



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ROZBOR PARAMETRŮ INDUKČNÍHO TROJFÁZOVÉHO MOTORU S KROUŽKOVOU KOTVOU

PARAMETER ANALYSIS OF AN INDUCTION THREE-PHASE MACHINE WITH A WOUND ROTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondrej Porubský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Ondřej Porubský

ID: 174239

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Rozbor parametrů indukčního trojfázového motoru s kroužkovou kotvou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Podle pokynů vedoucího proveďte renovaci historického asynchronního stroje s kroužkovou kotvou (uvedení do provozuschopného stavu).
2. Proveďte měření odporu a vlastních indukčností statorových vinutí, odporu rotorových vinutí a rozptylových indukčností statorových vinutí. Ověřte míru přesycení magnetického obvodu stroje ve jmenovitém napájecím bodě U/f (podle návodu vedoucího práce).
3. Analyzujte zastoupení jednotlivých dominantních ztrát (v železe statoru, ve vinutí statoru a ve vinutí rotoru). Identifikujte přibližně parametry náhradního schématu historického kroužkového motoru při chodu s kotvou nakrátko.
4. Proveďte měření závislosti účinnosti stroje na zatěžovacím momentu při jmenovitém statorovém napětí i kmitočtu a také závislosti účinnosti na napájecím napětí při jmenovitém zatěžovacím momentu a jmenovitém statorovém kmitočtu (obě závislosti při chodu s kotvou nakrátko).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] VOREL, Pavel. Řídicí členy v elektrických pohonech, skriptum VUT.
- [2] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice.
- [3] VOREL, Pavel. Průmyslová elektronika, skriptum VUT.

Termín zadání:

Termín odevzdání:

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Konzultant:

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

Táto bakalárska práca v prvej časti popisuje všeobecný princíp činnosti asynchrónneho motoru. Druhá časť sa zaoberá renováciu historického motoru s vinutým rotorom ďalej popisuje jednotlivé merania potrebné k výpočtom, výpočet parametrov motora a ich rozbor.

Kľúčové slová

Asynchrónny motor s vinutým rotorom, princíp činnosti asynchrónneho motora, parametre asynchrónneho motora, účinnosť, výkonové straty

Abstract

This bachelor thesis describes the general principle of induction motor operation in the first part. The second part deals with the renovation of the historic motor rotor winding further describes the measurements needed to calculate motor parameters and their analysis.

Keywords

Induction motor with wound rotor, induction motor principle, paramaters
induction motor, efficient, power losses

Bibliografická citácia:

PORUBSKÝ, O. Rozbor parametrů indukčního trojfázového motoru s kroužkovou kotvou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 46s. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Vorel Ph.D

Prehlásenie

„Prehlasujem, že záverečnú prácu na tému Rozbor parametrov indukčného trojfázového motora s kroužkovou kotvou som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa **25. mája 2018**

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Pavlovi Vorlovi, Ph.D za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a d'alšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa **25. mája 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Asynchrónny motor.....	2
2.1	Princíp činnosti	3
2.2	Magnetizačný prúd a statorový tok.....	3
2.3	Napätie indukované v rotore (rotorové napätie)	6
2.4	Rotorový prúd a vznik momentu.....	7
2.5	Výkonové straty motora	12
2.5.1	Straty vo vinutí.....	13
2.5.2	Straty v železe statora.....	13
3	Popis a renovácia historického motora svet.....	16
4	Rozbor parametrov historického motora Svet	24
4.1	Meranie odporu a výpočet strát statorového vinutia motora	24
4.2	Meranie odporu rotorového vinutia motora a prechodového odporu na krúžkoch rotora.....	25
4.3	Mechanické straty motora	27
4.4	Straty v rotore.....	28
4.5	Straty v železe statora.....	28
4.6	Vlastná indukčnosť statorového vinutia.....	31
4.7	Meranie rozptylovej indukčnosti a rotorového odporu.....	35
4.8	Výpočet účinníku a účinnosti motora.....	36
4.9	Meranie závislosti účinnosti na výkone a na napájacom napätí	37
4.10	Zoznam meracích prístrojov	41
5	Záver	42
	Literatura.....	44

Zoznam obrázkov

Obrázok 2.1: Popis jednotlivých častí asynchrónneho motora s kotvou nakrátko (prevzaté z [11], upravené)	2
Obrázok 2.2: Grafické znázornenie magnetického sýtenia ktoré závisí na U_s a f . [2] ..	4
Obrázok 2.3: Závislosť momentu na rotorovej frekvencii bez uvažovania rozptylovej indukčnosti.....	8
Obrázok 2.4: Závislosť rotorového prúdu od rotorovej frekvencie.....	9
Obrázok 2.5: Zmena veľkosti uhlu α závislá od veľkosti rotorovej frekvencie [2] ..	10
Obrázok 2.6: Závislosť momentu na rotorovej frekvencii s uvažovaním rozptylovej indukčnosti [2].....	11
Obrázok 2.7: Závislosť momentu od rotorovej frekvencie [2]	11
Obrázok 2.8: Závislosť momentu na otáčkach motora (momentová charakteristika)	12
Obrázok 2.9: Výkonový tok asynchrónneho motora, prevzaté z [1], upravené	12
Obrázok 3.1: Štítok elektromotora SVET	17
Obrázok 3.2: Historický pohon SVET pred renováciou.....	18
Obrázok 3.3: Elektromotor SVET pred renováciou.....	19
Obrázok 3.4: Elektromotor SVET pred renováciou	19
Obrázok 3.5: Odporový spúšťač motora svet	20
Obrázok 3.6: Azbestová doska zo spúšťača pred čistením a po čistení	20
Obrázok 3.7: Mosadzná spojka použitá na spojenie odporového drôtu v odporovom spúšťači	20
Obrázok 3.8: Nožový vypínač s poistkami pre renováciu	21
Obrázok 3.9: Pracovisko pri čistení a odmasťovaní	21
Obrázok 3.10: Stator elektromotora SVET pred čistením	22
Obrázok 3.11: Klzné ložisko motora SVET	22
Obrázok 3.12: Podvozok a skriňa pohonu SVET po renovácií.....	23
Obrázok 3.13: Elektromotor SVET po renovácií	23
Obrázok 4.1: Schéma zapojenia meracích prístrojov pri meraní odporu statorového vinutia	24
Obrázok 4.2: Schéma zapojenia meracích prístrojov pri meraní rotorového odporu motora.....	25
Obrázok 4.3: Meranie prechodového odporu medzi uhlíkom a krúžkom rotora	26
Obrázok 4.4: Veľkosti napätia na prechodovom odpore kartáča v závislosti na pretekajúcom prúde.....	26
Obrázok 4.5: Meranie parametrov motora na dynamometri, potrebných pre výpočet strát v železe statora	29

Obrázok 4.6: Náhradná schéma motora pre jednu fázu (vinutie rotora rozpojené)	29
Obrázok 4.7: Fázorový diagram náhradnej schémy motora	30
Obrázok 4.8: Závislosť vlastnej indukcie statorového vinutia na napájacom napätí a porovnanie troch rôznych výpočtov.....	34
Obrázok 4.9: Náhradná schéma motora pre meranie rozptylovej indukčnosti	35
Obrázok 4.10: Závislosť účinnosti motora na zaťažovacom momente pre rôzne veľkosti napájacieho napätia	39
Obrázok 4.11: Závislosť účinnosti na napájacom napätí pre rôzne veľkosti zaťažovacieho momentu.....	41

Zoznam tabuliek

Tabuľka 4-1: Namerané a vypočítané hodnoty odporu pre meranie odporu statorového vinutia a strát vo vinutí.....	25
Tabuľka 4-2: Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie odporu rotorového vinutia	25
Tabuľka 4-3: Namerané a vypočítane hodnoty pre meranie prechodového odporu na krúžkoch motora	26
Tabuľka 4-4: Namerané hodnoty mechanických strát.....	27
Tabuľka 4-5: Namerané hodnoty mechanických strát pri oddialených kartáčoch .	27
Tabuľka 4-6: Namerané hodnoty pri skúške naprázdno, rotorom nakrátko, s výpočtom strát a odporu železa statora s uvažovaním $U_1=U$	30
Tabuľka 4-7: Namerané hodnoty pri skúške naprázdno, rotorom nakrátko s výpočtom strát a odporu železa statora	31
Tabuľka 4-8: Namerané a vypočítané hodnoty vlastnej indukčnosti statora, prvý výpočet	32
Tabuľka 4-9: Namerané a vypočítané hodnoty vlastnej indukčnosti statora, druhý výpočet	33
Tabuľka 4-10: Namerané a vypočítané hodnoty vlastnej indukčnosti statora, tretí výpočet	34
Tabuľka 4-11: Namerané hodnoty pre výpočet rozptylovej indukčnosti.....	36
Tabuľka 4-12: Vypočítané hodnoty potrebné k výpočtu rozptylovej indukčnosti..	36
Tabuľka 4-13: Účinník a účinnosť pri menovitej záťaži	37
Tabuľka 4-14: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 235 V	37
Tabuľka 4-15: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 220 V	38
Tabuľka 4-16: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 200V	38
Tabuľka 4-17: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 180 V	38
Tabuľka 4-18: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 160 V	38
Tabuľka 4-19: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 140 V	38
Tabuľka 4-20: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 5,3 Nm	39
Tabuľka 4-21: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 10,3 Nm	39

Tabuľka 4-22: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 15,3 Nm.....	40
Tabuľka 4-23: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 20,3 Nm	40
Tabuľka 4-24: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 30,3 Nm	40

1 ÚVOD

Asynchrónne stroje patria do veľkej skupiny elektrických strojov, ktoré umožňujú elektromechanickú premenu energie. Tieto stroje rozdeľujeme do dvoch skupín: sú to motory, ktoré premieňajú elektrickú energiu na mechanickú energiu a generátory, ktoré menia mechanickú energiu na elektrickú energiu. Ako generátory sa používajú vo veterných a malých vodných elektrárňach. Asynchrónne stroje sa používajú hlavne ako motory, ich vlastnosti ako spoľahlivosť, jednoduchosť, vysoký hmotný výkon, nenáročná údržba a robustnosť z nich robia najpoužívanejšie elektrické stroje. Ale majú aj svoje nevýhody. Jednou z nich je aj zložité a technicky náročné riadenie ich rýchlosti pri maximálnom využití stroja. Tento nedostatok sa rozvojom polovodičovej a mikroprocesorovej techniky odstraňuje.

Témou bakalárskej práce je rozbor parametrov indukčného trojfázového motora s krúžkovou kotvou, jedná sa o historický motor vyrobený okolo roku 1930.

V prvej časti bakalárskej práce popisujem všeobecný princíp asynchrónneho motora.

Druhá časť práce popisuje renováciu historického pohonu. V tretej časti popisujem merania vykonané z cieľom získania parametrov potrebných na výpočet strát, účinnosti pre rôzne napájacie napätia a rôzne veľkosti zaťaženia motora. Na záver popisujem a rozoberám parametre historického motora.

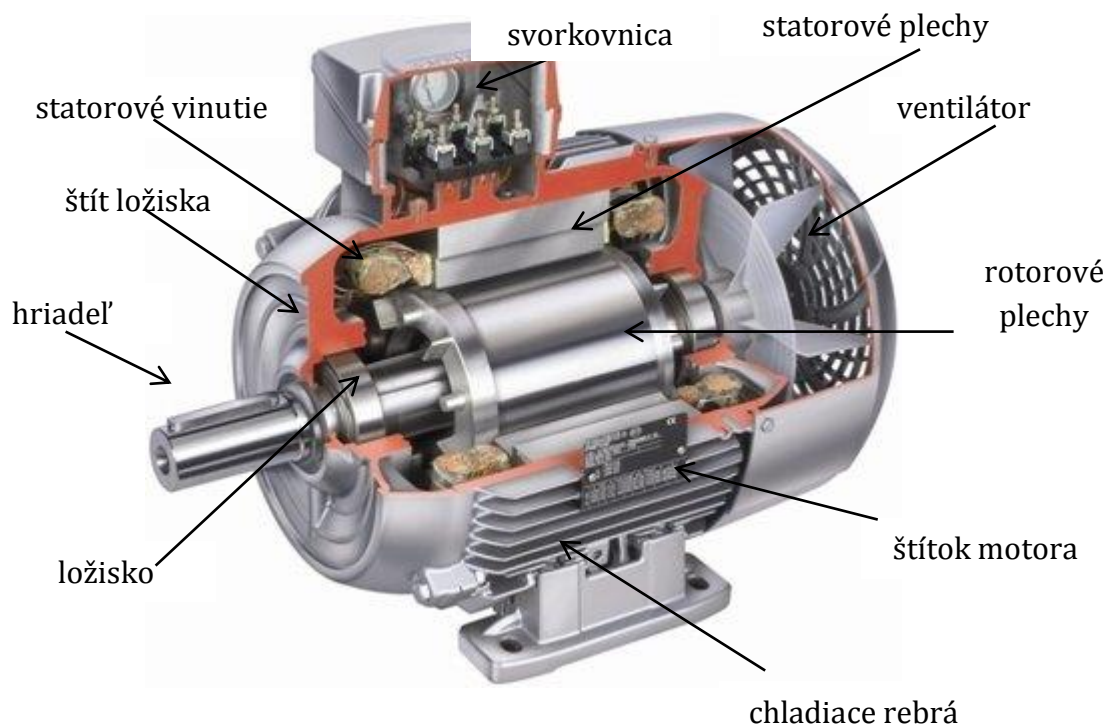
2 ASYNCHRÓNNY MOTOR

Asynchrónny motor, ako aj všetky elektrické zariadenia, ktoré nám slúžia na elektro-mechanickú premenu energie, sa skladá z dvoch hlavných častí.

Pevná (statická) časť statora, je zložený z nosnej konštrukcie motora, v ktorej je nalisovaný zväzok statorových plechov v tvare medzikružia, drážkovaných z vnútornej strany, hrúbka plechu 0,3 mm alebo 0,5mm. Tieto plechy sú navzájom izolované lakom, tvoria časť magnetického obvodu stroja. Vinutie statora býva vyhotovené z medených vodičov, ktoré sú uložené v drážkach statora a na izoláciu vodičov sa používajú špeciálne laky alebo sa vodiče smaltujú. Začiatky a konce vinutia sú vyvedené na svorkovnicu.

Druhú časť motora tvorí rotor. Skladá sa tiež z rotorových plechov v tvare medzikružia, v strede s otvorom na hriadel' a drážky sú z vonkajšej strany. Plechy sú nalisované na hriadeli rotora, ktorý sa otáča na ložiskách, upevnených v ložiskových štítoch statora, ktoré vymedzujú polohu rotora vo vnútri statora. Vznikne tak vzduchová medzera, ktorá je čo najmenšia s ohľadom na presnosť výroby a bezpečnosť výroby, aby magnetický odpor, a tým aj magnetizačný prúd bol čo najmenší. V drážkach rotora je uložené vinutie, ktorému sa hovorí kotva.

Motory veľkých výkonov s kotvou nakrátko majú v drážkach rotora uložené medené alebo mosadzné vodiče (tyče). Vodiče sú na začiatku a konci spojené spojovacími kruhmi nakrátko. Pri motoroch s menšími výkonmi sa hovorí o tzv. kľietke. Roztavený hliník sa vlieva priamo do rotorových drážok, pri čom sa rovno odlejú aj spojovacie krúžky s vetracími lopatkami. U motorov, kde je dôležitá regulácia otáčok alebo plynulý rozbeh je rotor navinutý, v drážkach rotora sú uložené trojfázové vinutia z izolovaných vodičov, začiatky fáz sú spojené do uzla a konce sú pripojené k zberacím krúžkom, ku ktorým sú pritláčané uhlíky. [1][5]



Obrázok 2.1: Popis jednotlivých častí asynchrónneho motora s kotvou nakrátko (prevzaté z [11], upravené)

2.1 Princíp činnosti

Asynchrónny motor pracuje na princípe otáčavého magnetického poľa, vyvolaného účinkom prúdu v statorovom vinutí. Po pripojení striedavého napätia na statorové vinutie, začne ním pretekať prúd, v dôsledku čoho vo vnútri statora vznikne otáčavé magnetické pole, točiace sa synchronnými otáčkami n_1 . Magnetické pole pretína vinutie rotora, indukuje v ňom napätie a ak je rotorový obvod uzavretý začne ním pretekať prúd. Na rotorové vinutie začne ako na každý vodič, ktorý sa nachádza v magnetickom poli a tečie ním prúd pôsobiť mechanická ťažná sila. Súčet všetkých síl jednotlivých vodičov vytvorí točivý moment, ktorý pôsobí v rovnakom zmysle ako sa otáča magnetické pole. Prúdy v rotore sa indukujú vo viac fázových strojoch len vtedy ak sa magnetické pole voči rotora otáča, čiže otáčky rotora n sú menšie ako otáčky poľa n_1 . Keď má rotor rovnaké otáčky ako magnetické pole, relatívny pohyb poľa voči rotora zanikne, dôsledkom je že sa v rotore neindukuje napätie. Následne v rotorovom vinutí nevznikne prúd a na rotor prestane pôsobiť sila (zaniká moment). Preto musí vždy platiť $n < n_1$. [6][7]

2.2 Magnetizačný prúd a statorový tok

Pre zjednodušenú predstavu princípu sa budeme na statorové vinutie pozerat' ako na jednoduchú cievku. Magnetický tok v statorovom vinutí je principiálne priamo úmerný časovému integrálu napätia na statorovej cievke. [2] [4]

$$\Phi_s(t) = \frac{1}{N} \cdot \int u_s(t) dt \quad (2.1)$$

Φ_s ... Okamžitá hodnota magnetického indukčného toku [Wb],

N ... Počet závitov statorovej cievky [-],

u_s ... Okamžitá hodnota napätia na statorovej cievke [V],

Ďalej môžeme vyjadriť sýtenie magnetického obvodu ako plošnú hustotu, ktorá bude v prípade homogénneho magnetického poľa [2]:

$$B_s(t) = \frac{\Phi_s(t)}{S_{fe}} \quad (2.2)$$

S_{fe} ... Plocha, ktorou prechádza magnetický indukčný tok [m²],

B_s ... Sýtenie magnetického obvodu (magnetická indukcia) [T],

Po dosadení vzťahu (2.1) do (2.2) získame:

$$B_s(t) = \frac{1}{S_{fe} \cdot N} \cdot \int u_s(t) dt \quad (2.3)$$

Z toho vzťahu je jasné, že sýtenie magnetického obvodu je úmerné integrálu napájacieho napätia. Pre maximálne sýtenie potom platí [2]:

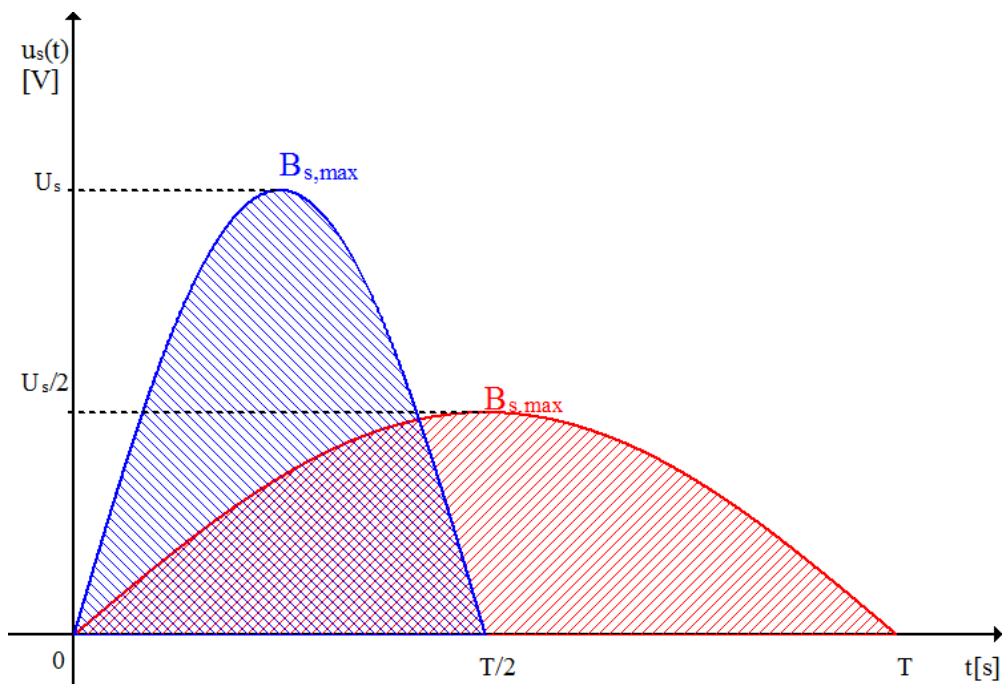
$$B_{s,max} = \frac{1}{S_{fe} \cdot N} \cdot \max \int u_s(t) dt \sim U_s \cdot T \sim \frac{U_s}{f} \quad (2.4)$$

$$B_{s,max} \sim \frac{U_s}{f} \quad (2.5)$$

T ... Perióda napájacieho napätia [s],

f ... Frekvencia napájacieho napätia [Hz],

U_s ... Amplitúda napájacieho napätia [V],



Obrázok 2.2: Grafické znázornenie magnetického sýtenia ktoré závisí na U_s a f . [2]

Z obrázku 2.2 je vidieť že magnetické sýtenie sa nemení ak je dodržaný pomer napájacieho napätia a frekvencie. Zmenou tohto pomeru meníme magnetické sýtenie (amplitúdu magnetickej indukcie). Pri znižovaní magnetického sýtenia (odbudenie) sa znižuje maximálny moment, ktorý môže motor vyvinúť. Zvyšovaním magnetického sýtenia (prebudenie) dochádza k presýteniu magnetického obvodu, tým k strmému nárastu magnetizačného prúdu statorového vinutia a následnému prehriatiu vinutia [2].

Ďalej môžeme pre napätie cievky napísať:

$$u = N \cdot \frac{d\phi_s}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.6)$$

L ... Indukčný tok cievky [H],

Po zintegrování rovnice dostaneme:

$$N \cdot \Phi_s(t) = L \cdot i(t) \quad (2.7)$$

kde $N \cdot \Phi_s(t)$ je dané napájaním a maximálne hodnoty veličín sú:

$$N \cdot \Phi_{s,max} = L \cdot I_{max} \quad (2.8)$$

$$N \cdot \Phi_{s,max} = \Psi_{max} \quad (2.9)$$

$\Phi_{s,max}$... Maximálny magnetický tok [Wb],

Ψ_{max} ... Maximálna hodnota spráženého toku [Wb],

Ak hovoríme o vinutí motora alebo transformátora, predstavuje prúd v rovnici (2.7) prúd magnetizačný. Pre indukčnosť cievky platí [2][4]:

$$L = N \cdot \Lambda \quad (2.10)$$

Λ ... Magnetická vodivosť [H],

Pre výpočet magnetickej vodivosti podľa [2] [4] platí vzťah :

$$\Lambda = \mu_r \mu_0 \cdot \frac{S}{l_m} = \frac{1}{R_m} \quad (2.11)$$

μ_r ... Relatívna permeabilita,

μ_0 ... Permeabilita vákua,

l_m ... Stredná dĺžka dráhy magnetického toku [m],

R_m ... Magnetický odpor [H⁻¹],

Celkový magnetický odpor je rovný súčtu magnetického odporu jadra a vzduchovej medzery. Keďže prierez jadra S_{Fe} a vzduchovej medzery S_V je rovnaký a relatívna permeabilita vzduchu sa blíži jednej môžeme napísať

$$R_m = \frac{1}{\mu_r \mu_0 \cdot \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}}} + \frac{1}{\mu_r \cdot \frac{S_{Fe}}{l_V}} = \frac{l_{Fe} + \mu_r \cdot l_V}{\mu_r \mu_0 \cdot S_{Fe}} \quad (2.12)$$

$$R_m = R_{Fe} + R_V \quad (2.13)$$

R_{Fe} ... Magnetický odpor železného jadra [H⁻¹],

R_V ... Magnetický odpor vzduchovej medzery [H⁻¹],

Z rovnice (2.13) je jasné že magnetická vodivosť je závislá na veľkosti vzduchovej medzery, pri zväčšovaní dĺžky vzduchovej medzery rastie magnetický odpor a tým pádom klesá magnetická vodivosť. Následne z rovnice pre indukčnosť (2.10) plynie : zníženie magnetickej vodivosti zníži aj indukčnosť. Ďalej sa zníženie indukčnosti prejaví v rovnici (2.8) a to zvýšením prúdu, aby platila rovnosť v rovnici (2.8) (magnetický tok sa nezmení), a to len za predpokladu že zachováme priebeh napájacieho napätia, respektíve nezmeníme sýtenie magnetického obvodu. Z toho vyplýva že zväčšením vzduchovej medzery sa zväčší magnetizačný prúd ktorý bude pretekať vinutím. Z tohto dôvodu sa snažíme o čo najmenšiu vzduchovú medzeru z ohľadom na reálne vyhotovenie.

2.3 Napätie indukované v rotore (rotorové napätie)

Statorové vinutie vytvára točivé magnetické pole, ktoré sa uzatvára cez rotorové vinutie, indukuje sa v ňom napätie a ak je rotorové vinutie uzavreté tak ním preteká prúd. Prúd v rotorovom vinutí vytvára magnetické pole rotora.

Pôsobením magnetického poľa statora na magnetické pole rotora vzniká sila ktorá pôsobí na vodiče v rotore. Rotor sa bude otáčať otáčkami n v smere točivého magnetického poľa statora s otáčkami n_s . Potom elektrická frekvencia v rotore bude[1]:

$$f_{rot} = f_s - \frac{n}{60} \cdot p \quad (2.14)$$

f_{rot} ... Elektrická frekvencia v rotore [Hz],

f_s ... Frekvencia točivého magnetického poľa statora [Hz],

n ... Otáčky rotora [min^{-1}],

p ... Počet pólových dvojíc motora [-],

Otáčky magnetického poľa statora sú závislé na počte pólových dvojíc a frekvencii napájacieho napätia. Pod pojmom sklz sa rozumie fakt že otáčky motora sú menšie ako otáčky statorového točivého poľa.

$$s_{[\%]} = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (2.15)$$

n_s ... Otáčky točivého magnetického poľa statora [Hz],

s ... Sklz [%],

Rotorový magnetický tok [2]:

$$\Phi_{rot}(t) = \Phi_{s,max} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{rot} \cdot t) \quad (2.16)$$

$\Phi_{rot}(t)$... Magnetický tok rotora [Wb],

Podľa Faradayovho indukčného zákona je napätie indukované v rotore priamo úmerné časovej derivácii rotorového toku:

$$U_{rot} \sim \frac{d\Phi_{rot}(t)}{dt} = \Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot} \cdot \cos(2\pi \cdot f_{rot} \cdot t) \quad (2.17)$$

Z toho amplitúda rotorového napätia je:

$$U_{rot} \sim \Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot} \sim B_{s,max} \cdot f_{rot} \quad (2.18)$$

$$U_{rot} = k \cdot f_{rot} \quad (2.19)$$

kde konštanta k zahrnuje tiež sýtenie.

Zo vzorca (2.14) plynie : zaťažením motora klesajú jeho mechanické otáčky následne rastie elektrická frekvencia v rotore a preto vo vzorci (2.18) rastie aj amplitúda napätia v rotore, a to za predpokladu že sa nemení magnetický tok $\Phi_{s,max}$ ktorý je daný statorom a napájaním.

2.4 Rotorový prúd a vznik momentu

Ak si predstavíme motor ako transformátor, môžeme najskôr uvažovať s nulovým rozptylom transformátora. Obrázok 2.3 predstavuje statorové a rotorové vinutie. Rotorovým vinutím spojeným nakrátko bude pretekať harmonický prúd, ktorého amplitúda je (U_{rot} pritom uvažujeme podľa 2.18):

$$I_{rot} = \frac{U_{rot}}{R_{rot}} \sim \frac{B_{s,max} \cdot f_{rot}}{R_{rot}} \quad (2.20)$$

R_{rot} ... Odpor rotorového vinutia [Ω],

I_{rot} ... Prúd tečúci rotorovým vinutím [A],

Rotorový prúd pri konštantnom sýtení bude priamo úmerný rotorovej frekvencii.

Na vodič rotora, ktorým preteká prúd bude pôsobiť magnetické pole statora a výsledkom bude sila F pôsobiaca na vodič v rotore. Ak sa jedná o jeden priamy vodič umiestnený v homogénnom magnetickom poli kolmo na smer siločiar, vznikne sila:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (2.21)$$

V rotore bude táto sila priamo úmerná súčinu magnetickej indukcie a rotorového prúdu:

$$F \sim B_{s,max} \cdot I_{rot} \quad (2.22)$$

Moment je vytvorený silou F vo vzdialenosti r od osy otáčania. Vzťah pre veľkosť momentu :

$$M = F \cdot r \quad M \sim F \sim B_{s,max} \cdot I_{rot} \quad (2.23)$$

r ... Polomer rotora [m],

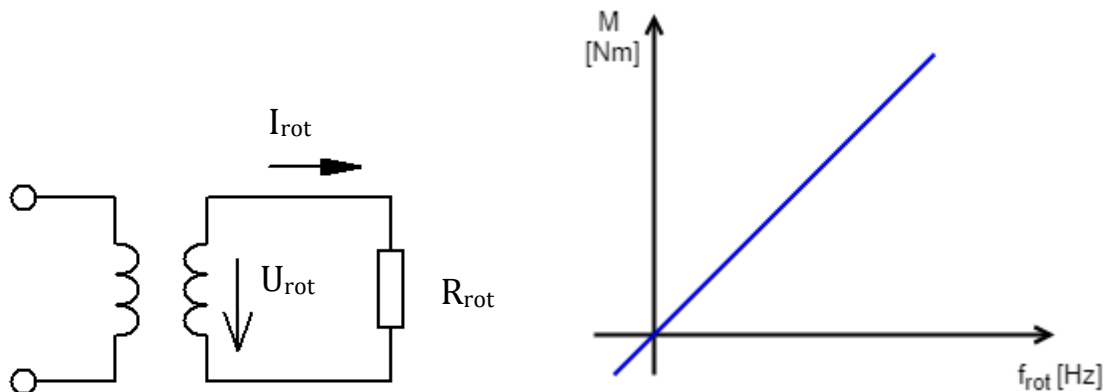
M ... Moment [Nm],

Po dosadení I_{rot} (2.20) do vzorca (2.23) dostaneme :

$$M \sim B_{s,max} \cdot \frac{B_{s,max} \cdot f_{rot}}{R_{rot}} \sim B_{s,max}^2 \cdot f_{rot} \quad (2.24)$$

Nemenným napájaním statora (nemení sa sýtenie a pomer U_s/f) je dané, že $B_{s,max}$ je konštantné. Z rovnice (2.24) je vidieť, že moment bude priamo úmerný frekvencii rotora (a kvadrátu sýtenia):

$$M \sim f_{rot} \quad (2.25)$$



Obrázok 2.3: Závislosť momentu na rotorovej frekvencii bez uvažovania rozptylovej indukčnosti

Amplitúdu rotorového prúdu teraz vyjadríme s vplyvom rozptylovej indukčnosti:

$$I_{rot} = \frac{U_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot} \cdot L_{\sigma})^2}} \quad (2.26)$$

L_{σ} ... Rozptylová indukčnosť [H],

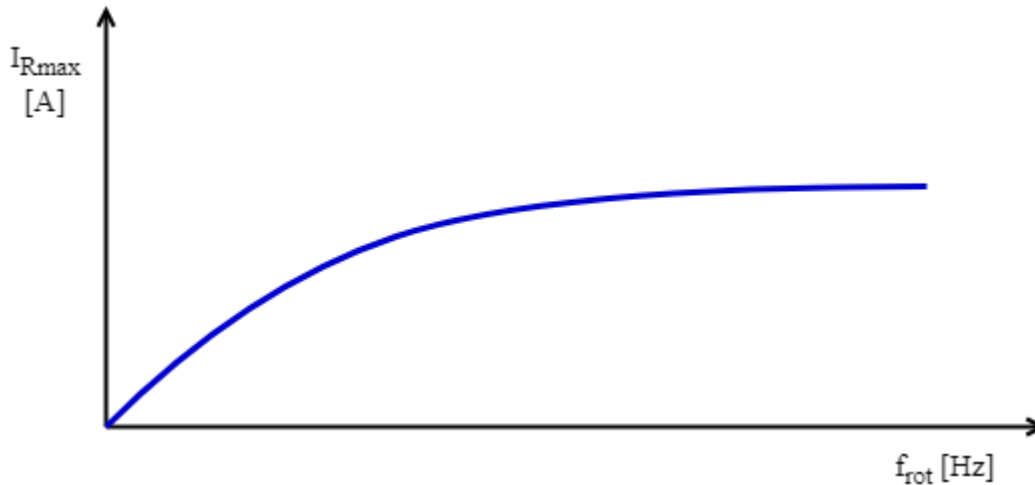
Za U_{rot} dosadíme rovnicu (2.19) a dostaneme:

$$I_{rot} = \frac{k \cdot f_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot} \cdot L_{\sigma})^2}} \quad (2.27)$$

Pre väčšie rotorové frekvencie, kedy reaktancia rozptylovej indukčnosti už prevažuje nad odporom, môžeme tento odpor vo vzorci (2.27) zanedbať, a potom čitateľ a menovateľ vzťahu (2.27) sú úmerné f_{rot} . Táto závislosť sa potom vykrátí a pre väčšie rotorové frekvencie sa preto prúd ustáli na hodnotu vzorec (2.28):

$$\lim_{f_{rot} \rightarrow \infty} I_{rot} = \lim_{f_{rot} \rightarrow \infty} \frac{k \cdot f_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot} \cdot L_{\sigma})^2}} = \frac{k \cdot f_{rot}}{2\pi \cdot f_{rot} \cdot L_{\sigma}} = \frac{k}{2\pi \cdot L_{\sigma}} \quad (2.28)$$

Priebeh prúdu je znázornený na obrázku 2.4.



Obrázok 2.4: Závislosť rotorového prúdu od rotorovej frekvencie

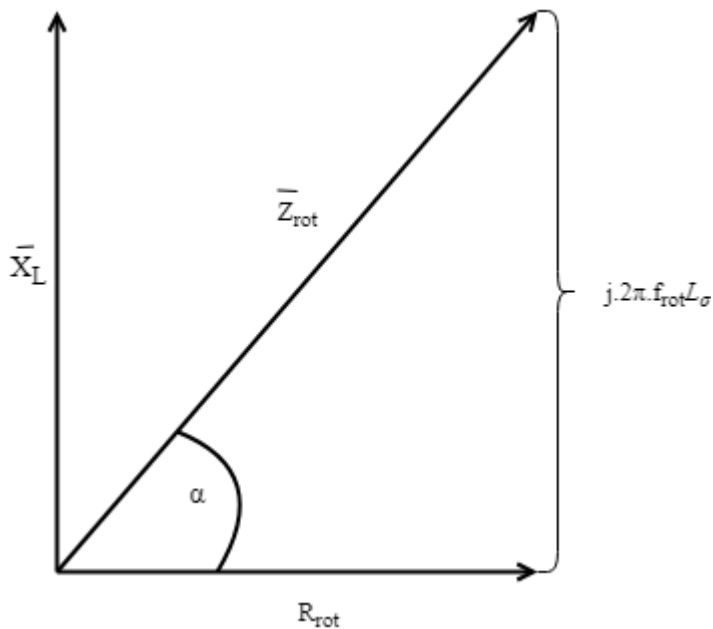
Ak by platil vzťah (2.22), tak by aj moment odpovedal obrázku 2.6. Vďaka existencii rozptylovej indukčnosti však dochádza k fázovému posunu medzi rotorovým prúdom a rotorovým napätím. Tento fázový posun je závislý na rotorovej frekvencii. Vnútorňý záťažný uhol stroja je doplnkom tohto posunu do 90° , vzťah (2.22) platil pre optimálny záťažný uhol 90° , tj. pre nulový fázový posun medzi rotorovým napätím a rotorovým prúdom (maximálny moment pri danom rotorovom prúde). Ak fázový posun zohľadníme dostaneme vzorec:

$$M = B_{Smax} \cdot I_{Rmax} \cdot \cos\alpha \quad (2.29)$$

α ... fázový posun medzi rotorovým napätím a rotorovým prúdom

Uhol α spočítame pomocou vzorca (2.30), ktorý vyplýva z geometrie obrázku 2.5 :

$$\alpha = \arccos \frac{R_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi f_{rot} \cdot L_{\sigma})^2}} \quad (2.30)$$



Obrázok 2.5: Zmena veľkosti uhlu α závislá od veľkosti rotorovej frekvencie [2]

Do vzťahu (2.29) dosadíme vzťah (2.26) a (2.30):

$$M \sim B_{s,max} \cdot \frac{U_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot} \cdot L_{\sigma})^2}} \frac{R_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot} \cdot L_{\sigma})^2}} \quad (2.31)$$

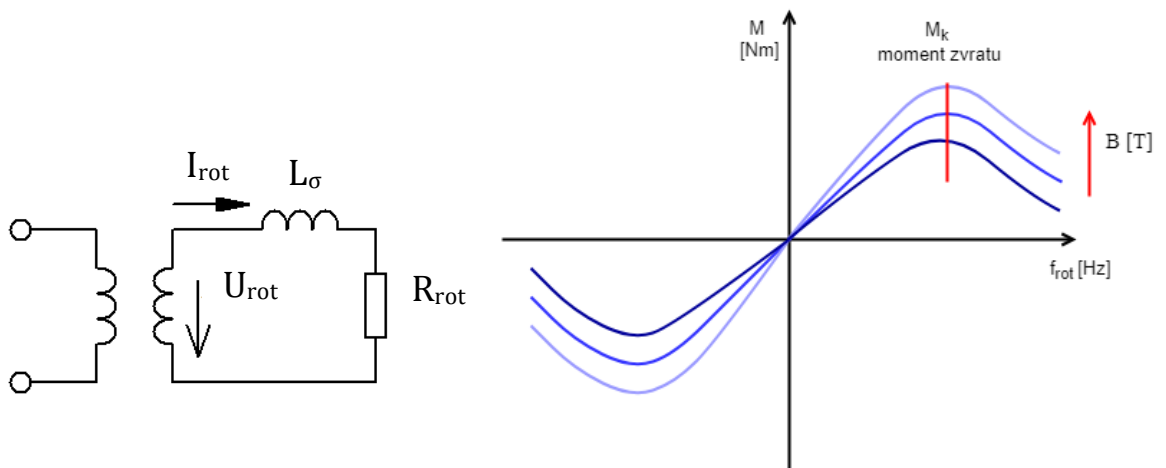
Ak použijeme U_{rot} podľa (2.18) môžeme vzťah (2.31) upraviť:

$$M \sim B_{s,max}^2 \cdot \frac{R_{rot} \cdot f_{rot}}{R_{rot}^2 + (2\pi f_{rot} \cdot L_{\sigma})^2} \quad (2.32)$$

Táto závislosť momentu na rotorovej frekvencii na rozdiel od prúdu vykazuje lokálne maximum momentu zvratu, vid'. obrázok 2.6.

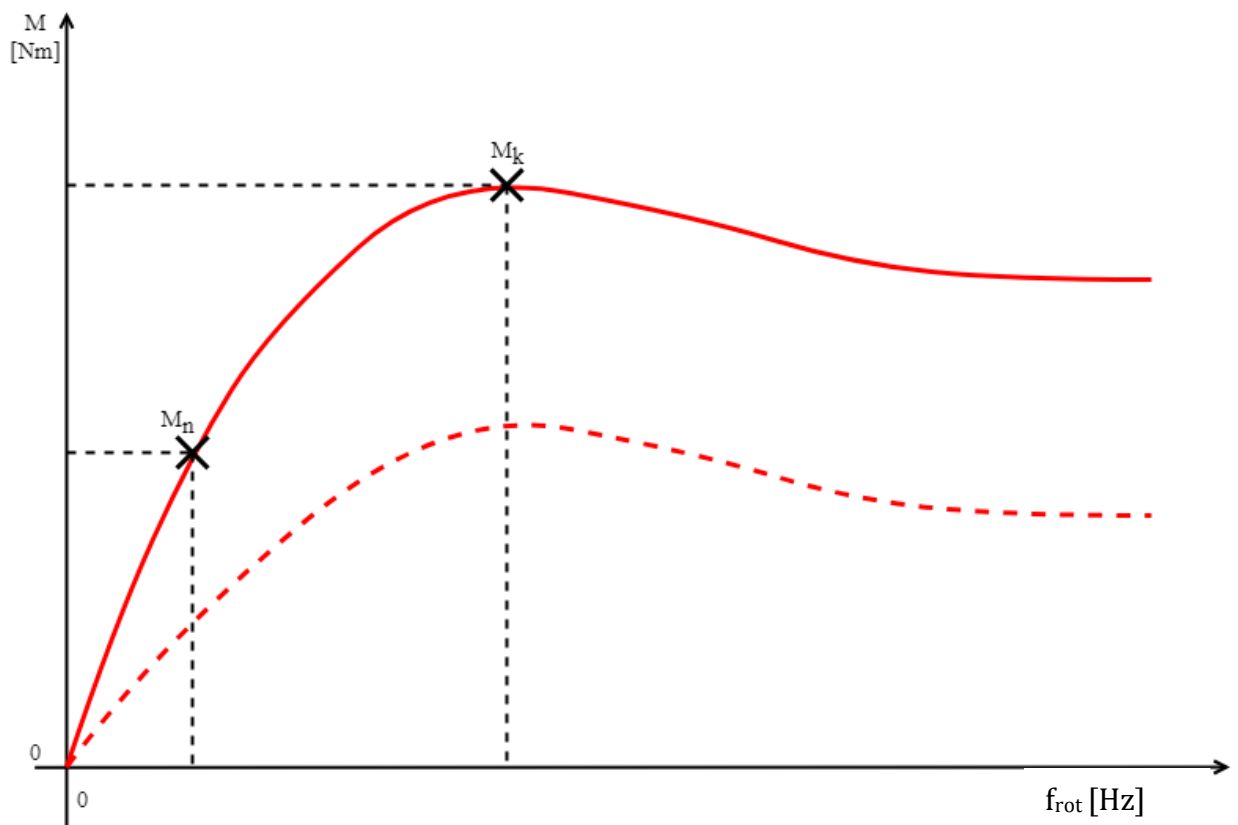
Z obrázku 2.6 vidíme, že pre nízke hodnoty rotorovej frekvencie takmer lineárne rastie aj moment, pretože reaktancia rozptylovej indukčnosti je malá.

Pri vyššej rotorovej frekvencií (od rotorovej frekvencie v momente zvratu) prúd síce naďalej mierne rastie, ale začne sa ustal'ovať. Pritom rotorové napätie stále rastie (pokrýva úbytok na rastúcej reaktancii rozptylovej indukčnosti), a tým rastie uhol α . Výsledkom je preto pokles momentu.

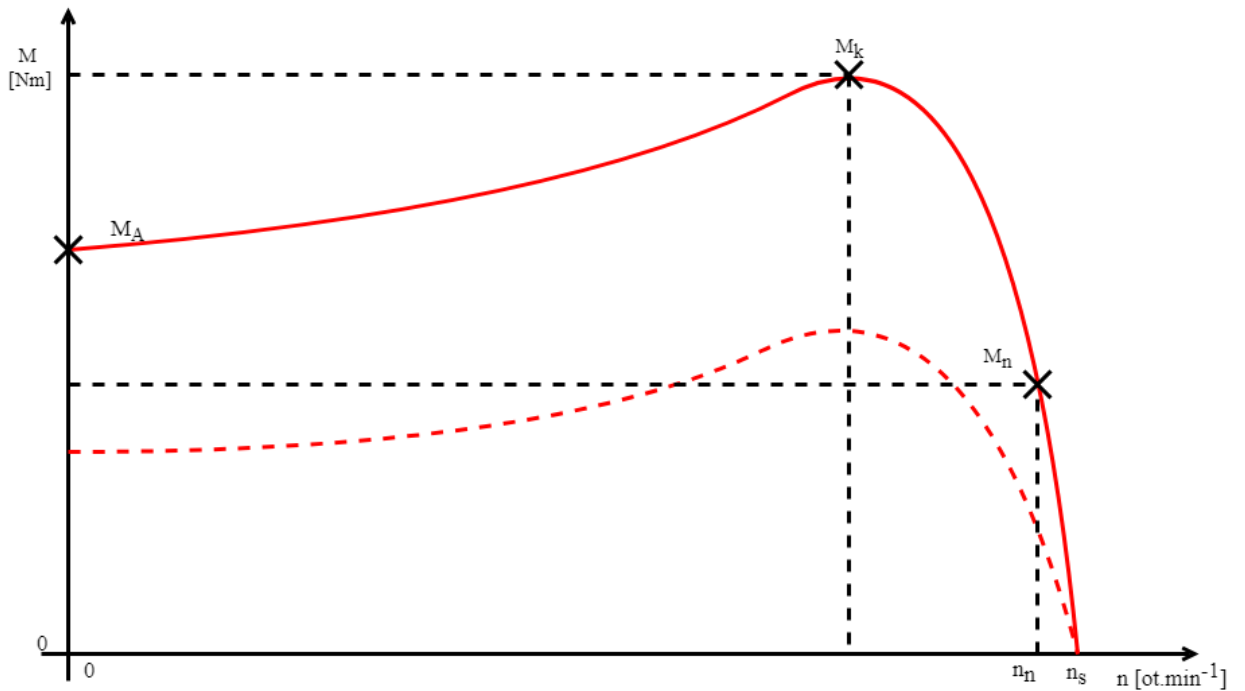


Obrázok 2.6: Závislosť momentu na rotorovej frekvencii s uvažovaním rozptylovej indukčnosti [2]

Zo závislosti momentu na rotorovej frekvencií - obrázok 2.6 a detailne obrázok 2.7, odvodíme momentovú charakteristiku, ktorá platí pri konštantnom napájacom napätí a frekvencii (obrázok 2.8).



Obrázok 2.7: Závislosť momentu od rotorovej frekvencie [2]



Obrázok 2.8: Závislosť momentu na otáčkach motora (momentová charakteristika)

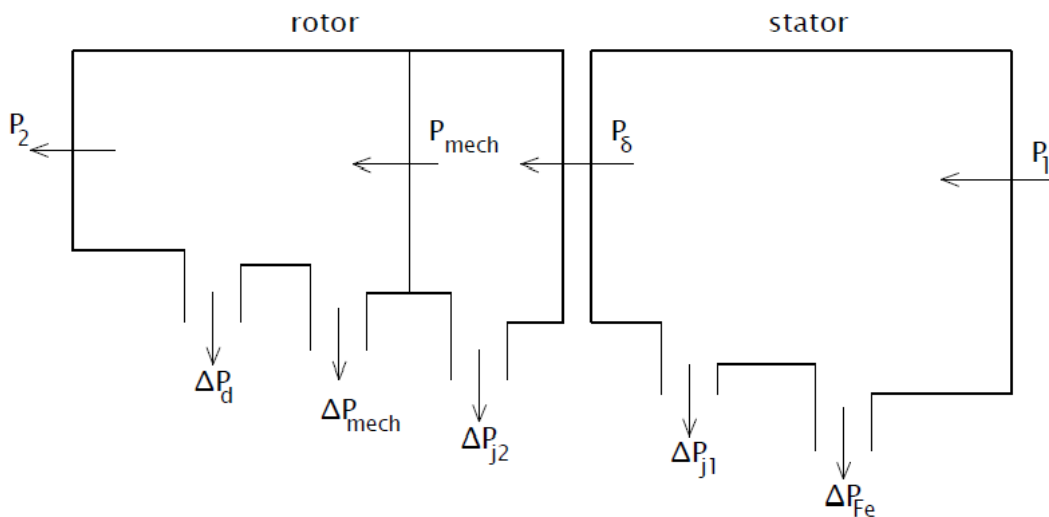
2.5 Výkonové straty motora

Ako prvé je potrebné si určiť príkon indukčného stroja:

$$P_1 = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) = 3 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad (2.33)$$

Ďalej môžeme povedať, že výkon na hriadieli motora je:

$$P_2 = M \cdot \omega = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (2.34)$$



Obrázok 2.9: Výkonový tok asynchrónneho motora, prevzaté z [1], upravené

2.5.1 Straty vo vinutí

Straty vo vinutí (Joulove straty) vznikajú prechodom prúdu vinutím motora. Tieto straty sú závislé na druhej mocnine efektívnej hodnoty pretekajúceho prúdu I a na veľkosti odporu vinutia R , ale frekvencia napájacieho napätia ich neovplyvňuje. Straty vo vinutí sa počítajú samostatne pre stator a rotor. Z celkových strát asynchrónneho motora sa tieto straty považujú za najväčšie. [8]

Joulove straty v statore:

$$\Delta P_{j1} = m \cdot R_s \cdot I_f^2 \quad (2.35)$$

m ... počet fáz [-],

R_s ... Odpor fáze statorového vinutia [Ω],

I_f ... Fázový prúd (efektívna hodnota) [A],

Pre Joulove straty v rotore platí podobný vzťah:

$$\Delta P_{j2} = m \cdot (R_{rot} + R_{spúšťača}) \cdot I_{rot}^2 \quad (2.36)$$

R_{rot} ... Rotorový odpor [Ω],

$R_{spúšťača}$... Odpor rotorového spúšťača [Ω],

I_{rot} ... Prúd indukovaný v rotore [A],

Joulove straty vo vinutí rotora môžeme jednoducho spočítať z mechanických parametrov. Z princípu musí platiť:

$$\Delta P_{j2} = M \cdot \frac{2\pi \cdot f_{rot}}{p} \quad (2.37)$$

Medzi tieto straty môžeme ešte zaradiť aj straty v klzných kontaktoch (rotor s vinutou kotvou). Tieto straty ale nie je možné presne určiť, pretože odpor kartáča sa mení v závislosti od prítlačnej sily, stavu plochy krúžku a kefy a aj od režimu práce [1]. Približne ho môžeme určiť:

$$\Delta P_k = \Delta U_k \cdot I \quad (2.38)$$

ΔU_k ... Úbytok napätia na kefe [V],

I ... prúd prechádzajúci kefou [A],

2.5.2 Straty v železe statora

Straty v železe, tiež nazývané straty v magnetickom obvode vznikajú pôsobením striedavého magnetického poľa na magnetický obvod, a to v magnetickom materiály (dynamové plechy) v dôsledku neustáleho premagnetovania. Straty v železe závisia od veľkosti magnetickej indukcie a frekvencie. Celkové straty sú tvorené niekoľkými druhmi strát, ako straty hysterézne ΔP_h , straty vírivými prúdmi ΔP_v a straty prídavné ΔP_z . [3].

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_z \quad (2.39)$$

Pri magnetizácii sa časť energie premení na teplo (natáčanie domén). Veľkosť hysteréznych strát je závislá na veľkosti hysteréznej krivky a na čase jednej periódy U_s , počas ktorej dôjde k obehu hysteréznej krivky dokola. Straty vyjadríme [2][10]:

$$\Delta P_h = W \cdot f \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim \left(\frac{U_s}{f}\right)^2 \cdot f \sim \frac{U_s^2}{f} \quad (2.40)$$

Energia W [J] je potrebná na prebehnutie jednej periódy striedavého magnetovania (plocha uzavretá hysteréznu krivkou). Táto energia je priamo úmerná kvadrátu sýtenia, pri konštantnom sýtení môžeme povedať [2]:

$$\Delta P_h \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim f \quad (2.41)$$

Z toho plynie, že v prípade konštantného sýtenia budú hysterézne straty úmerné napájacej frekvencii. Ale v prípade, že bude konštantná amplitúda napájacieho napätia, budú hysterézne straty nepriamo úmerné napájacej frekvencii.

$$\Delta P_h \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim \frac{1}{f^2} \cdot f \sim \frac{1}{f} \quad (2.42)$$

Vírivé straty v asynchrónnych motoroch vznikajú v statorových a rotorových plechoch. Sú to vírivé prúdy, uzatvorené slučky s prúdom, ktoré sa tvoria na základe elektromagnetickej indukcie pri zmene magnetického poľa vo vodivom materiály. Na obmedzenie vírivých prúdov sa používajú lakované plechy alebo ferity [2] [10].

Vzťahy pre straty vírivými prúdmi [2]:

$$\Delta P_v = \frac{U_{ef}^2}{R_{ekv}} \sim U_{ef}^2 \quad (2.43)$$

U_{ef} ... Efektívna hodnota napätia [V]

R_{ekv} ... Ekvivalentný odpor popisujúci straty vírivými prúdmi [V]

Pri konštantnom sýtení bude amplitúda úmerná frekvenciám napájacieho napätia:

$$\Delta P_v \sim U_{ef}^2 \sim f^2 \quad (2.44)$$

Straty vírivými prúdmi pri konštantnom sýtení sú úmerné druhej mocnine frekvencie napájacieho napätia.

V prípade odbud'ovania motora zmenou frekvencie pri konštantnej amplitúde napájacieho napätia budú vírivé straty konštantné a úmerné druhej mocnine amplitúdy napätia.

$$\Delta P_v \sim U_{ef}^2 \sim \textit{konštantna} \quad (2.45)$$

Straty vírivými prúdmi pre odbudený motor sú konštantné, nezávislé na frekvencii.

3 POPIS A RENOVÁCIA HISTORCKÉHO MOTORA SVET

Asynchrónny elektromotor SVET bol vyrobený vo firme s názvom Elektromotor SVET ktorá vznikla v roku 1921 po reorganizácii firmy Srojírna Bratři Richterové založenej v roku 1909. Začala vyrábať práce a žehliace ručné stroje, neskôr dvojtaktné a štvortaktné benzínové motory a hobl'ovacie stroje. Po prvej svetovej vojne s rastúcou elektrifikáciou vyrobila Srojírna 200 elektromotorov. V roku 1926 začala firma Elektromotor SVET s výrobou spúšťačov, regulátorov, vypínačov a prepínačov k motorom. [9]



Následne v roku 1946 bola firma Elektromotor SVET znárodnená a začlenená do podniku Moravské elektrotechnické závody (MEZ) a riaditeľstvom v Olomouci. Začala s výrobou jednosmerných strojov, motorgenrátorov, jednokotvových meničov



napätia a frekvencie a benzino-elektrických agregátov, koncom päťdesiatych rokov vyrábala aj chladničkové

motory. V roku 1958 spojením viacerých podnikov MEZ vznikol národný podnik MEZ Brno. Po inovácií výrobného programu bola zavedená výroba polovodičových usmerňovačov, tyristorových regulátorov, rada trojfázových komutátorových derivačných motorov a špeciálne jednosmerné motory s malým zotrvačným momentom SFT a neskôr aj rady vysokomomentových motorov SHAT. Po privatizácii v roku 1994 získala podnik firma EL SLAV. A v roku 1996 vznikla firma EM Brno s.r.o. ktorá doteraz vyrába a rozvíja výrobu jednosmerných a striedavých elektromotorov, servomotorov, nevýbušných asynchrónnych motorov vrátane výroby motorov na objednávku. [9]



Obrázok 3.1: Štítok elektromotora SVET

Motor SVET je trojfázový asynchrónny motor s vinutým rotorom. Motor bol určený na poháňanie poľnohospodárskej techniky, napríklad mlynov. Motor bol uložený v prepravnom vozíku spolu s poistkami, nožovým vypínačom, odporovým spúšťačom a mechanizmom na navíjanie napájacieho kábla a na hriadeli bola osadené remenica pre dva priemery plochého koženého remeňa.

Podľa údaju o otáčkach rotora na štítku motora je jasné že sa jedná o štvorpólový motor. Ďalej z údaju o veľkosti napájacieho napätia vidíme že bol vyrobený ešte pre staršiu napájaciu sieť 220/380 V.



Obrázok 3.2: Historický pohon SVET pred renováciou

Pred meraním na motore bolo nutné ho dostať do prevádzky schopného stavu. Ako prvé bolo potrebné vytiahnuť všetky časti pohonu z prepravného vozíku a nakoniec motor. Na obrázkoch 3.3 a 3.4 vidno že po rokoch používania je pohon znečistený prachom a mazivom z klzných ložísk ktoré spolu vytvorili hrubú vrstvu, ktorú bolo treba odstrániť, ale na druhej strane mazivo poslúžilo ako dobrá ochrana proti vlhkosti a korózií. Prach a mazivo boli najskôr v čo najväčšej miere odstránené mechanicky (metličky, špachtľa) a následne vyfúkané tlakom vzduch na všetkých častiach pohonu. Potom nasledovalo odmasťovanie každej jednej časti prípravkom Arva. Po odmasťení bol na podvozku a skrini použitý prípravok Rezol na odstraňovanie hrdze, ktorý bol nanášaný niekoľkými vrstvami.

Pri čistení a odmasťovaní odporového spúšťača bol objavený prepálený odporový drôt, ktorý bol spojený mosadznou spojkou obrázok 3.7. Spodná azbestová časť pod odporovými vodičmi, ktorá bola tiež zanesená prachom a mazivom by mohla predstavovať hrozbu požiaru ak by bol motor veľmi pomaly rozbíhaný týmto spúšťačom mohlo vzniknúť na odporových drôtoch také teplo ktoré by zapálilo mazivo.



Obrázok 3.3: Elektromotor SVET pred renováciou



Obrázok 3.4: Elektromotor SVET pred renováciou



Obrázok 3.5: Odporový spúšťač motora svet



Obrázok 3.6: Azbestová doska zo spúšťača pred čistením a po čistení



Obrázok 3.7: Mosadzná spojka použitá na spojenie odporového drôtu v odporovom spúšťači



Obrázok 3.8: Nožový vypínač s poistkami pre renováciu

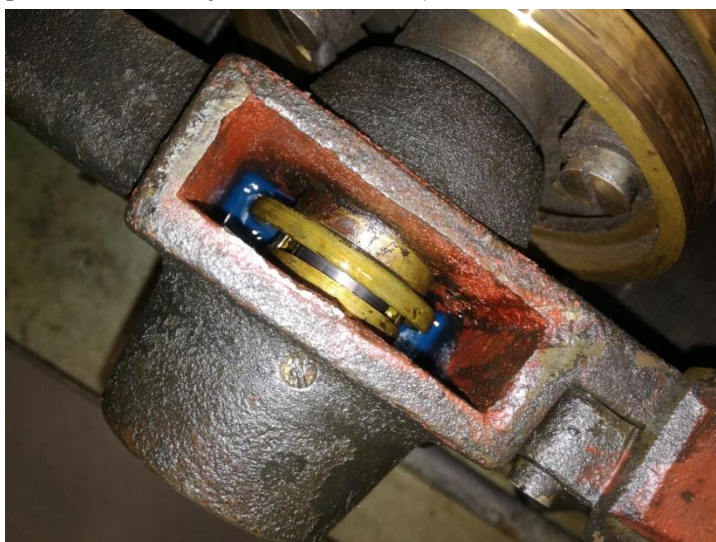


Obrázok 3.9: Pracovisko pri čistení a odmasťovaní



Obrázok 3.10: Stator elektromotora SVET pred čistením

Tak isto ako boli zanesené všetky časti pohonu ani motor nebol výnimkou. Po jeho rozobratí bola každá jeho časť vyčistená. Klzné ložiská boli jemným kartáčom prebrúsené a vymenené bolo aj mazivo.



Obrázok 3.11: Klzné ložisko motora SVET



Obrázok 3.12: Podvozok a skriňa pohonu SVET po renovácii

Po očistení, odmastení a po použití odhrdzovača bol povrch skrine a podvozku nastriekaný silikónovým olejom ako finálna úprava.



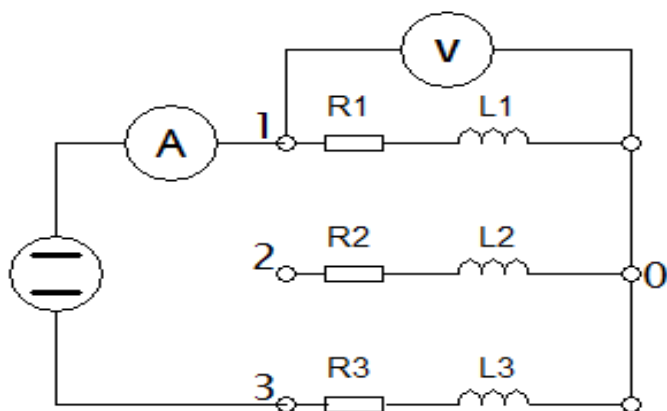
Obrázok 3.13: Elektromotor SVET po renovácii

4 ROZBOR PARAMETROV HISTORICKÉHO MOTORA SVET

4.1 Meranie odporu a výpočet strát statorového vinutia motora

Odpor rotorového vinutia bol zmeraný Ohmovou metódou, ak by sme odpor statora merali klasickým ohm metrom meranie by bolo nepresné.

Motor mal pri meraní teplotu okolia 22,5 °C, zapojenie meracích prístrojov vidieť z obrázku 4.1. Motor SVET má na svorkovnici vyvedené všetky konce vinutia, čo umožnilo zmerať napätie na vinutiach jednotlivo na následne dopočítať odpor každého vinutia.



Obrázok 4.1: Schéma zapojenia meracích prístrojov pri meraní odporu statorového vinutia

Z nameraných hodnôt bola vypočítaná priemerná hodnota odporu R_s , ktorý je potrebný na výpočet strát vo vinutí statora, ako aj menovitá hodnota fázového prúdu ktorá je uvedená na štítku motora.

$$R_s = \frac{I_{js}}{U} \quad (4.1)$$

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_s \cdot I_f^2 \quad (4.2)$$

ΔP_{j1} ... Straty vo vinutí statora [W]

R_s ... Odpor statorového vinutia jednej fáze [Ω]

I_f ... Fázový prúd (štítková hodnota) [A]

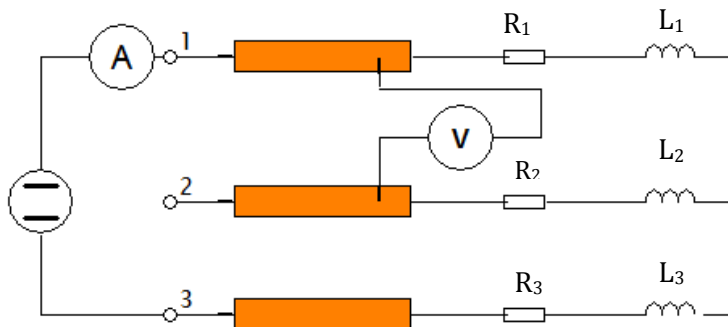
Tabuľka 4-1: Namerané a vypočítané hodnoty odporu pre meranie odporu statorového vinutia a strát vo vinutí

	I_{js} [A]	U [V]	R_s [Ω]	I_f [A]	ΔP_{j1} [W]
V_1	5	4,9	0,98	10,2	305,88
V_2	5	4,85	0,97	10,2	302,76
V_3	5	4,95	0,99	10,2	309,00
$R_{s,avg}$	5	4,9	0,98	10,2	305,88

4.2 Meranie odporu rotorového vinutia motora a prechodového odporu na krúžkoch rotora

Na meranie odporu rotorového vinutia bola použitá Ohmová metóda. Na meranie bol použitý zdroj ktorý nebol pripojený na rotorovú svorkovnicu ale priamo na rotorové krúžky aby bol z merania odporu vylúčený prechodový odpor medzi krúžkom a uhlíkom. Rotor motora je zapojený do hviezdy čiže nemôžeme merať napätie medzi začiatkom a koncom vinutia. Schéma merania je na obrázku 4.2.

Z obrázku vidíme že jedna svorka voltmetra bola pripojená na začiatok vinutia ktorým preteká prúd a druhá svorka voltmetra na začiatok vinutia ktorým nepreteká prúd čiže na ňom nevzniká úbytok napätia a voltmeter meria úbytok napätia na jednom vinutí.

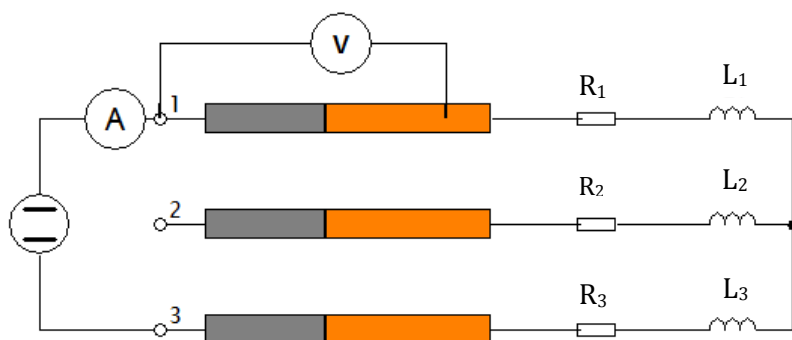


Obrázok 4.2: Schéma zapojenia meracích prístrojov pri meraní rotorového odporu motora

Tabuľka 4-2: Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie odporu rotorového vinutia

I	U_1	U_2	U_3	R_1	R_2	R_3
[A]	[V]	[V]	[V]	[m Ω]	[m Ω]	[m Ω]
10	3,20	3,21	3,16	320	321	316

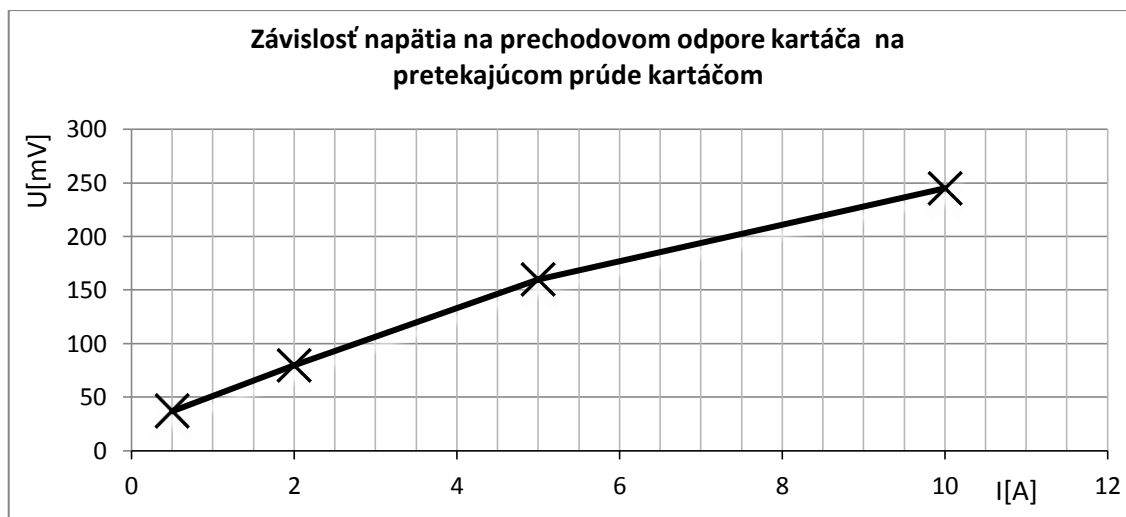
Na meranie prechodového odporu na krúžkoch rotora bola tak ako v predchádzajúcich meraniach použitá Ohmová metóda. Na rotorovú svorkovnicu bo pripojený jednosmerný zdroj a voltmetrom bolo merané napätie medzi svorkou a krúžkom.



Obrázok 4.3: Meranie prechodového odporu medzi uhlíkom a krúžkom rotora

Tabuľka 4-3: Namerané a vypočítané hodnoty pre meranie prechodového odporu na krúžkoch motora

I_{js}	U_1	U_3	R_1	R_3
[A]	[mV]	[mV]	[mΩ]	[mΩ]
10	245	224	24,5	22,4
5	160	160	32	32
2	80	85	40	42,5
0,5	37	40	74	80



Obrázok 4.4: Veľkosti napätia na prechodovom odpore kartáča v závislosti na pretekajúcom prúde

Z nameraných hodnôt boli vypočítané prechodové odpory kartáčov. Z vypočítaných hodnôt v tabuľke 4-3 je vidieť, že prechodový odpor s klesajúcim prúdom narastá. Tento jav je pre klzné kontakty typický.

4.3 Mechanické straty motora

Pri meraní mechanických strát bolo potrebné motor mechanicky spojiť s dynamometrom. Na spojenie dynamometra a motora sa používajú spojky. Keďže v laboratóriách nebola žiadna spojka, ktorá by mala rovnaký priemer ako má hriadeľ motora bolo potrebné vyrobiť redukciu.

Po spojení motoru a dynamometra bol motor odpojený od napájania a dynamometrom sme nastavili pracovné otáčky motora a odrátali z displeja moment ktorý dynamometer zmeral. Z týchto hodnôt boli vypočítané mechanické straty

Vzorco a príklad výpočtu pre nominálnu hodnotu otáčok:

$$\omega = \frac{N}{60} \cdot 2\pi = \frac{1420}{60} \cdot 2 * \pi = 148,63 \text{ rad/s} \quad (4.3)$$

$$P_2 = M \cdot \omega = 0,52 \cdot 148,63 = 84,72 \text{ W} \quad (4.4)$$

Tabuľka 4-4: Namerané hodnoty mechanických strát

N [ot/min]	1420	100	60
M [Nm]	0,57	0,31	0,31
P ₂ [W]	84,72	3,25	-

Tabuľka 4-5: Namerané hodnoty mechanických strát pri oddialených kartáčoch

N [ot/min]	1420	100
M [Nm]	0,48	0,21
P ₂ [W]	71,34	2,19

Mechanické straty sú spôsobené trením v klzných ložiskách, trením na krúžkoch a lopatkami ventilátora. Z nameraných hodnôt vidíme že aj trenie kartáčov o krúžky rotora má vplyv na veľkosť mechanických strát. V tomto prípade trenie predstavuje približne jednu osminu mechanických strát.

4.4 Straty v rotore

Jednotlivé parametre (rotorovú frekvenciu, moment, straty rotora) vypočítame z hodnôt uvedených na štítku motora, obrázok 3.1.

Menovitá rotorová frekvencia :

$$f_{rot} = f_n - \frac{n_n}{60} \cdot p = 50 - \frac{1420}{60} \cdot 2 = 2,66 \text{ Hz} \quad (4.5)$$

f_n ... Frekvencia napájacieho napätia [Hz]

n_n ... Menovité otáčky [ot/min]

p ... Počet pólových dvojíc [-]

Menovitý moment motora:

$$M = \frac{60 \cdot P_2}{2\pi \cdot n_n} = \frac{60 \cdot 4500}{2\pi \cdot 1420} = 30,26 \text{ [Nm]} \quad (4.6)$$

P_2 ... Menovitý výkon motora [W],

Menovité straty v rotore (rotor nakrátko):

$$\Delta P_{j2} = M \cdot \frac{\omega_{rot}}{p} = 30,26 \cdot \frac{2\pi \cdot 2,66}{2} = 252,87 \text{ W} \quad (4.7)$$

4.5 Straty v železe statora

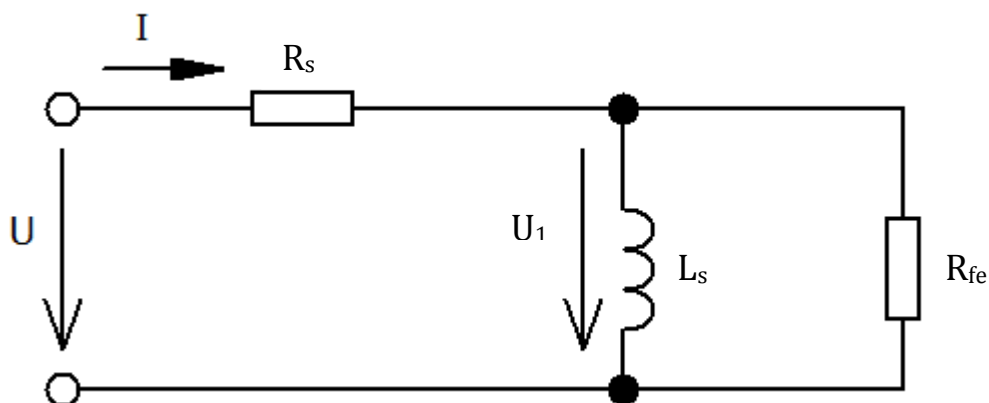
Straty v železe sme merali s motorom pripojeným na dynamometer, ktorým sme zabezpečili synchrónne otáčky rotora. Motor bol v stave naprázdno (rotorové vinutie rozpojené), rotorovým vinutím netečie žiadny prúd a preto v ňom nevznikajú žiadne straty. Odrátaním strát vo vinutí statora ktoré boli vyrátané pomocou vzorca (4.2) od príkonu dostaneme straty v železe (4.8). Ak by nebol rotor motora roztáčaný na synchrónne otáčky dynamometrom odrátavali by sme aj mechanické straty ktoré prebral na seba dynamometer.

$$\Delta P_{Fe} = P_1 - \Delta P_{j1} \quad (4.8)$$

Meracím prístrojom NORMA5000 (širokopásmový wattmeter) boli namerané hodnoty fázového napätia, prúdu a príkon motora. Meranie bolo vykonané v napätovom rozsahu 20 –236 V s krokom 20 V z týchto hodnôt boli vypočítané straty v železe a následne vynesená závislosť strát na napájacom napätí.

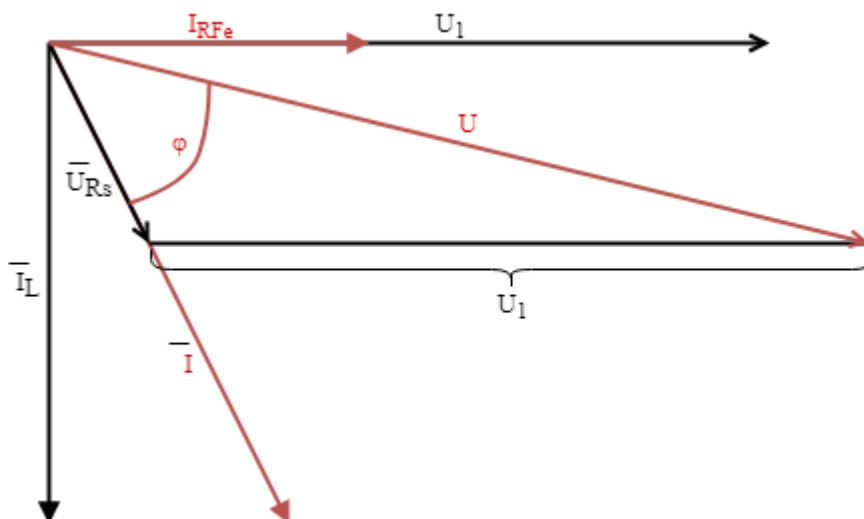


Obrázok 4.5: Meranie parametrov motora na dynamometri, potrebných pre výpočet strát v železe statora



Obrázok 4.6: Náhradná schéma motora pre jednu fázu (vinutie rotora rozpojené)

Výpočet odporu železa vychádza z náhradnej schémy motora obrázok (3.4), ktorá je zjednodušená pretože motor šiel bez záťaže a mal synchronne otáčky čiže sklz sa rovnal nule. Môžeme povedať že odpor rotora ($R_r=R/s$) bol nekonečný a teda ním netiekol žiadny prúd, ktorý by spôsobil straty. Odpor železa bol vyrátaný pomocou rovnice (4.12), v ktorej straty na železe poznáme a veľkosť napätia bola najskôr uvažovaná $U_1=U$ a v druhom prípade bolo vyrátané presné napätie U_1 .



Obrázok 4.7: Fázorový diagram náhradnej schémy motora

Tabuľka 4-6: Namerané hodnoty pri skúške naprázdno, rotorom nakrátko, s výpočtom strát a odporu železa statora s uvažovaním $U_1=U$

U [V]	I [A]	P [W]	ΔP_{j1} [W]	ΔP_{Fe} [W]	R_{Fe} [W]
20,00	0,330	1,653	0,320	1,333	900,337
41,18	0,633	6,074	1,178	4,896	1039,094
59,43	0,903	11,990	2,397	9,593	1104,567
80,02	1,202	27,240	4,248	22,992	835,481
100,74	1,523	38,210	6,819	31,391	969,897
120,48	1,825	50,660	9,792	40,868	1065,536
139,60	2,123	70,230	13,251	56,979	1026,070
160,50	2,583	92,820	19,615	73,205	1055,681
180,58	3,135	116,400	28,895	87,505	1117,963
200,14	3,881	155,300	44,283	111,017	1082,427
221,16	4,851	182,700	69,185	113,515	1292,647
236,23	5,835	273,300	100,099	173,201	966,586

Z fázorového diagramu obrázok 4.7 pomocou kosínusovej vety bolo vypočítané napätie U_1 .

$$\cos\varphi = \frac{P}{3 \cdot U \cdot I} \quad (4.9)$$

$$U_1 = \sqrt{U^2 \cdot U_{Rs}^2 - 2 \cdot U \cdot U_{Rs} \cdot \cos\varphi} \quad (4.10)$$

$$U_{Rs} = I \cdot R_s \quad (4.11)$$

$$\Delta P_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_1^2}{R_{Fe}} = 3 \cdot \frac{U^2}{R_{Fe}} \quad (4.12)$$

$$R_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_1^2}{\Delta P_{Fe}} = 3 \cdot \frac{U^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (4.13)$$

Tabuľka 4-7: Namerané hodnoty pri skúške naprázdno, rotorom nakrátko s výpočtom strát a odporu železa statora

U [V]	I [A]	P [W]	cosφ	U _{Rs} [V]	U ₁ [V]	ΔP _{j1} [W]	ΔP _{Fe} [W]	R _{Fe} [Ω]
20,00	0,330	1,653	0,083	0,323	19,976	0,320	1,333	898,142
41,18	0,633	6,074	0,078	0,620	41,136	1,178	4,896	1036,898
59,43	0,903	11,990	0,074	0,885	59,371	2,397	9,593	1102,362
80,02	1,202	27,240	0,094	1,178	79,917	4,248	22,992	833,340
100,74	1,523	38,210	0,083	1,493	100,627	6,819	31,391	967,724
120,48	1,825	50,660	0,077	1,789	120,356	9,792	40,868	1063,341
139,60	2,123	70,230	0,079	2,081	139,451	13,251	56,979	1023,882
160,50	2,583	92,820	0,075	2,531	160,331	19,615	73,205	1053,458
180,58	3,135	116,400	0,069	3,072	180,395	28,895	87,505	1115,680
200,14	3,881	155,300	0,067	3,803	199,923	44,283	111,017	1080,076
221,16	4,851	182,700	0,057	4,754	220,941	69,185	113,515	1290,090
236,23	5,835	273,300	0,066	5,718	235,921	100,099	173,201	964,060

Straty v železe historického motora pre menovité napájacie napätie sú 113,515 W. Môžeme konštatovať že straty v železe motora nie sú až také veľké. Ak by sme merali straty v železe na novodobom motore s rovnakým výkonom jeho straty by boli väčšie. Je to dané minimalizáciou použitého materiálu na jeho výrobu (menej závitov statorového vinutia = ušetrené náklady na výrobu). Preto treba zvoliť vyššie sýtenie. Historický motor má nižšiu hodnotu sýtenia, ale zato má viac závitov statorového vinutia a je aj váhovo a rozmerovo väčší.

4.6 Vlastná indukčnosť statorového vinutia

Meranie vlastnej indukčnosti bolo prevedené za pomoci dynamometra, motor bol zapojený v stave naprázdno. Skratovali rotor (rotor nakrátko) a dynamometrom sme rotor roztočili na synchrónne otáčky. Motor bol napájaný sieťovým napätím cez autotransformátor v rozmedzí hodnôt 20V – 236V s krokom 20V. Výpočet vlastnej indukčnosti bol vyjadrený z fázorového diagramu a náhradnej schémy motora nakrátko obrázok (3.4).

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4.14)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{3 \cdot U \cdot I} \quad (4.15)$$

$$U_{Rs} = I \cdot R_s \quad (4.16)$$

Z fázorového diagramu pomocou kosínusovej vety bolo vypočítané napätie U_1 .

$$U_1 = \sqrt{U^2 \cdot U_{Rs}^2 - 2 \cdot U \cdot U_{Rs} \cdot \cos\varphi} \quad (4.17)$$

$$Q = \frac{3 \cdot U_1^2}{2\pi \cdot f \cdot L_s} \quad (4.18)$$

$$L_s = \frac{3 \cdot U_1^2}{2\pi \cdot f \cdot Q} \quad (4.19)$$

Tabuľka 4-8: Namerané a vypočítané hodnoty vlastnej indukčnosti statora, prvý výpočet

U [V]	I [A]	P [W]	S [kVA]	Q [kVar]	cosφ	U _{Rs} [V]	U ₁ [V]	L _s [mH]
20,00	0,33	1,65	0,02	0,02	0,08	0,32	19,98	185,06
41,18	0,63	6,07	0,08	0,08	0,08	0,62	41,14	204,91
59,43	0,90	11,99	0,16	0,16	0,07	0,88	59,37	211,67
80,02	1,20	27,24	0,29	0,29	0,09	1,18	79,92	211,58
100,74	1,52	38,21	0,46	0,46	0,08	1,49	100,63	209,36
120,48	1,83	50,66	0,66	0,66	0,08	1,79	120,36	208,62
139,60	2,12	70,23	0,89	0,89	0,08	2,08	139,45	208,57
160,50	2,58	92,82	1,23	1,23	0,07	2,53	160,33	200,49
180,58	3,14	116,40	1,68	1,68	0,07	3,07	180,40	184,74
200,14	3,88	155,30	2,27	2,27	0,07	3,80	199,92	168,08
221,16	4,85	182,70	3,24	3,24	0,06	4,75	220,94	144,17
236,23	5,84	273,30	4,19	4,19	0,07	5,72	235,92	126,98

Pre porovnanie boli z nameraných hodnôt vypočítané vlastné indukčnosti ešte dvoma spôsobmi výpočtov. Prvým spôsobom bola z náhradnej schémy vyjadrená celková impedancia obvodu z ktorej následne vyjadrená a vypočítaná vlastná indukčnosť statorového vinutia.

$$\bar{Z} = R_s + \frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_s}{R_{Fe} + j\omega L_s} = \frac{R_s \cdot R_{Fe} + R_s \cdot j\omega L_s + R_{Fe} \cdot j\omega L_s}{R_{Fe} + j\omega L_s} \quad (4.20)$$

$$\bar{Z} = \frac{R_s \cdot R_{Fe} + j\omega L_s \cdot (R_s + R_{Fe})}{R_{Fe} + j\omega L_s} \quad (4.21)$$

$$|\bar{Z}| = \frac{\sqrt{(R_s \cdot R_{Fe})^2 + (\omega L_s \cdot (R_s + R_{Fe}))^2}}{\sqrt{(R_{Fe} + \omega L_s)^2}} \quad (4.22)$$

$$|\bar{Z}|^2 \cdot (R_{Fe} + \omega L_s)^2 = (R_s \cdot R_{Fe})^2 + (\omega L_s \cdot (R_s + R_{Fe}))^2 \quad (4.23)$$

$$|\bar{Z}|^2 \cdot R_{Fe}^2 + |\bar{Z}|^2 \cdot \omega^2 L_s^2 = (R_s \cdot R_{Fe})^2 + \omega^2 L_s^2 \cdot (R_s + R_{Fe})^2 \quad (4.24)$$

$$|\bar{Z}|^2 \cdot \omega^2 L_s^2 - \omega^2 L_s^2 \cdot (R_s + R_{Fe})^2 = (R_s \cdot R_{Fe})^2 - |\bar{Z}|^2 \cdot R_{Fe}^2 \quad (4.25)$$

$$\omega^2 L_s^2 \cdot (|\bar{Z}|^2 - (R_s + R_{Fe})^2) = (R_s \cdot R_{Fe})^2 - |\bar{Z}|^2 \cdot R_{Fe}^2 \quad (4.26)$$

$$L_s^2 = \frac{(R_s \cdot R_{Fe})^2 - |\bar{Z}|^2 \cdot R_{Fe}^2}{\omega^2 \cdot (|\bar{Z}|^2 - (R_s + R_{Fe})^2)} \quad (4.27)$$

Doposiaľ boli zo vzorcom (4.20) vykonané matematické operácie a v nasledujúcom kroku za celkovú impedanciu $|\bar{Z}|$ bol dosadený podiel napájacieho napätia a vstupného prúdu $\frac{U}{I}$.

$$L_s = \sqrt{\frac{(R_s \cdot R_{Fe})^2 - \left(\frac{U}{I}\right)^2 \cdot R_{Fe}^2}{(2\pi f)^2 \cdot \left(\left(\frac{U}{I}\right)^2 - (R_s + R_{Fe})^2\right)}} \quad (4.28)$$

Tabuľka 4-9: Namerané a vypočítané hodnoty vlastnej indukčnosti statora, druhý výpočet

U [V]	I [A]	P [W]	S [kVA]	Q [kVar]	ΔP_j [W]	ΔP_{Fe} [W]	R_{Fe} [W]	L_s [mH]
20,00	0,33	1,65	0,02	0,02	0,32	1,33	900,34	193,24
41,18	0,63	6,07	0,08	0,08	1,18	4,90	1039,09	207,39
59,43	0,90	11,99	0,16	0,16	2,40	9,59	1104,57	209,78
80,02	1,20	27,24	0,29	0,29	4,25	22,99	835,48	212,44
100,74	1,52	38,21	0,46	0,46	6,82	31,39	969,90	210,93
120,48	1,83	50,66	0,66	0,66	9,79	40,87	1065,54	210,45
139,60	2,12	70,23	0,89	0,89	13,25	56,98	1026,07	209,64
160,50	2,58	92,82	1,23	1,23	19,62	73,20	1055,68	198,05
180,58	3,14	116,40	1,68	1,68	28,89	87,51	1117,96	183,53
200,14	3,88	155,30	2,27	2,27	44,28	111,02	1082,43	164,27
221,16	4,85	182,70	3,24	3,24	69,18	113,52	1292,65	145,17
236,23	5,84	273,30	4,19	4,19	100,10	173,20	966,59	128,92

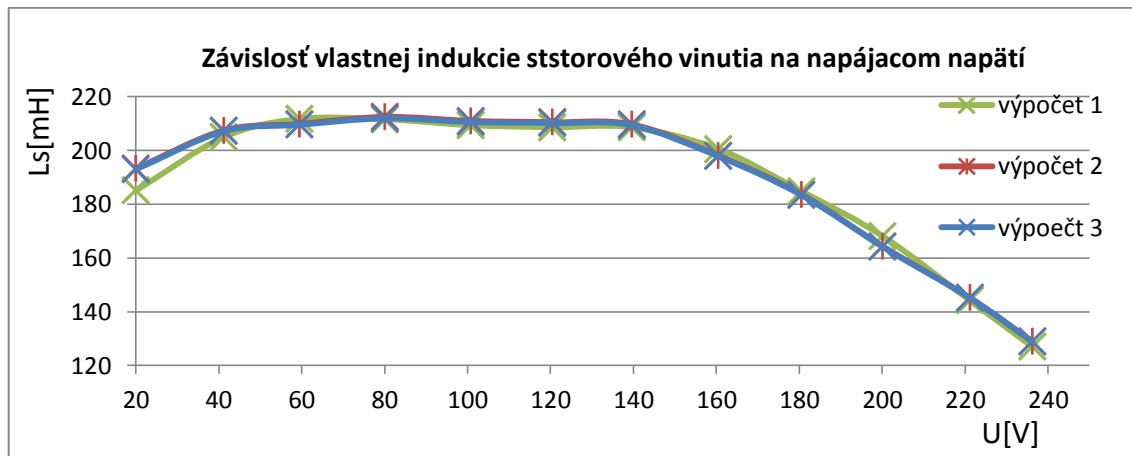
Posledným a najjednoduchším spôsobom výpočtu vlastnej indukcie statorového vinutia bolo použitím vzorca (4.29) v ktorom výpočet vlastnej indukcie využívame základne namerané napájacie hodnoty motora.

Vzorec a príklad výpočtu pre hodnotu napätia 59,43 V:

$$L_s = \frac{U}{I \cdot 2\pi \cdot f} = \frac{59,43}{0,903 \cdot 2\pi \cdot 50} = 209,49 \text{ mH} \quad (4.29)$$

Tabuľka 4-10: Namerané a vypočítané hodnoty vlastnej indukčnosti statora, tretí výpočet

Uf[V]	If[A]	Ls[mH]
20,00	0,33	192,92
41,18	0,63	207,08
59,43	0,90	209,49
80,02	1,20	211,91
100,74	1,52	210,55
120,48	1,83	210,14
139,60	2,12	209,31
160,50	2,58	197,79
180,58	3,14	183,35
200,14	3,88	164,15
221,16	4,85	145,12
236,23	5,84	128,87



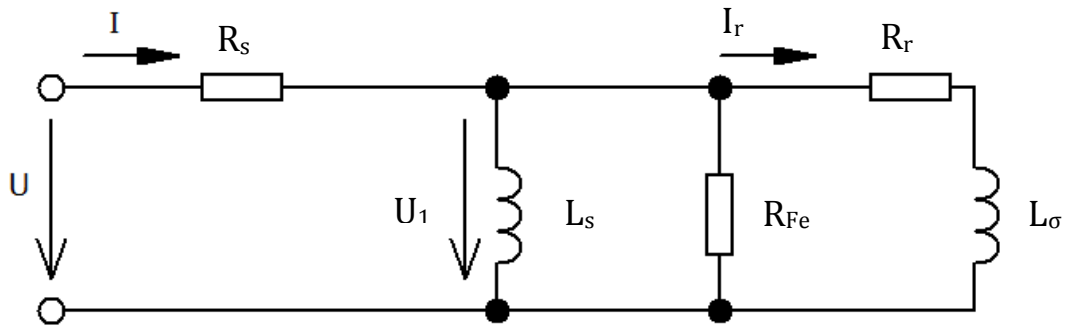
Obrázok 4.8: Závislosť vlastnej indukcie statorového vinutia na napájacom napätí a porovnanie troch rôznych výpočtov

Z obrázku 4.8 vidím že od napätia 140 V pri (frekvencii 50 Hz) začína indukčnosť klesať pretože dochádza k presycovaniu magnetického obvodu.

V praxi pri výpočtoch vlastnej magnetickej indukcie môžeme bez problémov používať rovnicu (4.29) pretože ako je vidieť obrázku 4.6, vypočítané hodnoty vlastnej magnetickej indukcie sa skoro vôbec nelíšia, pričom náročnosť prvých dvoch výpočtov je väčšia ako u posledného.

4.7 Meranie rozptylovej indukčnosti a rotorového odporu

Meranie bolo vykonané dynamometrom, ktorým bola zabrzdená hriadeľ motora. Motor mal skratované rotorové svorky a bol napájaný 40 V a 20 V. Širokopásmovým wattmetrom boli zmerané hodnoty prúdu, činný, zdánlivý a jalový príkon. Pre identifikáciu parametrov stroje používame gamma-článok, kde rozptyl je reprezentovaný jednou rozptylovou indukčnosťou (rozptylová indukčnosť bola rotoru prepočítaná na stator).



Obrázok 4.9: Náhradná schéma motora pre meranie rozptylovej indukčnosti

Pre výpočet napätia U_1 bolo potrebné najskôr vypočítať fázový posun napätia a prúdu, a následne ho dosadiť do rovnice (4.33).

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4.30)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{3 \cdot U \cdot I} \quad (4.31)$$

$$U_{Rs} = I \cdot R_s \quad (4.32)$$

Z fázorového diagramu obrázok 4.6 pomocou kosínusovej vety bolo vypočítané napätie U_1 .

$$U_1 = \sqrt{U^2 \cdot U_{Rs}^2 - 2 \cdot U \cdot U_{Rs} \cdot \cos\varphi} \quad (4.33)$$

$$P_{Rr} = \frac{P_1}{3} - R_s \cdot I^2 - \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (4.34)$$

$$Q_{L\sigma} = \frac{Q}{3} - \frac{U_1^2}{2\pi \cdot f \cdot L_s} \quad (4.35)$$

$$S_R = \sqrt{P_{Rr}^2 + Q_{L\sigma}^2} \quad (4.36)$$

$$S_R = I_R \cdot U_R \Rightarrow I_R = \frac{S_R}{U_R} \quad (4.37)$$

$$Q_{L\sigma} = 2\pi \cdot f \cdot I_R^2 \cdot L_\sigma \quad (4.38)$$

$$L_\sigma = \frac{Q_{L\sigma}}{2\pi \cdot f \cdot I_R^2} \quad (4.39)$$

$$R_r = \frac{P_{Rr}}{I_R^2} \quad (4.40)$$

Tabuľka 4-11: Namerané hodnoty pre výpočet rozptylovej indukčnosti

U [V]	I [A]	P [W]	S [VA]	Q [Var]
40,62	7,06	287,18	860,40	860,40
20,39	3,71	80,96	226,20	211,00

Tabuľka 4-12: Vypočítané hodnoty potrebné k výpočtu rozptylovej indukčnosti

cos(φ)	U _{RS} [V]	R _{Fe} [Ω]	U ₁ [V]	P _{Rr} [W]	Q _{Lσ} [Var]	S _R [VA]	I _R [A]	L _σ [mH]	R _r [Ω]
0,33	6,92	1036,90	38,86	45,40	261,27	265,18	6,82	17,87	0,97
0,36	3,64	898,14	19,39	13,35	63,98	65,35	3,37	17,94	1,18

4.8 Výpočet účinníku a účinnosti motora

Účinník pre motor bol vypočítaný vzorcom (4.43). Príkion motora bol vypočítaný ako súčet výkonu motora P₂, všetkých vypočítaných a nameraných strát ΔP_{cel}.

$$\Delta P_{cel} = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} \quad (4.41)$$

$$\Delta P_{cel} = 305,8776 + 252,87 + 84,72 + 113,515 = 756,98 \text{ W} \quad (4.42)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P_1}{3 \cdot U_f \cdot I_f} = \frac{P_2 + \Delta P_{cel}}{3 \cdot U_f \cdot I_f} \quad (4.43)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{4500 + 756,98}{3 \cdot 220 \cdot 10,2} = 0,78 \quad (4.44)$$

Účinnosť pri menovitom chode bol a spočítaná ako podiel menovitého výkonu a príkonu.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{cel}} \cdot 100 \quad (4.45)$$

$$\eta = \frac{4500}{4500 + 756,98} \cdot 100 = 85,6 \% \quad (4.46)$$

Tabuľka 4-13: Účinník a účinnosť pri menovitej záťaži

ΔP_{cel} [W]	$\cos(\varphi)$ [-]	η [%]
756,98	0,78	85,6

4.9 Meranie závislosti účinnosti na výkone a na napájacom napätí

Meranie bolo vykonané pomocou dynamometra a širokopásmového wattmetru. Motor bol zaťažovaný momentmi 5-30 Nm tak, aby neprišlo k zvratu motora pri postupnom zaťažovaní. Boli merané otáčky a príkon motora z týchto hodnôt bola vypočítaná účinnosť.

Vzorcami (4.3)a(4.4) bola vypočítaná uhlová rýchlosť hriadele a výkon na hriadeli. Vzorcom (4.47)vypočítaná účinnosť motora, príklad výpočtu pre menovité napájacie napätie a moment zaťaženia 25,3 Nm:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{3831}{4633} \cdot 100 = 82,68 \% \quad (4.47)$$

Tabuľka 4-14: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkon pre napätie 235 V

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P_1 [kW]	P_2 [kW]	ω [rad/s]	η [%]
5,3	235	1487	1,2763	0,825	155,72	64,66
10,3	235	1480	2,1091	1,596	154,99	75,69
15,3	235	1471	2,9054	2,357	154,04	81,12
20,3	235	1463	3,7519	3,110	153,21	82,89
25,3	235	1453	4,6252	3,850	152,16	83,23
30,3	235	1444	5,5141	4,582	151,22	83,09

Tabuľka 4-15: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 220 V

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
5,3	220	1485	1,249	0,824	155,51	66,01
10,3	220	1476	2,058	1,592	154,57	77,37
15,3	220	1467	2,892	2,350	153,62	81,29
20,3	220	1457	3,751	3,097	152,58	82,57
25,3	220	1446	4,633	3,831	151,42	82,68
30,3	220	1435	5,517	4,553	150,27	82,53

Tabuľka 4-16: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 200V

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
5,3	200	1489	1,176	0,826	155,93	70,25
10,3	200	1472	2,017	1,588	154,15	78,74
15,3	200	1460	2,870	2,339	152,89	81,49
20,3	200	1446	3,762	3,074	151,42	81,71
25,3	200	1431	4,668	3,791	149,85	81,22
30,3	200	1412	5,636	4,480	147,86	79,50

Tabuľka 4-17: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 180 V

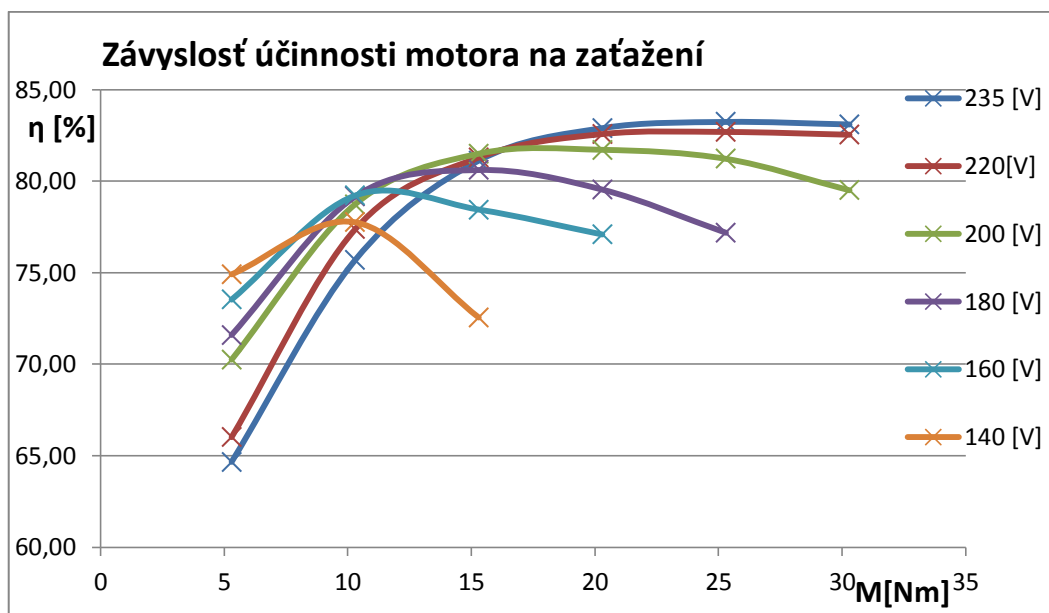
M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
5,3	180	1480	1,147	0,821	154,99	71,60
10,3	180	1465	1,996	1,580	153,41	79,15
15,3	180	1447	2,876	2,318	151,53	80,60
20,3	180	1427	3,814	3,034	149,44	79,53
25,3	180	1403	4,816	3,717	146,92	77,18

Tabuľka 4-18: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 160 V

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
5,3	160	1475	1,113	0,819	154,46	73,53
10,3	160	1454	1,980	1,568	152,26	79,21
15,3	160	1429	2,919	2,290	149,64	78,44
20,3	160	1439	3,969	3,059	150,69	77,08

Tabuľka 4-19: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na výkone pre napätie 140 V

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
5,3	140	1468	1,088	0,815	153,73	74,91
10,3	140	1439	1,996	1,552	150,69	77,75
15,3	140	1385	3,059	2,219	145,04	72,55



Obrázok 4.10: Závislosť účinnosti motora na zaťažovacom momente pre rôzne veľkosti napájacieho napätia

Tabuľka 4-20: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 5,3 Nm

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
5,3	235	1487	1,28	0,83	155,72	64,66
5,3	220	1485	1,25	0,82	155,51	66,01
5,3	200	1489	1,18	0,83	155,93	70,25
5,3	180	1480	1,15	0,82	154,99	71,60
5,3	160	1475	1,11	0,82	154,46	73,53
5,3	140	1468	1,09	0,81	153,73	74,91

Tabuľka 4-21: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 10,3 Nm

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
10,3	235	1480	2,11	1,60	154,99	75,69
10,3	220	1476	2,06	1,59	154,57	77,37
10,3	200	1472	2,02	1,59	154,15	78,74
10,3	180	1465	2,00	1,58	153,41	79,15
10,3	160	1454	1,98	1,57	152,26	79,21
10,3	140	1439	2,00	1,55	150,69	77,75

Tabuľka 4-22: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 15,3 Nm

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
15,3	235	1471	2,91	2,36	154,04	81,12
15,3	220	1467	2,89	2,35	153,62	81,29
15,3	200	1460	2,87	2,34	152,89	81,49
15,3	180	1447	2,88	2,32	151,53	80,60
15,3	160	1429	2,92	2,29	149,64	78,44
15,3	140	1385	3,06	2,22	145,04	72,55

Tabuľka 4-23: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 20,3 Nm

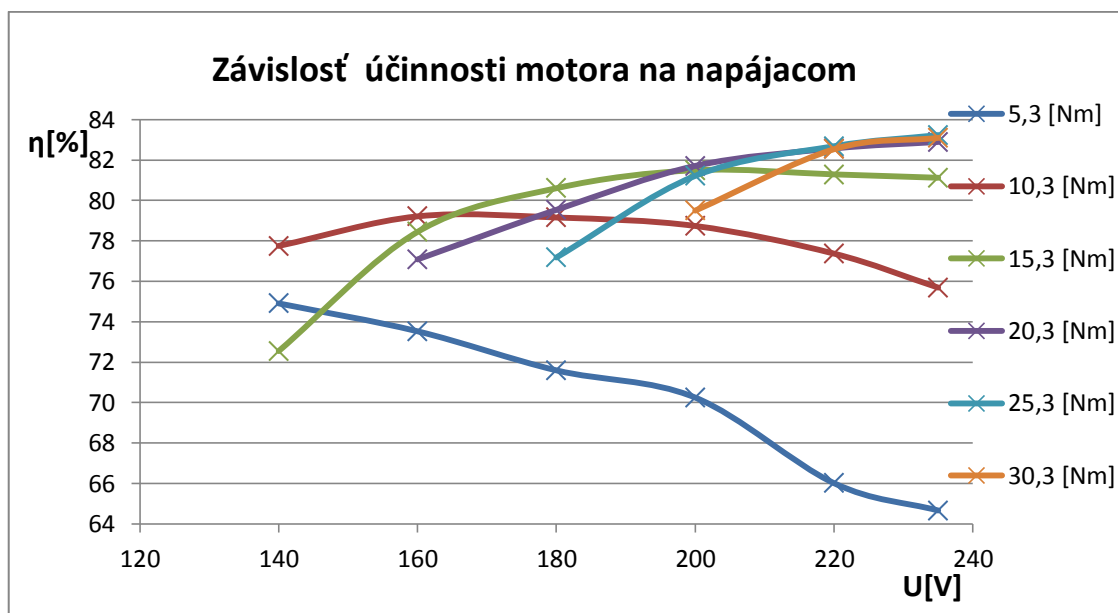
M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
20,3	235	1463	3,75	3,11	153,21	82,89
20,3	220	1457	3,75	3,10	152,58	82,57
20,3	200	1446	3,76	3,07	151,42	81,71
20,3	180	1427	3,81	3,03	149,44	79,53
20,3	160	1439	3,97	3,06	150,69	77,08

konštantnom zaťažení 25,3 Nm

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
25,3	235	1453	4,63	3,85	152,16	83,23
25,3	220	1446	4,633	3,831	151,42	82,68
25,3	200	1431	4,67	3,79	149,85	81,22
25,3	180	1403	4,82	3,72	146,92	77,18

Tabuľka 4-24: Namerané hodnoty závislosti účinnosti na napájacom napätí a konštantnom zaťažení 30,3 Nm

M [Nm]	U [V]	n [ot/min-]	P ₁ [kW]	P ₂ [kW]	ω [rad/s]	η [%]
30,3	235	1444	5,51	4,58	151,22	83,09
30,3	220	1435	5,52	4,55	150,27	82,53
30,3	200	1412	5,64	4,48	147,86	79,50



Obrázok 4.11: Závislosť účinnosti na napájacom napätí pre rôzne veľkosti zaťažovacieho momentu

Z grafu (obrázok 4.1) vidíme, že pri zvyšovaní amplitúdy napájacieho napätia a konštantnej frekvencie pre hodnoty 20 Nm-30 Nm účinnosť stúpa. Je to dané tým že zvyšovaním amplitúdy sa zvyšuje aj sýtenie magnetického obvodu, tým sa zvyšujú straty v železe a magnetizačný prúd. Pričom sa straty v rotore zvyšovaním amplitúdy napätia znižujú, pretože zvyšovaním sýtenia klesne rotorový prúd na hodnotu postačujúcu k udržaniu daného momentu. V rotore sa zmenší indukované napätie a klesne rotorová frekvencia.

4.10 Zoznam meracích prístrojov

Voltmeter METRA 101114
 Ampérmeter METRA 1239453
 Ampérmeter METRA 462019
 Multimeter Agilent U1252A
 Jednosmerný zdroj STATRON
 Široko pásmový wattmeter NORMA 5000
 Dynamometer UVES 131559

5 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo zistenie parametrov indukčného trojfázového motora s krúžkovou kotvou.

V prvej časti práce popisujem princíp činnosti asynchrónneho motora. Popis parametrov je doplnený príslušnými vzorcami potrebnými k ich výpočtu.

Historický elektrický pohon sa v minulosti používal ako pohonný mechanizmus pre rôzne zariadenia používané v hospodárstve. Napríklad to mohli byť mechanizmy ako pily, mláťačky obilia, mlyny obilia. Takéto pohony s rozvojom elektrifikácie nahrádzali dovtedy používané spaľovacie agregáty. Konštrukčné prevedenie na kolesovom podvozku umožňovalo ľahký presun k jednotlivým strojom v rámci hospodárstva. Pre účely tejto práce bol vybraný historický pohon od firmy SVET, presný rok výroby nebol zistený, ale predpokladať môžeme rok výroby okolo 1930. Podľa štítkových údajov sa jedná o asynchrónny motor s vinutou kotvou o výkone 4,5 kW.

Po zdokumentovaní pôvodného stavu nasledovala demontáž a očistenie všetkých častí pohonu. Následne boli všetky časti pohonu vrátené na pôvodné miesto.

Vo štvrtej kapitole je popísané meranie jednotlivých parametrov motora. Odpor statorového a rotorového vinutia bol určený pomocou Ohmovej metódy. Z nameraných hodnôt boli vypočítané hodnoty odporu vinutia, statorové vinutie motora malo hodnotu $0,98 \Omega$ a rotorové vinutie malo priemernú hodnotu troch fáz $319 \text{ m}\Omega$. Bola zmeraná aj hodnota prechodového odporu medzi kartáčmi a krúžkami rotoru. Z nameraných hodnôt je vidieť ako s klesajúcou hodnotou prúdu stúpa prechodový odpor.

Hodnoty rotorovej frekvencie, menovitého momentu a rotorových strát boli vypočítané zo štítkových hodnôt. Rotorová frekvencia má hodnotu $2,66 \text{ Hz}$, menovitý moment $30,26 \text{ Nm}$ a veľkosť strát rotora je $252,87 \text{ W}$. Hodnota mechanických strát bola meraná pomocou dynamometra. Z vypočítanej hodnoty statorového odporu a hodnoty prúdu zo štítku boli vypočítané straty v statore, ktoré mali hodnotu $305,87 \text{ W}$. Mechanické straty majú hodnotu $84,72 \text{ W}$. Mechanické straty spôsobuje trenie klzných ložísk a ventilačné straty. Ako posledné boli vypočítané straty v železe. Ich hodnota bola vypočítaná ako rozdiel príkonu a strát statorového vinutia. Motor pritom bežal v synchronných otáčkach, ktoré boli udržiavané dynamometrom a rotor bol naprázdno. Zo strát v železe bol vypočítaný odpor, ktorý predstavuje tieto straty. Pre menovité hodnoty je jeho veľkosť 1290Ω .

Pomocou dynamometra boli zmerané potrebné hodnoty na výpočet vlastnej indukčnosti statorového vinutia a rozptylovej indukčnosti rotora. Hodnota vlastnej indukčnosti statora bola pri menovitom napätí 144,169 mH. Výpočet bol overený ešte dvakrát. Porovnaním hodnôt výpočtov (2. výpočet $L_S = 145,173$ mH a 3. výpočet $L_S = 145,193$) možno vidieť, že aj najjednoduchším výpočtom (3. výpočtom) sme získali hodnotu, ktorá sa takmer nelíši od ostatných dvoch výpočtov. Závislosť magnetizačnej indukčnosti bola vynesena do grafu (obrázok 4.8). Pre meranie hodnôt potrebných na výpočet rozptylovej indukčnosti a rotorového odporu bola hriadel' motora zabrzdená dynamometrom, rotor skratovaný a na stator bolo privedené napätie 20 a 40 V. Hodnota rozptylovej indukčnosti pre napätie 40 V je 17,87 mH a hodnota vypočítaného rotorového odporu je 0,97 Ω (hodnoty prepočítané na stator).

Zo štítkového údaju o výkone a vypočítaných menovitých strát bola vypočítaná hodnota účinnosti a účinníku. Motor má celkové straty 756,98 W, účinník 0,78 a účinnosť 85,6 %.

Závislosť účinnosti od zaťaženia a závislosť účinnosti od napájacieho napätia boli zmerané pomocou dynamometra. Z obrázku 4.10 vidíme, že pre nominálne napájacie napätie 220 V, ale aj pre vyššie napätie, 235 V, je účinnosť najlepšia pre zaťaženie 20 -30 Nm. Z toho možno vyvodit', že by tento motor bolo najlepšie používať ako pohon pre mlyn obilia, motor by bol stále zaťažený. Z obrázku 4.11 vidíme že motor pri malom zaťažení 5,3 Nm a nominálnom napájacom napätí má malú účinnosť.

LITERATÚRA

- [1] ONDRÚŠEK, Čestmír. Skripta :*Elektrické stroje*
- [2] VOREL, PH.D., Doc. Ing. Pavel. *Konzultácie na tému asynchrónny motor*. Brno, 2018.
- [3] FRK, Martin, Zdenka ROZSÍVALOVÁ, Petr KŘIVÍK a Jiří VANĚK. *Materiály a technická dokumentace: Laboratorní cvičení*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [4] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 9788021440036.
- [5] HRABOVCOVÁ, Valéria. *Elektrické stroje - Teória a príklady*. EDIS, 2015. ISBN 9788055409986.
- [6] HRUŠKOVIČ, Ladislav. *ELEKTRICKÉ STROJE 1*. 6. vydanie. Edičné stredisko SVŠT v Bratislave, 1988.
- [7] MICHALÍK, Ján a Jozef BUDAY. *Elektrické stroje*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2006. ISBN 8080705682.
- [8] HALFAR, Tomáš. *ZLEPŠENÍ ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ MALÉHO VÝKONU*. Brno, 2013. Diplomová práce. FEKT VUT Brno. Vedoucí práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [9] HISTORIE FIRMI. *EM Brno s.r.o.* [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: http://www.embrno.cz/cs/o_spolecnosti/historie_firmy/
- [10] Magnetizmus. *Klasici* [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.klasici.sk/node/193#2>
- [11] Nízkonapěťový standardní motor Simotics 1LE1. In MM průmyslové spektrum [online]. [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky_na-veletrhu-amper-2013.html

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

Φ_s	Okamžitá hodnota magnetického indukčného toku	[Wb]
N	Počet závitov statorovej cievky	[-]
u_s	Okamžitá hodnota napätia na statorovej cievke	[V]
B_s	Sýtenie magnetického obvodu	[T]
S_{Fe}	Plocha ktorou prechádza magnetický indukčný tok	[m ²]
U_s	Amplitúda napájacieho napätia	[V]
T	Periódna napájacieho napätia	[s]
f	Frekvencia napájacieho napätia	[Hz]
U_s	Amplitúda napájacieho napätia	[V]
L	Indukčnosť cievky	[H]
Ψ_{max}	Maximálna hodnota praženého magnetického toku	[Wb]
μ_r	Relatívna permeabilita	[-]
μ_0	Permeabilita vákua	[H/m]
Λ	Magnetická vodivosť	[H]
l_m	Stredná dĺžka dráhy magnetického toku	[m]
R_m	Magnetický odpor	[H ⁻¹]
R_{Fe}	Magnetický odpor železného jadra	[H ⁻¹]
R_v	Magnetický odpor vzduchovej medzery	[H ⁻¹]
f_{rot}	Rotorová frekvencia	[Hz]
n	Mechanické otáčky rotora	[min ⁻¹]
p	Počet pólových dvojíc motora	[-]
n_s	Otáčky točivého magnetického poľa statora	[min ⁻¹]
s	Sklz	[%]
$\Phi_{s,max}$	Maximálny magnetický tok statora	[Wb]
$\Phi_{tot}(t)$	Magnetický tok rotora	[Wb]
U_{rot}	Rotorové napätie	[V]
R_{rot}	Rotorový odpor	[Ω]
I_{rot}	Rotorový prúd	[A]
F	Sila na vodič v magnetickom poli, ktorým tečie prúd	[N]
l	Dĺžka vodiča	[m]
B	Magnetická indukcia poľa	[T]
r	Polomer rotora	[m]
M	Moment vytvorený silou F vo vzdialenosti r od osy otáčania	[N.m]
L_σ	Rozptyľová indukčnosť	[H]
P_1	Príkon motora	[W]
P_2	Výkon na hriadele rotora	[W]
ω	Uhlová frekvencia hriadele	[rad/s]
ΔP_{j1}	Jouleove straty vo vinutí statoru	[W]
ΔP_{Fe}	Straty v železe	[W]
ΔP_{j2}	Jouleove straty rotora	[W]
ΔP_{mech}	Mechanické straty	[W]

ΔP_d	Dodatočné straty	[W]
R_s	Odpor fázy statorového vinutia	[Ω]
I_f	Fázový prúd	[A]
m	Počet fáz	[-]
$R_{spúšťača}$	Odpor rotorového spúšťača	[Ω]
ΔP_k	Straty na klznom kontakte	[W]
ΔP_h	Hysterézne straty	[W]
ΔP_v	Straty vírivými prúdmi	[W]
ΔP_z	Prídavné straty	[W]
U_{fe}	Efektívna hodnota napätia	[V]
R_{ekv}	Ekvivalentný odpor popisujúci straty vírivými prúdmi	[Ω]
SVET	Špeciálna výroba elektromotorov trojfázových	
MEZ	Moravské elektrotechnické závody	
ω_{rot}	Uhlová frekvencia rotoru	[rad/s]
U_{Rs}	Napätie na statorovom odpore	[V]
R_{Fe}	Odpor charakterizujúci straty v železe	[Ω]
P	Činný výkon	[W]
Q	Jalová zložka príkonu motoru	[VAr]
S	Zdanlivý príkon	[VA]
L_S	Indukčnosť statorového vinutia	[mH]
P_{Rr}	Činný výkon na rotorovom odpore	[W]
$Q_{L\sigma}$	Jalový výkon rozptylovej indukčnosti	[VAr]
S_R	Zdanlivý výkon na rotore	[VA]
R_r	Rotorový odpor	[Ω]
I_R	Rotorový prúd	[A]
η	Účinnosť	[%]
$\cos(\varphi)$	Účinník	[-]