1
Otevření drážky rotoru	0 mm	o2
Činitel rotorového vinutí	1	kv2
Otáčky	$0 \text{ min}^{-1}$	n
Vzduchová mezera	$0.25 \cdot 10^{-3}$ mm	airgap
Vztažný akustický tlak	$2 \cdot 10^{-5}$ Pa	p0
Úhel po obvodu vzduchové mezery	$0:0.01:2 \cdot \pi$	alfa
Napájecí napětí	230 V	U1n
Činitel magnetické vodivosti statoru	0.41	beta1
Činitel magnetické vodivosti rotoru	0	beta2
Vnitřní průměr statoru	108.5 mm	D
Délka statorového svazku	90 mm	lfe
Činitel proudu rotoru	0.83	ki

### 4.3 Výpočty magnetomotorických napětí statoru a rotoru

Magnetomotorická napětí statorového a rotorového vinutí jsou vypočteny podle kapitoly 2.3.

#### Magnetomotorické napětí statorového vinutí

Statorové magnetomotorické napětí je vypočítáno podle rovnice 2.25. Pro kompletní dosazení do rovnice 2.25 je nutné nejprve vypočítat činitel statorového vinutí  $k_{vv}$ , který je ve výpočtu v programu MATLAB označený jako  $k_{v1}$ . Činitel vinutí je tvořen součinem činitele kroku vinutí  $k_y$  a činitelem rozlohy  $k_r$ .

$$k_{v1} = k_y k_r \quad (4.1)$$

Činitelé rozlohy a kroku se vypočítají podle následujících vztahů:

$$k_y = \sin\left(\frac{y\pi}{\tau_p 2}\right) \quad (4.2)$$

$$k_r = \frac{\sin \frac{qa}{2}}{q \sin \frac{a}{2}} \quad (4.3)$$

kde je:  $y$             krok statorového vinutí  
 $\tau_p$             pólová rozteč  
 $a$             úhel posunutí cívek zapojených v sérii  
 $q$             počet drážek na pól a fázi

V programu MATLAB jsou předešlé vztahy pro výpočet činitele statorového vinutí zapsány ve zdrojovém kódu pro výpočty v následující ukázce:

```
%výpočet činitele vinutí statoru  
a=2*p*pi/Q1  
kr=(sin(q1*a/2))/(q1*sin(a/2))  
ky=sin(pi/2)  
kv1=kr*ky
```

Při výpočtu činitele statorového vinutí bylo dosaženo výsledků uvedených v následující tabulce.

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty činitele statorového vinutí

VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
činitel rozlohy vinutí	$k_r$	0,9659
činitel kroku vinutí	$k_y$	0,9659
Činitel vinutí	$k_{v1}$	0,9330

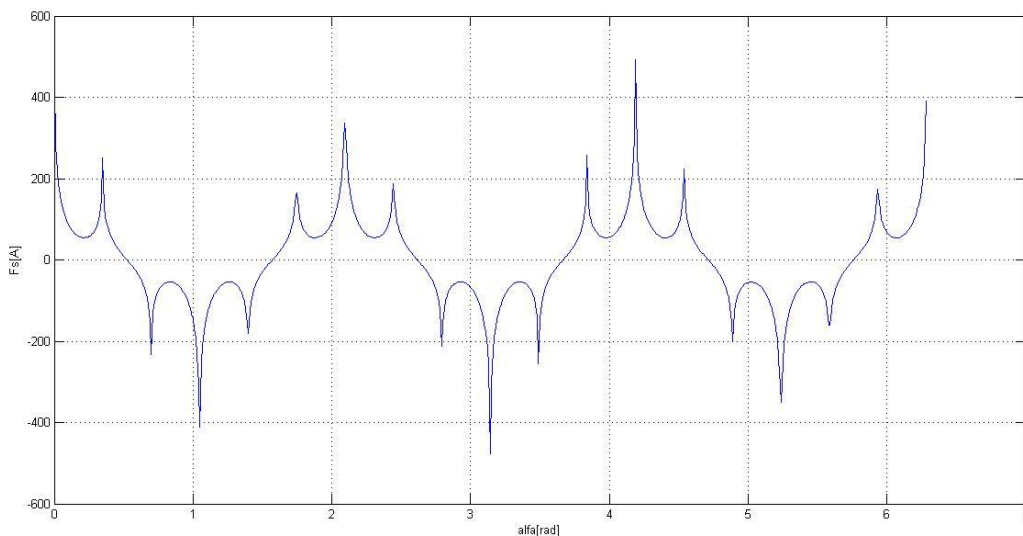
Nyní už je možné dosadit do rovnice 2.25 a vypočítat průběh magnetomotorického napětí statoru  $F_S$ . Magnetomotorické napětí statoru je pomocí programu MATLAB vypočítáno po obvodu vzduchové mezery v intervalu  $\langle 0; 2\pi \rangle$  po kroku 0,01 jako matice jednotlivých magnetomotorických napětí. Pro výpočet řádu harmonické platí vztah 2.24, kde  $c$  je celé kladné číslo v intervalu  $\langle 1; 50 \rangle$ .

V programu MATLAB je výpočet magnetomotorického napětí statoru zapsán ve zdrojovém kódu v následující ukázce:

```
%MMN statorového vinutí
S=0
for v=p;
    S=S+(1/v)*kv1*sin(w*cas+(v*alfa));
end
S1=0
for c=1:50
    v=p*(2*c*m1+1);
    S1=S1+(1/v)*kv1*sin(w*cas+(v*alfa));
end
S2=0
for c=1:50
    v=p*(2*c*m1+1);
    S2=S2+(1/v)*kv1*sin(w*cas-(v*alfa));
end
S3=0
for c=1:50
    v2=p*(2*c*m1-1);
    S3=S3+(1/v2)*kv1*sin(w*cas+(v2*alfa));
end
S4=0
for c=1:50
    v2=p*(2*c*m1-1);
    S4=S4+(1/v2)*kv1*sin(w*cas-(v2*alfa));
end

Fs=(3*sqrt(2)*N1*I1/pi)*(S+S1+S2+S3+S4);
```

Závislost magnetomotorického napětí statoru na úhlu po obvodu vzduchové mezery má následující průběh:



4-1 Průběh magnetomotorického napětí statorového vinutí po obvodu vzduchové mezery

### Magnetomotorické napětí rotorového vinutí

Rotorové magnetomotorické napětí je vypočítáno podle rovnice 2.21. Pro kompletní dosazení do rovnice 2.21 je nutné nejprve vypočítat proud v jedné tyči klece rotoru.

Proud v tyči rotoru je vypočítán jako součin statorového proudu jedné fáze, převodového poměru proudu a koeficientu proudu[7]:

$$I_t = p_i I_1 k_I \quad (4.4)$$

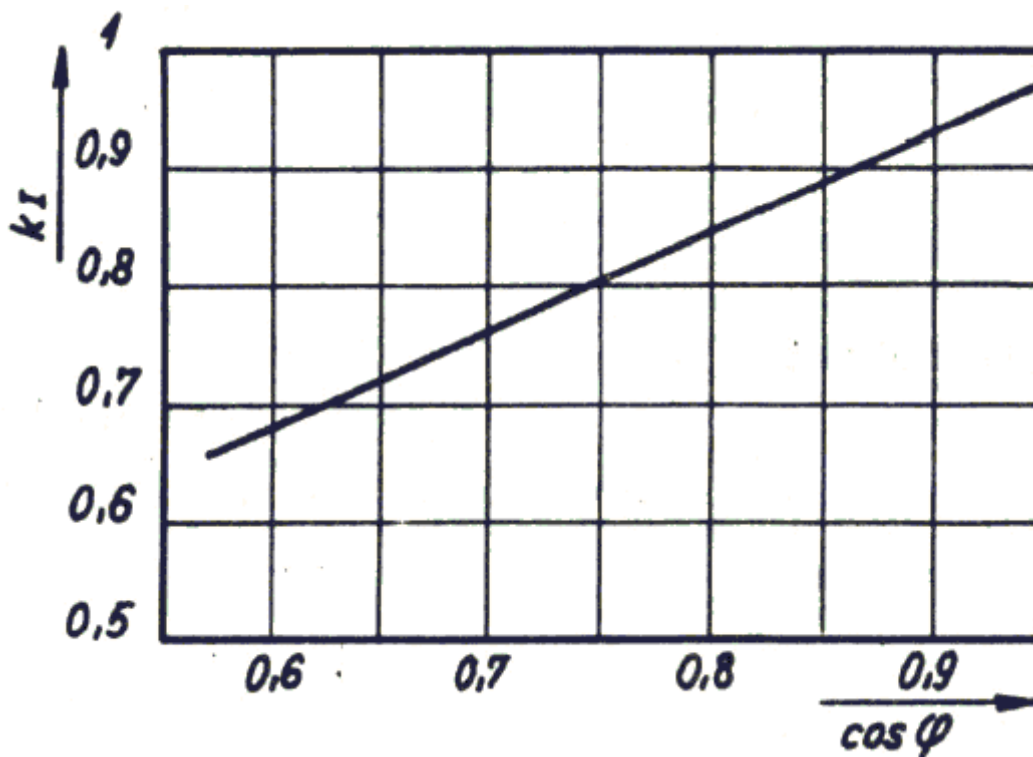
- kde je:  $I_t$  proud v tyči rotoru  
 $p_i$  převodový poměr proudu  
 $I_1$  statorový proud jedné fáze  
 $k_I$  koeficient proudu rotoru  $k_I = f(\cos \varphi)$

Pro převodový poměr proudu platí vztah[7]:

$$p_i = \frac{m_1 N_1 k_{v1}}{m_2 N_2 k_{v2}} = \frac{6 N_1 k_{v1}}{Q_2} \quad (4.5)$$

- kde je:  $N_1$  počet závitů jedné fáze statoru  
 $k_{v1}$  činitel statorového vinutí  
 $Q_2$  počet statorových drážek

Koeficient proudu rotoru je určen z následujícího grafu pro účinník analyzovaného trojfázového asynchronního motoru:



4-2 Závislost činitele rotorového proudu na účinníku (převzato[7])

Odečtenou hodnotu pro účinník motoru uvádí následující tabulka:

Tabulka 4: Odečtená hodnota koeficientu proudu rotoru

$\cos \varphi$	$k_I$
0,78	0,83

V programu MATLAB jsou předešlé vztahy pro výpočet proudu v tyči rotoru zapsány ve zdrojovém kódu v následující ukázce:

```
%výpočet proudu v tyči klece rotoru  
pi2=6*N1*kv1/Q2;  
I2=ki*pi2*I1
```

Při výpočtu proudu v tyči rotoru bylo dosaženo výsledků uvedených v následující tabulce.

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty proudu v tyči rotoru

VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
Převodový poměr proudu	$p_i$	14,7586
Proud v tyči rotoru	$I_2$	43,1187 A

Nyní už je možné dosadit do rovnice 2.21 a vypočítat průběh magnetomotorického napětí rotoru  $F_R$ . Magnetomotorické napětí rotoru je pomocí programu MATLAB vypočítáno po obvodu vzduchové mezery v intervalu  $\langle 0; 2\pi \rangle$  po kroku 0,01 jako matice jednotlivých magnetomotorických napětí. Pro výpočet řádu harmonické platí vztah 2.22, kde  $c$  je celé kladné číslo v intervalu  $\langle 1; 50 \rangle$ .

V programu MATLAB je výpočet magnetomotorického napětí rotoru zapsán ve zdrojovém kódu v následující ukázce:

```
%MMN rotorového vinutí  
wr=2*pi*f1*(1-s);  
r=0  
for vr=p;  
    r=r+(1/vr)*sin(wr*cas+vr*alfa);  
end  
r1=0  
for cr=1:50  
    vr=cr*Q2+p;  
    r1=r1+(1/vr)*sin(wr*cas+vr*alfa);  
end  
r2=0  
for cr=1:50  
    vr=cr*Q2+p;  
    r2=r2+(1/vr)*sin(wr*cas-vr*alfa);  
end  
r3=0  
for cr=1:50
```



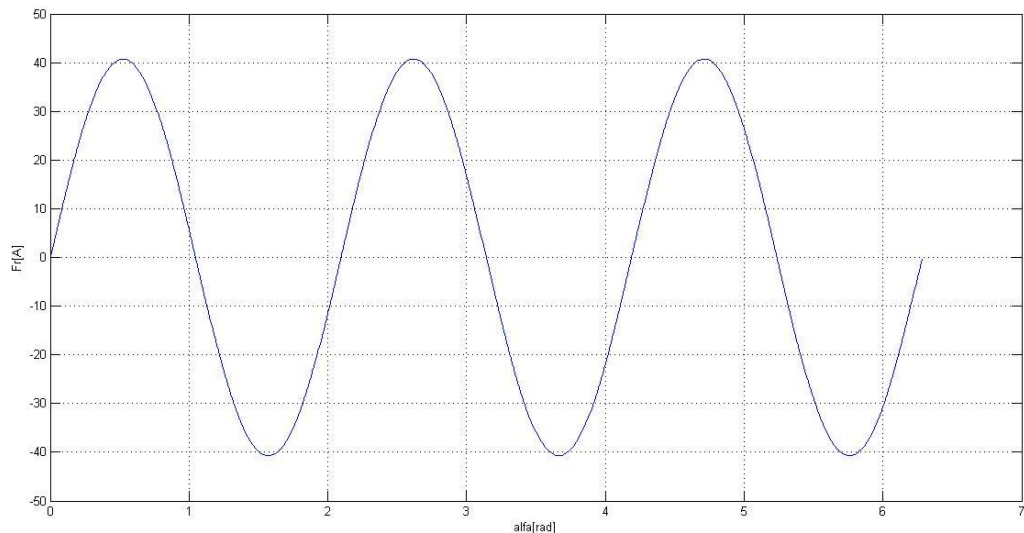
```

v2r=cr*Q2-p;
r3=r3+(1/v2r)*sin(wr*cas+v2r*alfa);
end
r4=0
for cr=1:50
v2r=cr*Q2-p;
r4=r4+(1/v2r)*sin(wr*cas-v2r*alfa);
end

Fr=(Q2*I2*sqrt(2)/(2*p*pi))*(r+r1+r2+r3+r4);

```

Závislost magnetomotorického napětí rotorového vinutí na úhlu po obvodu vzduchové mezery má následující průběh:



4-3 Průběh magnetomotorického napětí rotorového vinutí po obvodu vzduchové mezery

#### 4.4 Výpočet magnetické vodivosti vzduchové mezery

Výpočet magnetické vodivosti vzduchové mezery mezi paketem statorových a rotorových plechů je řešen podle kapitoly 2.4. Při řešení magnetické vodivosti je zanedbán vliv statické i dynamické excentricity rotoru a také vliv sycení na otevření drážek.

Protože je analyzovaný asynchronní motor oboustranně drážkovaný, tj. rotorové i statorové vinutí je uloženo v drážkách, je magnetická vodivost vzduchové mezery řešena podle rovnice 2.32. Nejprve je nutné vypočítat Carterův koeficient pro stator a rotor podle rovnice 2.30. Pro výpočet Carterových činitelů podle rovnice 2.30 je nutné vyjádřit proměnou  $\gamma$ , která je funkcí poměru otevření drážky a šířky vzduchové mezery a platí jak pro stator tak i pro rotor[1]:

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{o}{2\delta} \arctg \frac{o}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{o}{2\delta} \right)^2} \right]. \quad (4.7)$$

kde je: o            otevření drážky  
 $\delta$                 šířka vzduchové mezery

V programu MATLAB jsou předešlé vztahy pro výpočet Carterova koeficientu pro analyzovaný asynchronní motor zapsány ve zdrojovém kódu pro výpočty v následující ukázce:

```
%carterův koeficient - stator
gama1=(4/pi)*(o1/(2*airgap))*atan(o1/(2*airgap))-
log(sqrt(1+(o1/(2*airgap))^2));
kc1=td1/(td1-gama1*airgap);

%carterův koeficient - rotor
gama2=(4/pi)*(o2/(2*airgap))*atan(o2/(2*airgap))-
log(sqrt(1+(o2/(2*airgap))^2));
kc2=td2/(td2-gama2*airgap);
%carteruv koeficient
kc12=kc1*kc2;
```

Při výpočtu Carterových činitelů bylo dosaženo výsledků uvedených v následující tabulce.

Tabulka 6: Vypočtené výsledky Carterova koeficientu

VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
Součinitel Carterova koeficientu statoru	$\gamma_1$	8,6187
Carterův koeficient statoru	$k_{c1}$	1,2946
Součinitel Carterova koeficientu rotoru	$\gamma_2$	0
Carterův koeficient rotoru	$k_{c2}$	1
Carterův koeficient pro vzduchovou mezeru	$k_{c12}$	1,2946

Po výpočtu Carterových činitelů je možné již vyřešit magnetickou vodivost vzduchové mezery podle rovnice 2.33. Pro analyzovaný asynchronní motor je nutné odečíst hodnoty veličiny  $\beta$  z grafu závislosti  $\beta=f(o/\delta)$  Obrázek 14[1]. Odečtené hodnoty uvádí následující tabulka.

Tabulka 7: Hodnoty veličiny  $\beta$

	$o/\delta$	$\beta$
Stator	12,2	0,41
Rotor	0	0

V programu MATLAB jsou vztahy pro výpočet magnetické vodivosti analyzovaného asynchronního motoru zapsány ve zdrojovém kódu pro výpočty v následující ukázce:

```
%mag. vodivost statrou
a01=1/(kc1*airgap);

SUMA1=0
for vv=1:100

SUMA1=SUMA1+((beta1*4/(airgap*vv*pi))*(0.5+((vv*o1/td1)^2/(0.78-
2*(vv*o1/td1)^2)))*sin(1.6*pi*vv*o1/td1))*cos(vv*Q1*alfar);
end

A1=a01-SUMA1;

%mag. vodivost rotoru
b01=1/(kc2*airgap);

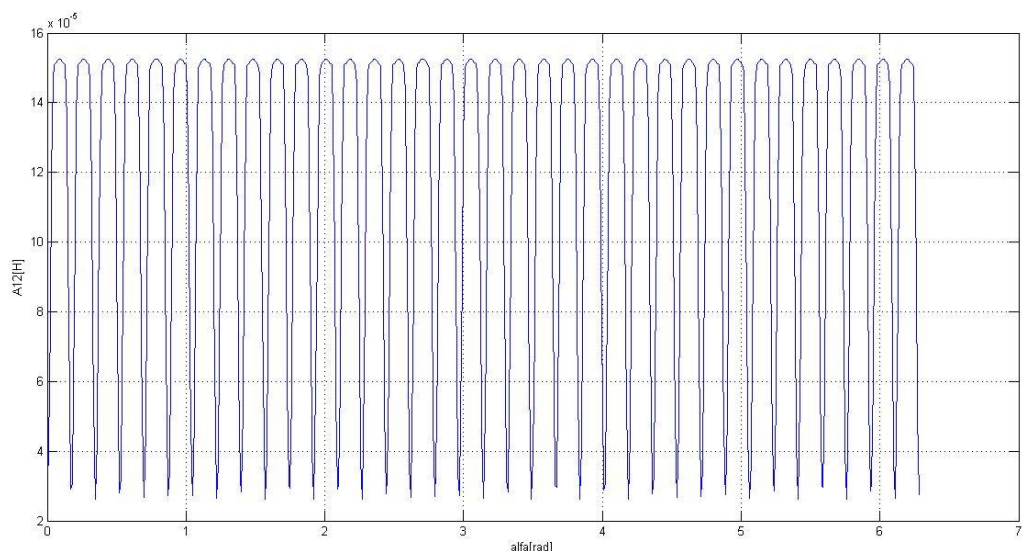
SUMA2=0
for vv=1:100

SUMA2=SUMA2+((beta2*4/(airgap*vv*pi))*(0.5+((vv*o2/td2)^2/(0.78-
2*(vv*o2/td2)^2)))*sin(1.6*pi*vv*o2/td2))*cos(vv*Q2*alfar);
end

A2=b01-SUMA2;

Ss=pi*D*lfe;
delta=(1./A1)+(1./A2)-airgap;
A12=Ss*4e-7*pi./(delta);
```

Závislost magnetické vodivosti vzduchové mezery na úhlu po obvodu vzduchové mezery má následující průběh:



4-4 Průběh magnetické vodivosti vzduchové mezery po obvodu vzduchové mezery

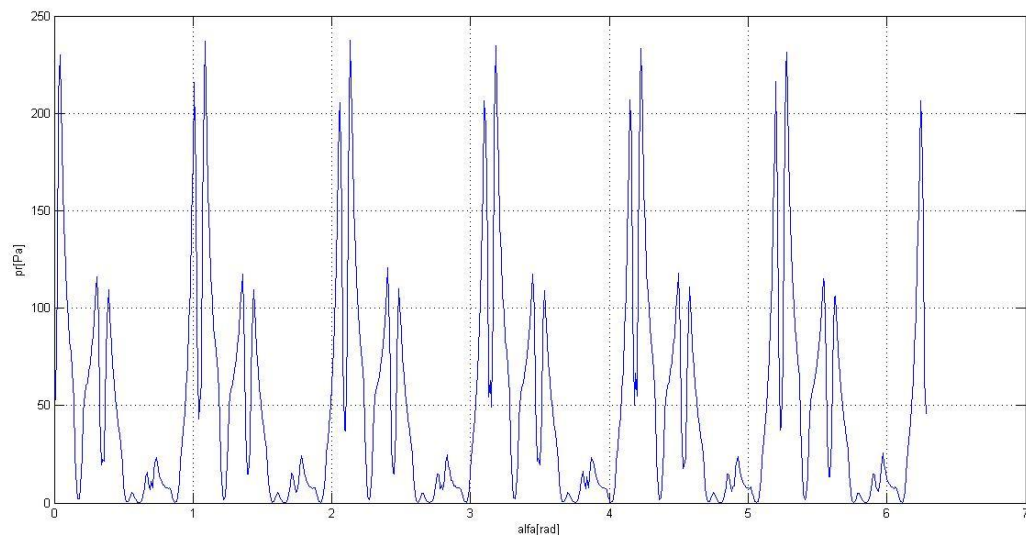
## 4.5 Výpočet radiálního tlaku

Radiální tlak ve vzduchové mezeře analyzovaného asynchronního motoru je řešen podle kapitoly 2.2 a rovnice 2.7.

V programu MATLAB je vztah pro výpočet radiálního tlaku ve vzduchové mezeře analyzovaného asynchronního motoru zapsán ve zdrojovém kódu pro výpočet v následující podobě:

```
%výpočet radiálního tlaku pr  
pr=(( (Fs+Fr) .^2) .* (A12) .^2) / (2*4*pi*1e-7);
```

Závislost radiálního tlaku ve vzduchové mezeře na úhlu po obvodu vzduchové mezery má následující průběh:



### 4-5 Průběh radiálního tlaku ve vzduchové mezeře po obvodu vzduchové mezery

Aby bylo, možné teoretické hodnoty radiálního tlaku ve vzduchové mezeře porovnat s naměřenými hodnotami, musí se radiální tlak přepočítat na hladinu akustického tlaku  $L_{pr}$  podle vzorce:

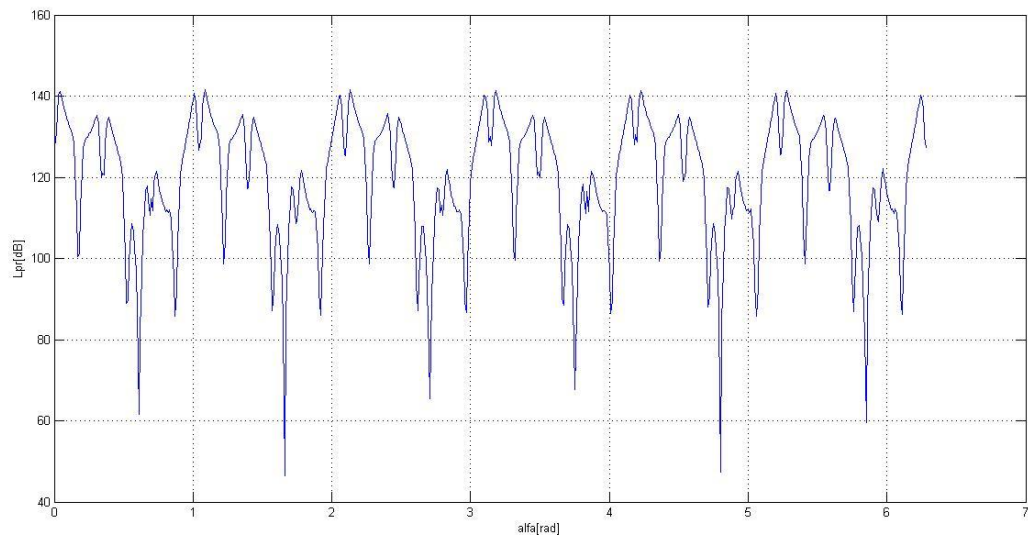
$$L_{pr} = 20 \log_{10} \left( \frac{p_r}{p_o} \right). \quad (4.8)$$

kde je:  $p_0=2 \cdot 10^{-5}$  Pa      vztažný akustický tlak (práh slyšitelnosti)

V programu MATLAB je vztah pro výpočet hladiny akustického tlaku ve vzduchové mezeře analyzovaného asynchronního motoru zapsán ve zdrojovém kódu pro výpočet v následující podobě:

```
%výpočet akustické hladiny radiálního tlaku  
Lpr=20*log10 (pr/p0);
```

Závislost akustické hladiny radiálního tlaku ve vzduchové mezeře na úhlu po obvodu vzduchové mezery má následující průběh:



4-6 Průběh hladiny akustického tlaku ve vzduchové mezeře

## 4.6 Výpočet frekvence maximální složky hluku

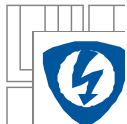
V této kapitole je popsán výpočet kmitočtu budící síly způsobující maximální složku elektromagnetického hluku, který bude asynchronní stroj vykazovat za provozu. Vypočtený kmitočet odpovídá jmenovitým otáčkám motoru a skluzu  $s \approx 0$ . Kmitočet vzniklé pulsující síly po obvodu vzduchové mezery je funkcí skluzu a závislý na počtu drážek stroje a počtu pólů. Pro výpočet frekvence maximální složky hluku platí následující rovnice[1]:

$$f_c = f \left( \frac{Q_1}{2p} \pm \frac{Q_2}{2p} \right) (1-s). \quad (4.9)$$

kde je: $f_c$	frekvence maximální složky hluku
$f$	kmitočet napětí statoru
$Q_1$	počet drážek statoru
$Q_2$	počet drážek rotoru
$s$	skluz
$2p$	počet pólových dvojíc

V programu MATLAB je vztah pro výpočet frekvence maximální složky elektromagnetického hluku analyzovaného asynchronního motoru zapsán ve zdrojovém kódu pro výpočet v následující podobě:

```
%výpočet frekvence mag.hluku(max.složky)
nn=940; %jmenovité otáčky
sn=(ns-nn)/ns %skluz při jmenovitých otáčkách
fc=f1*(Q1/(2*p)+Q2/(2*p))*(1-sn)
```



Při výpočtu frekvence maximální složky hluku bylo dosaženo výsledků uvedených v následující tabulce.

*Tabulka 8: Vypočtená hodnota frekvence maximální složky hluku*

VELIČINA	OZNAČENÍ	HODNOTA
Jmenovitý skluz	$s_n$	0,06
Frekvence max. složky hluku	$f_c$	540,5000 Hz

## 5 PODMÍNKY PRO BEZHLUČNÉ ASYNCHRONNÍ STROJE

Pro správný návrh bezhlučného  $p$ -pólového asynchronního stroje s počtem statorových drážek  $Q_1$  a rotorových drážek  $Q_2$  je nutné dodržet následující podmínky.

### Vliv stupňových harmonických

Aby, nemohly vzniknout radiální síly schopné rozechvát stator asynchronního stroje vlivem stupňových harmonických magnetomotorických napětí, nemá se volit následující počty drážek.

U bezhlučných asynchronních strojů nemá být počet statorových a rotorových drážek[1]:

$$|Q_1 - Q_2| = 0, 1, 2, \dots \quad (5.1)$$

a zároveň[1]:

$$|Q_1 - Q_2| = 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, \dots \quad (5.2)$$

kde je:  $Q_1$       počet statorových drážek  
          $Q_2$       počet rotorových drážek  
          $p$         počet pólových dvojic

### Vliv drážkování statoru a rotoru

Nemá-li vznikat hluk, nesmí se řád složek magnetomotorického napětí statoru a rotoru shodovat s řádem vyvinuté harmonické složky magnetické vodivosti vzduchové mezery. Hluk tedy vzniká pokud platí:

$$Q_1 \pm p = Q_2 \quad (5.3)$$

$$Q_2 \pm p = Q_1. \quad (5.4)$$

U bezhlučných asynchronních strojů nemá být počet statorových a rotorových drážek[1]:

$$|Q_1 - Q_2| = p. \quad (5.5)$$

Aby, se zabránilo vzniku nejnebezpečnější síly nízkého řádu, nesmí se u bezhlučných asynchronních strojů volit počet drážek[1]:

$$|Q_1 - Q_2| = p \pm 1. \quad (5.6)$$

Pro zabránění vzniku radiálních sil s malým počtem prostorových vln způsobujících hluk, nesmí se volit následující počet drážek[1]:

$$|Q_1 - Q_2| = p, p \pm 1, p \pm 2, \dots \quad (5.7)$$

### Vliv deformace vzduchové mezery

Vlivem působení radiálních sil na stator, dochází k periodické deformaci jha statoru. Deformace jha statoru je patrná z obrázku v kapitole 2. Obr.2-1, Obr.2-2 a Obr.2-3. Vzhledem k malé vzduchové mezeře u asynchronních motorů, může tato deformace nabývat nezanedbatelných hodnot.

Aby, nedocházelo k významné interferenci stupňových harmonických magnetomotorických napětí a magnetické vodivosti vzduchové mezery ovlivněné deformací vzduchové mezery, nesmí se volit následující počty drážek[1]:

$$|Q_1 - Q_2| = 3p, 3p \pm 1, 3p \pm 2, \dots \quad (5.8)$$

$$|Q_1 - Q_2| = 4p. \quad (5.9)$$

### Vliv sycení železa

Vlivem přesycování některých částí magnetického obvodu asynchronního stroje při zahrnutí vlivu drážkování vznikají harmonické složky magnetické indukce. Interferencí tohoto pole se stupňovými harmonickými magnetomotorických napětí vzniknou významné složky radiálního tlaku. Pro potlačení těchto složek a správnému navržení bezhlučného asynchronního stroje se nemá volit následující rozdíl drážek[1]:

$$|Q_1 - Q_2| = 2p \quad (5.10)$$

$$|Q_1 - Q_2| = 4p. \quad (5.11)$$



## 6 ZÁVĚR

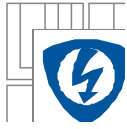
V této práci je přiblížena problematika hluku elektromagnetického původu asynchronních motorů, který je neoddělitelně spjat s provozem asynchronních motorů.

Práce je rozdělena na tři samostatné části. V první části je teoreticky popsána problematika vzniku elektromagnetického hluku asynchronních motorů. Druhá část je tvořena teoretickými výpočty elektromagnetického hluku pro konkrétní motor. V poslední třetí části, je souhrn doporučených podmínek nutných pro návrh asynchronních motorů s minimální hlučností.

Druhá část bakalářské práce, především výsledky analytických výpočtů elektromagnetického hluku slouží pro ověření platnosti teoretických výpočtů v porovnání s naměřenými hodnotami hladiny akustického tlaku téhož asynchronního motoru. Při porovnání výsledného průběhu hladiny akustického tlaku ve vzduchové mezeře (*4-6 Průběh hladiny akustického tlaku ve vzduchové mezeře*) s naměřenou hodnotou maximální složky hladiny akustického tlaku ve vzdálenosti 1 m od povrchu motoru (*Tabulka 9: Hladina akustického tlaku maximální složky elektromagnetického hluku*), naměřené dle normy ISO 3745 a odpovídající normě EN 60034-9, je patrný rozdíl téměř 80 dB. Předchozí porovnání nelze vzít v potaz, protože hladina akustického tlaku vzniklého ve vzduchové mezeře je částečně utlumena jhem statoru a kostrou statoru, výpočtem útlumu statoru se však bakalářská práce nezabývá. Dále pak akustický tlak vyzařovaný státorem klesá se čtvercem vzdálenosti od místa zdroje. Z této úvahy tedy plyne, že teoretická hodnota hladiny akustického tlaku při uvažování útlumu statoru by byla ve vzdálenosti 1 m od povrchu motoru menší než hodnota uvnitř vzduchové mezery.

## LITERATURA

- [1] HAMATA, Václav. *Hluk elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1987, 171 s.
- [2] 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.
- [3] HAŠA, Jaroslav. *Chvění a hluk asynchronních strojů*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1968, 87 s.
- [4] FRANCOIS, P. *Velké vysokonapěťové asynchronní motory*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1969, 17 s.
- [5] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 311 s. ISBN 80-01-01020-1.
- [6] MADEJEWSKI, Bohumír a Zdeňka KRÁTKÁ. *Vyhodnocení měření hluku elektrického stroje točivého*. Brno: Výzkumný ústav elektrických strojů točivých, 1968, 8 s., příl.
- [7] KATEDRA ELEKTRICKÝCH POHONŮ A TRAKCE, FEI ČVUT Praha. *Návrh vinutí rotoru* [online]. Praha [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)
- [8] LEXA, J. *Eliminace hluku u osmipólových asynchronních motorů..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 22 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..



## PŘÍLOHY

### Příloha 1 - Skript výpočtového programu MATLAB

```
close all
clc
% Hodnoty pro výpočet:

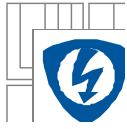
p=3;           %počet polů
Q1=36;        %drážky statoru
Q2=33;        %drážky rotoru
f1=50.02;     %frekvence nap. napětí
N1=87;        %počet závitů fáze statoru
N2=0.5;       %počet závitů rotoru
m1=3;        %počet fází statoru
m2=Q2;        %počet fází rotoru m2=Q2
I1=3.52;      %proud fází statoru (zapojení Y)
y=5;         %krok vinutí
q1=2 ;       %počet drážek na pol a fázi
tp=6 ;       %polová rozteč
td1=9.468e-3; %vzdálenost os sousedních zubů statoru 9.456e-3
td2=10.329e-3; %vzdálenost os sousedních zubů rotoru 10.258e-3
airgap=0.25e-3; %vzduchová mezera
o1=3.05e-3;  %otevření drážky statoru
o2=0;        %otevření drážky rotoru
beta1=0.41;  %součinitel carterova koeficientu
beta2=0;     %součinitel carterova koeficientu
U1n=230;     %napájecí fázové napětí
kv2=1;      %činitel vinutí rotoru
n=0;        %otáčky
alfa=0:0.01:2*pi;
alfar=0:0.01:2*pi;
cas=0.005;
p0=2e-5;    %vztažný akustický tlak
D=108.5e-3; %vnitřní průměr statoru
lfe=90e-3;  %délka statorového svazku
ki=0.95;   %koeficient proudu rotoru -závislé na účinníku(viz. BP obrázek
4-2)

%výpočet skluzu
ns=f1*60/p
s=(ns-n)/ns

w=2*pi*f1
%výpočet činitele vinutí statoru
a=2*p*pi/Q1
kr=(sin(q1*a/2))/(q1*sin(a/2))
ky=sin(pi*y/(2*tp))
kv1=kr*ky

%výpočet proudu v tyči klece rotoru
pi2=6*N1*kv1/Q2
I2=ki*pi2*I1

%MMN statorového vinutí
S=0
for v=p;
```



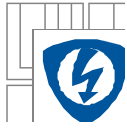
```
S=S+(1/v)*kv1*sin(w*cas+(v*alfa));
end
S1=0
for c=1:50
    v=p*(2*c*m1+1);
    S1=S1+(1/v)*kv1*sin(w*cas+(v*alfa));
end
S2=0
for c=1:50
    v=p*(2*c*m1+1);
    S2=S2+(1/v)*kv1*sin(w*cas-(v*alfa));
end
S3=0
for c=1:50
    v2=p*(2*c*m1-1);
    S3=S3+(1/v2)*kv1*sin(w*cas+(v2*alfa));
end
S4=0
for c=1:50
    v2=p*(2*c*m1-1);
    S4=S4+(1/v2)*kv1*sin(w*cas-(v2*alfa));
end

Fs=(3*sqrt(2)*N1*I1/pi)*(S+S1+S2+S3+S4)

%MMN rotorového vinutí
wr=2*pi*f1*(1-s);
r=0
for vr=p;
    r=r+(1/vr)*sin(wr*cas+vr*alfa);
end
r1=0
for cr=1:50
    vr=cr*Q2+p;
    r1=r1+(1/vr)*sin(wr*cas+vr*alfa);
end
r2=0
for cr=1:50
    vr=cr*Q2+p;
    r2=r2+(1/vr)*sin(wr*cas-vr*alfa);
end
r3=0
for cr=1:50
    v2r=cr*Q2-p;
    r3=r3+(1/v2r)*sin(wr*cas+v2r*alfa);
end
r4=0
for cr=1:50
    v2r=cr*Q2-p;
    r4=r4+(1/v2r)*sin(wr*cas-v2r*alfa);
end

Fr=(Q2*I2*sqrt(2)/(2*p*pi))*(r+r1+r2+r3+r4);

%magnetická vodivost vzduchové mezery-
%carterův koeficient - stator
gamal=(4/pi)*((o1/(2*airgap))*atan(o1/(2*airgap)))-
log(sqrt(1+(o1/(2*airgap))^2))
kc1=td1/(td1-gamal*airgap)
```



```
%carterův koeficient - rotor
gama2=(4/pi)*((o2/(2*airgap))*atan(o2/(2*airgap)))-
log(sqrt(1+(o2/(2*airgap))^2))
kc2=td2/(td2-gama2*airgap)
%carteruv koeficient
kc12=kc1*kc2

%mag. vodivost statrou
a01=1/(kc1*airgap);

SUMA1=0
for vv=1:100
    SUMA1=SUMA1+((beta1*4/(airgap*vv*pi))*(0.5+((vv*o1/td1)^2/(0.78-
2*(vv*o1/td1)^2)))*sin(1.6*pi*vv*o1/td1))*cos(vv*Q1*alfar);
end

A1=a01-SUMA1;

%mag. vodivost rotoru
b01=1/(kc2*airgap);

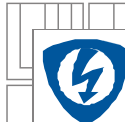
SUMA2=0
for vv=1:100
    SUMA2=SUMA2+((beta2*4/(airgap*vv*pi))*(0.5+((vv*o2/td2)^2/(0.78-
2*(vv*o2/td2)^2)))*sin(1.6*pi*vv*o2/td2))*cos(vv*Q2*alfar);
end

A2=b01-SUMA2;

Ss=pi*D*lfe;
delta=(1./A1)+(1./A2)-airgap;
A12=Ss*4e-7*pi./(delta);

%výpočet radiálního tlaku pr
pr=((Fs+Fr).^2).*(A12).^2/(2*4*pi*1e-7);
pr1=pr.*(54.25/1113.5);
%výpočet akustické hladiny radiálního tlaku
Lpr=20*log10(pr/p0);

figure(1)
subplot(5,1,1); plot(alfa,Fs)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('Fs[A]')
grid on
subplot(5,1,2); plot(alfa,Fr)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('Fr[A]')
grid on
subplot(5,1,3); plot(alfa,A12)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('A12[H]')
grid on
subplot(5,1,4); plot(alfa,pr)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('pr[Pa]')
grid on
```



---

```
subplot(5,1,5); plot(alfa,Lpr)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('Lpr[dB]')
grid on

figure(2)
plot(alfa,Fs)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('Fs[A]')
grid on

figure(3)
plot(alfa,Fr)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('Fr[A]')
grid on

figure(4)
plot(alfa,A12)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('A12[H]')
grid on

figure(5)
plot(alfa,pr)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('pr[Pa]')
grid on

figure(6)
plot(alfa,Lpr)
xlabel('alfa[rad]')
ylabel('Lpr[dB]')
grid on

%výpočet frekvence mag.hluku(max.složky)
nn=940; %jmenovité otáčky
sn=(ns-nn)/ns %skluz při jmenovitých otáčkách
fc=f1*(Q1/(2*p)+Q2/(2*p))*(1-sn)
```

## Příloha 2 - Naměřená hodnota maximální složky elektromagnetického hluku třetioktávovou analýzou

*Provozní podmínky měření*

VELIČINA	JEDNOTKA	HODNOTA
U	V	400,1
I	A	3,52
P	W	0,0
P <sub>1</sub>	W	231,2
n	ot/min	0,0
T	Nm	0,00
cosφ	-	0,095
f	Hz	50,02

*Hladina akustického tlaku maximální složky elektromagnetického hluku:*

f	L <sub>pf</sub>
Hz	dB
630	60,02

### Příloha 3 - Údaje a rozměry analyzovaného trojfázového asynchronního motoru

Údaje a rozměry analyzovaného motoru:

NÁZEV	OZNAČENÍ	JEDNOTKA	HODNOTA
Počet pólů	$p$	-	3
Počet drážek statoru	$Q_1$	-	36
Počet drážek rotoru	$Q_2$	-	33
Počet závitů fáze statoru	$N_1$	-	87
Počet závitů rotoru	$N_2$	-	1/2
Počet fází statoru	$m_1$	-	3
Krok statorového vinutí	$y$	-	5
Počet drážek na pól a fázi	$q_1$	-	2
Pólová rozteč	$\tau_p$	-	6
Drážková rozteč statoru	$t_{d1}$	mm	9,468
Drážková rozteč rotoru	$t_{d2}$	mm	10,329
Tloušťka vzduchové mezery	$\delta$	mm	0,25
Otevření drážky statoru	$o_1$	mm	3,05
Otevření drážky rotoru	$o_2$	mm	0
Vnitřní průměr jha statoru	$D$	mm	108,5
Délka jha statoru	$l_{fe}$	mm	90