

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

ZLEPŠENÍ ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ MALÉHO VÝKONU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

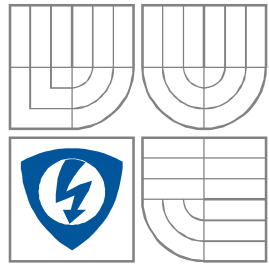
Bc. Roman Kuda

BRNO 2011



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

ZLEPŠENÍ ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ MALÉHO VÝKONU

IMPROVEMENT POWER PARAMETER OF SMALL INDUCTION MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

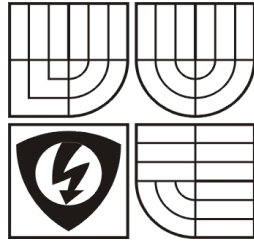
Bc. Roman Kuda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Roman Kuda

Ročník: 2

ID: 72945

Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Zlepšení energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zhodnoťte vybrané typy malých asynchronních motorků.
2. Analyzujte jeden konkrétní typ stroje.
3. Navrhněte a možnosti zvýšení účinnosti včetně návrhu funkčního vzorku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 23.05.2011

Vedoucí projektu: prof. Ing. Vítězslav Hájek. CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové 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 části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá asynchronními motory všeobecně. Práce pojednává o typech a rozdělení jednotlivých motorů, rozdílech trojfázových strojů od strojů jednofázových a o jejich účinnosti. V jedné z kapitol je popsán konkrétní typ motoru se všemi parametry od výrobce. Tento motor je kompletně analyzován a je na něm provedeno měření. Dále se práce zabývá rozdělením, výpočtem ztrát a následnými možnostmi zvyšování účinnosti asynchronního motoru. V poslední kapitole je proveden návrh jednofázového motoru, vycházejícího z vyráběného motoru.

Abstract

This master's thesis treats of all asynchronous motor. The project is about type and distribution motors, about differences between three-phase and single-phase machines and efficiency. In one of the chapters describes a particular type of engine with all the parameters from the manufacturer. This engine is completely analyzed and it is measured in detail. Then the project deals with the division, the calculation of losses and subsequent possibilities to increase the efficiency of induction motor. In the last chapter is calculation of single-phase motors, based on the engine produced.

Klíčová slova

Asynchronní motor; rotor; stator; účinnost; vinutí; ztráty.

Keywords

Asynchronous motor; rotor; stator; efficiency; winding; losses.

Bibliografická citace

KUDA, R. *Zlepšení energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 62 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Zlepšení energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

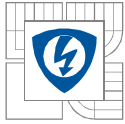
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce prof. Ing. Vítězslavu Hájkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne

Podpis autora

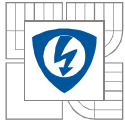


OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD.....	14
2 ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	15
2.1 PROVEDENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	15
2.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	16
2.3 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA	17
2.4 ROZDĚLENÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	17
2.5 ASYNCHRONNÍ MOTORY TROJFÁZOVÉ.....	18
2.5.1 PRINCIP ČINNOSTI	18
2.6 JEDNOFÁZOVÉ ASYNCHRONNÍ MOTORY.....	18
2.6.1 SPOUŠTĚNÍ JEDNOFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	19
3 ANALÝZA KONKRÉTNÍHO TYPU STROJE.....	21
3.1 MĚŘENÍ ANALYZOVANÉHO MOTORU	21
3.1.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	22
3.1.2 MĚŘENÍ NAKRÁTKO	24
3.1.3 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	25
3.1.4 PŘÍKLADY VÝPOČTU	27
3.2 ANALÝZA MOTORU V PROGRAMU FEMM	27
4 ENERGETICKÁ BILANCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	30
4.1 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI.....	30
4.2 ZTRÁTY MECHANICKÉ.....	33
4.3 ZTRÁTY V ŽELEZE.....	33
4.4 ZTRÁTY VE VINUTÍ STATORU A ROTORU.....	33
4.4.1 MOTORY VYUŽÍVAJÍCÍ MĚDĚNÝCH ROTORŮ.....	34
4.5 ZTRÁTY PŘÍDAVNÉ.....	35
4.5.1 VLIV ZEŠIKMENÍ DRÁŽEK NA PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY	35
4.6 VLIV KONSTRUKCE MOTORU NA JEHO ÚČINNOST	36
4.7 DALŠÍ VÝHODY POUŽITÍ MOTORŮ S VĚTŠÍ ÚČINNOSTÍ.....	36
5 NÁVRH FUNKČNÍHO VZORKU MOTORU.....	37
6 ZÁVĚR.....	53
LITERATURA	54
PŘÍLOHY	55

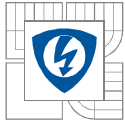
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.0: Asynchronní motor s kotvou nakrátko	15
Obrázek 2.1: Řez asynchronním motorem	16
Obrázek 2.2: Náhradní schéma asynchronního motoru	16
Obrázek 2.3: Momentová charakteristika asynchronního motoru	17
Obrázek 2.4: Vznik síly působící na rotor	18
Obrázek 2.5: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru	19
Obrázek 2.6: Jednofázový asynchronní motor s rozběhovým kondenzátorem	20
Obrázek 3.0: Měření na motoru J22VV499	21
Obrázek 3.1: Graf závislosti ztrát v železe a ztrát mechanických na napětí	23
Obrázek 3.2: Graf závislosti oddělení mechanických ztrát od ztrát v železe	24
Obrázek 3.3: Graf závislosti proudu na momentu	24
Obrázek 3.4: Graf závislosti proudu, výkonu a ztrát na napětí	26
Obrázek 3.5: Graf rozložení ztrát motoru J22VV499	27
Obrázek 3.6: Ukázka zadávaných parametrů modelu	28
Obrázek 3.7: Rozložení magnetické indukce	29
Obrázek 3.8: Výpočet momentu	29
Obrázek 4.0: Energetická bilance asynchronního motoru	30
Obrázek 4.1: Účinnost hliníkového a měděného rotoru	34
Obrázek 4.2: Asynchronní motor s měděným rotorem od firmy siemens	35
Obrázek 4.3: Rotor s klecovým vinutím a zešíkmenými drážkami	36
Obrázek 5.0: Závislost účinníku a účinnosti na výkonu motoru	37
Obrázek 5.1: Rozměry rotorové drážky	42
Obrázek 5.2: Kruh rotoru	43
Obrázek 5.3: Rozměry drážek	45
Obrázek 5.4: Rozměry statorové drážky	46
Obrázek 5.5: Činitelé diferenčního rozptylu	48
Obrázek 5.6: Rozměry plechů navrhnutého motoru	51
Obrázek 5.7: Detail na drážky rotoru a statoru	52



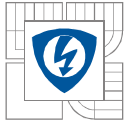
SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.0: Parametry motoru.....	21
Tabulka 3.1: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření naprázdno	22
Tabulka 3.2: Naměřené hodnoty z měření nakrátko	24
Tabulka 3.3: Naměřené hodnoty z měření při zatížení	25
Tabulka 3.4: Naměřené a vypočítané hodnoty z měření při zatížení	25
Tabulka 5.0: Výchozí parametry motoru	37
Tabulka 5.1: Úbytek napětí v závislosti na počtu pólů	37
Tabulka 5.2: Konstanta C_A podle počtu pólů	38
Tabulka 5.3: Parametry drážky statoru.....	40
Tabulka 5.4: Parametry drážky rotoru.....	41
Tabulka 5.5: Velikost intenzity závislá na magnetické indukci	43
Tabulka 5.6: Rozměry statorové drážky 1.....	45
Tabulka 5.7: Rozměry statorové drážky 2.....	46
Tabulka 5.8: Střední hodnoty jednotkové vodivosti	48
Tabulka 5.9: Rozložení závitů do vinutí 1	51
Tabulka 5.10: Rozměry statorové drážky 2.....	51

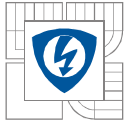


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

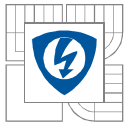
A	intenzita proudové vrstvy obvodu stroje
B	magnetická indukce
b	šířka drážky
B_{j1}	indukce ve jhu
B_{z1av}	střední indukce v zubech statoru
b_{z1av}	střední šířka zubu statoru
b_{z2av}	střední šířka zubu rotoru
b_{zr}	šířka zubu rotoru
b_{zs}	šířka zubu statoru
C_A	určíme podle počtu pólů
D	průměr
D_c	průměr kruhu
D_e	vnější průměr plechů
D_s	střední průměr jha statoru
F	síla
f_1	frekvence
F_m	magnetomotorická síla
h_{j1}	výška jha statoru
H_{js}	střední intenzita magnetického pole
h_{yr}	délka indukční čáry v zubu rotoru
h_{z1}	výpočtová výška zubu statoru
h_{z2}	výška zubu rotoru
I	proud
I_{kn}	nasycený proud nakrátko
I_m	magnetizační proud
I_z	ztrátový proud
J	proudová hustota
k	činitel
k_{cr}	Carterův činitel pro rotor
k_{cs}	Carterův činitel pro stator
k_{dj}	činitel nerovnoměrnosti rozložení toku v magnetickém obvodu



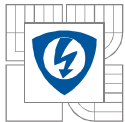
k_{dz}	činitel vlivu technologie výroby statorového svazku
k_{fe}	činitel plnění železa
k_p	činitel plnění
k_v	činitel vinutí
l_c	přibližná délka čela
L_e	efektivní délka železa
l_{Fe}	délka železa stroje
l_{Fe}	délka železa stroje
l_{js}	délka indukční čáry
M	moment motoru
m_1	počet fází
M_{max}	maximální moment
M_n	nominální moment
M_z	moment zvratu
m_{zs}	hmotnost zubů statoru
n	otáčky motoru
n_1	otáčky pole statoru
n_d	počet vodičů v drážce
N_{S1}	počet závitů v sérii
P_1	příkon motoru
P_m	mechanický výkon
$Q1$	počet drážek statoru
q_1	počet drážek na pól a fázi
$Q2$	počet drážek rotoru
q_r	počet drážek na pól a fázi rozběhového vinutí
R	činný odpor představující odpor mědi
R_{Fe}	odpor představující ztráty v železe
s	skluz motoru
S_c	průřez kruhů
S_i	vnitřní zdánlivý výkon stroje
S_{id}	průřez izolované statorové drážky
S_{p1}	průřez drátu se smaltováním



S_t	průřez rotorové tyče
t_{3r}	drážková rozteč rotoru
t_{3s}	drážková rozteč statoru
t_d	drážková rozteč
t_{dr}	tloušťka drážkové izolace
t_s	tloušťka smaltu
U	napětí
U_{zs}	magnetické napětí pro zuby statoru
V_{cu}	celkový objem mědi
X	rozptylová reaktance
X_c	reaktance čel
X_{d1}	drážková reaktance
X_{d21}	drážková reaktance přepočítaná na stator
X_{dif1}	diferenční reaktance statoru
X_{dif2}	diferenční reaktance rotoru
X_h	hlavní magnetizační reaktance
X_n	nasycená reaktance
Z	nenasycená impedance
Z_n	nasycená impedance
α	činitel plnění pólové křivky
γ	hustota statorového plechu
ε	úbytek napětí ve stroji
κ	přepočítací činitel
λ_{d1}	jednotková rozptylová vodivost statorové drážky
λ_{d2}	rozptylová vodivost rotorové drážky s můstkem
λ_m	jednotková magnetická vodivost můstku
ρ_{Cu}	rezistivita mědi
τ_{dif2}	činitel diferenčního rozptylu klece
Φ_m	magnetický tok nasyceným můstkem
ΔP_{cu}	ztráty v mědi
ΔP_{Fe1}	ztráty v železe statoru
ΔP_{Fe2}	ztráty v železe rotoru



ΔP_{j1}	ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{j2}	ztráty ve vinutí rotoru
ΔP_{mech}	mechanické ztráty
β	exponent závislý na druhu oceli
δ	velikost vzduchové mezery
γ_{Fe}	měrná hustota oceli
ρ_{Cu}	měrný odpor mědi
τ_p	pólová rozteč



1 ÚVOD

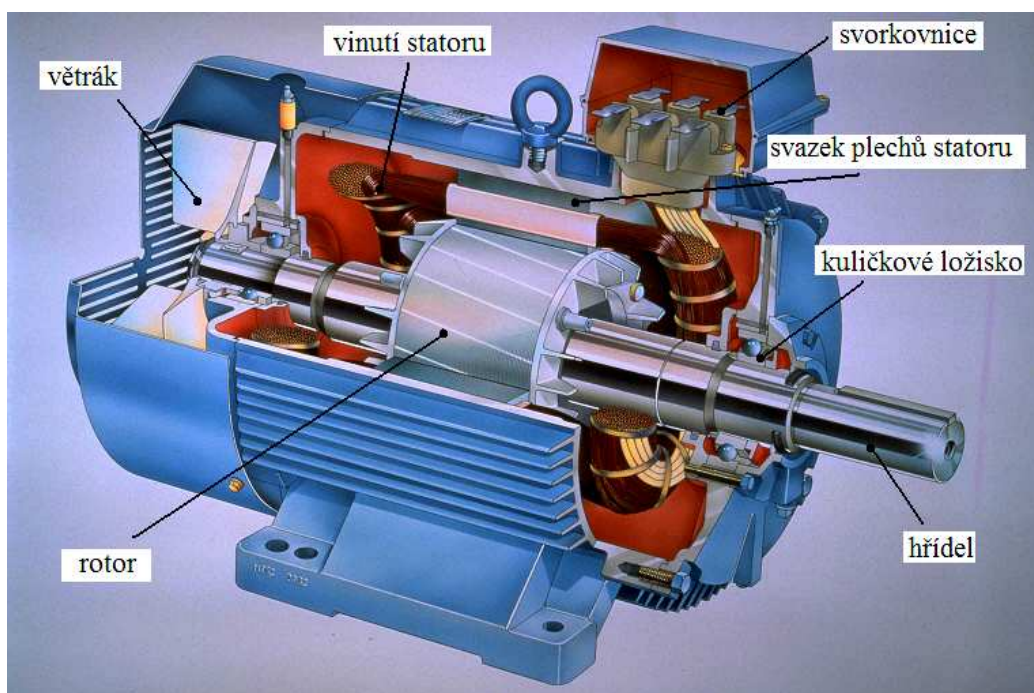
Asynchronní motory se řadí do skupiny strojů určených k elektro-mechanické přeměně energie. Jak už z názvu vyplývá, asynchronní motory přeměňují energii elektrickou na energii mechanickou. Nejčastěji vyrobenou mechanickou energií na výstupu motoru bývá otáčivá na hřídeli. Pro svoji jednoduchost, spolehlivost a výrobní náklady se staly hojně využívaným typem elektrického pohonu, který nalézá své zastoupení nejenom v těžkém průmyslu, ale také v domácnostech. Dalším aspektem, který v poslední době přispěl k rozmachu asynchronních motorů, je vývoj a snížení pořizovacích nákladů výkonové techniky potřebné pro jejich regulaci. Asynchronní neboli indukční motory je možné dělit do několika skupin podle mnoha kritérií, ale základním rozdělením a zároveň nejpodstatnějším je dělení podle počtu fází. Pro větší výkony, zpravidla nad 1KW, se využívají motory trojfázové a naopak pod hranici tohoto výkonu se používají motory jednofázové, ale není to pravidlo. Motory lze dále dělit například podle typu rotoru, o tom pojednávají další kapitoly práce. Elektrické pohony spotřebovávají více než polovinu celkové vyrobené energie na světě a to je jeden z důvodů velkého významu pohonů. V současné době se klade důraz na ekologii, úspory a životní prostředí, všem těmto požadavkům podléhají nároky na zvýšenou účinnost elektrických motorů.

2 ASYNCHRONNÍ MOTOR

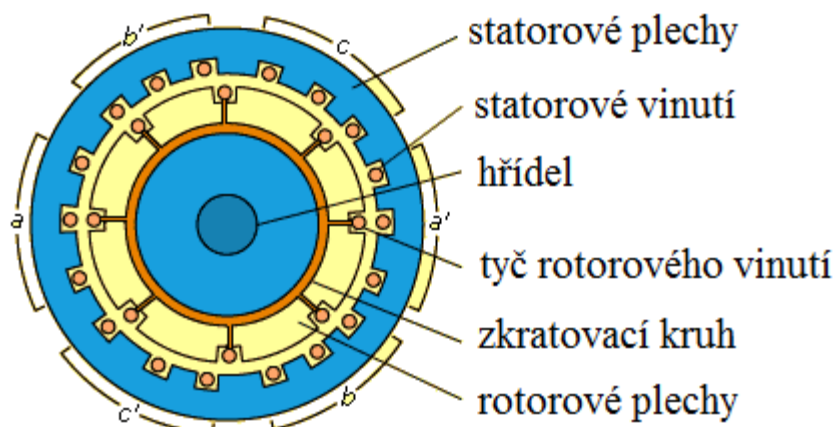
Jak už bylo řečeno v úvodní kapitole asynchronní motor je elektrický stroj, který umožňuje přeměnu elektrické energie na energii mechanickou. Výstupní mechanický pohyb bývá nejčastěji otáčivý, ale i lineární. Nejjednodušším, nejpoužívanějším a pro svoji jednoduchou konstrukci je nejčastěji využíván trojfázový asynchronní motor, zejména motor s kotvou nakrátko. Tento typ motoru je vyráběn ve velkých sériích a právě proto je nejlevnějším zdrojem hnací síly. Jeho hmotnost je oproti ostatním elektrickým strojům relativně nejmenší a lze jej při realizaci konkrétního pohonu nejlépe přizpůsobit hnanému stroji nebo mechanismu. Pro jeho výhody se dá asynchronní motor využít snadno pro řešení vícemotorových pohonů speciálních a jiných složitých pracovních mechanismů velkého výkonu, ale i naopak lze asynchronní motor použít pro malé výkony do 1KW, napájené jednou nebo třemi fázemi.

2.1 Provedení asynchronního stroje

„Asynchronní motor se stejně jako ostatní stroje sloužící k elektromechanické přeměně skládá z nepohyblivé části (statoru) a pohyblivé části (rotoru). Stator je vyroben z litinové konstrukce a dvou ložiskových štítů. V kostře statoru jsou zalisovány plechy, které jsou navzájem izolovány a tvoří hlavní část magnetického obvodu stroje. Rotorové plechy jsou nalisovány na hřídeli, která se otáčí v ložiscích, upevněných v ložiskových štítech, které vymezují polohu rotoru uvnitř statoru. Mezi státorem a rotorem je vzduchová mezera, která umožňuje pohyb rotoru. V drážkách statorových a rotorových plechů je uloženo vinutí stroje. Na statoru bývá obvykle trojfázové vinutí (může být i jedno nebo dvoufázové), jehož začátky a konce jsou vyvedeny na svorkovnici. V rotorových drážkách je uloženo vinutí, kterému se říká kotva. U motoru s kotvou nakrátko jsou v drážkách rotoru neizolované měděné nebo mosazné, nejčastěji však hliníkové spojovací kruhy nakrátko. U motoru menších výkonů se vinutí odlévá spolu s větracími lopatkami z hliníku metodou tlakového lití. Takovému vinutí se říká klec. U motoru s vinutým rotorem a kroužky je v drážkách rotoru uloženo vinutí z izolovaných vodičů, začátky fází jsou spojeny do uzlu a konce připojeny ke sběracím kroužkům. Ke kroužkům přiléhají vinutí rotoru, umožňující připojit zařízení, sloužící k regulaci otáček motoru.“[9]



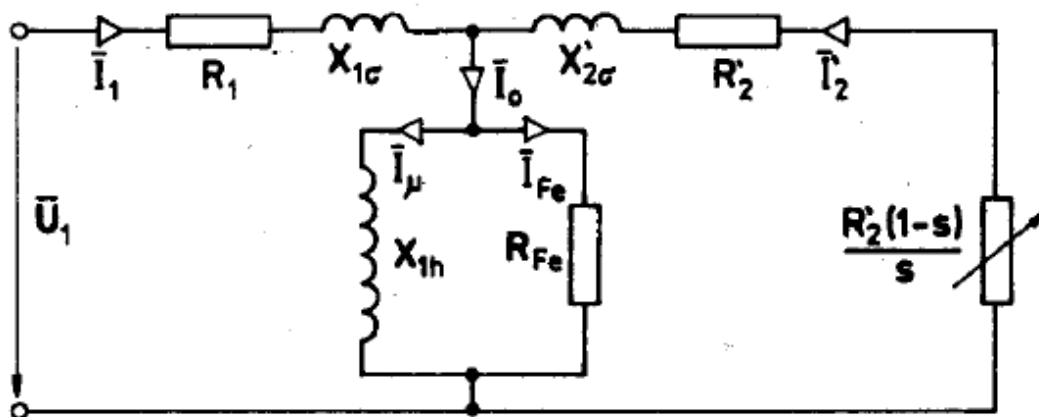
Obrázek 2.0: Asynchronní motor s kotvou nakrátko [5]



Obrázek 2.1: Řez asynchronním motorem [5]

2.2 Náhradní schéma asynchronního motoru

Podobně jako transformátor má asynchronní motor své náhradní schéma. Stejně jako u transformátoru má vinutí statoru i rotoru společný magnetický obvod. Každé vinutí má svoji rozptylovou indukčnost a činný odpor. V obvodu veličiny označené jedničkou znázorňují veličiny statorové a veličiny rotorové jsou označeny dvojkou. Na pravé straně náhradního schématu můžeme vidět proměnný odpor, který znázorňuje odpor závislý na změně skluzu motoru.



Obrázek 2.2: Náhradní schéma asynchronního motoru [5]

U_1 - napětí

I_1 - proud

R_1 - činný odpor představující odpor mědi

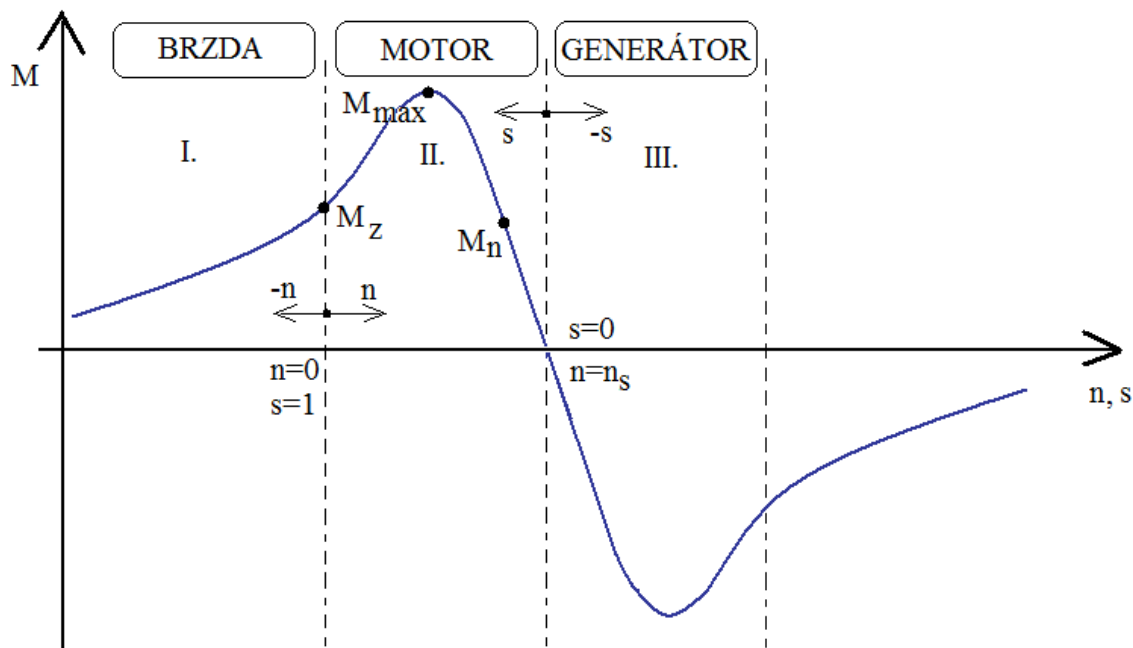
$X_{1\sigma}$ - rozptylová reaktance

X_{1h} - hlavní magnetizační reaktance

R_{Fe} - odpor představující ztráty v železe

2.3 Momentová charakteristika

Pro každý druh elektrických motorů je příznačný určitý tvar a průběh momentové charakteristiky. Momentová charakteristika je křivka znázorňující průběh točivého momentu motoru na otáčkách. Momentová charakteristika elektrického motoru znázorňuje hlavní provozní vlastnosti.



Obrázek 2.3: Momentová charakteristika asynchronního stroje

Na obrázku 2.3 je momentová charakteristika třífázového asynchronního stroje. Charakteristika je rozdělena na tři části. V každé části motor pracuje v jiném režimu. V první oblasti pracuje stroj jako brzda, ve druhé jako motor a ve třetí jako generátor. Druhá oblast kde stroj pracuje jako motor, bude rozebrána dopodrobna. Na počátku druhé oblasti kde $n=0$ určuje momentová charakteristika záběrný moment M_z . Je to moment, který je motor ze stavu v klidu schopen vytvořit, aby uvedl hnaný mechanismus do pohybu. Dále je v charakteristice vyznačen maximální moment motoru M_{max} . Optimální pracovní bod je v charakteristice naznačen M_n . V jeho okolí se rychlost motoru málo mění se zatížením (tvrdá momentová charakteristika).

2.4 Rozdělení asynchronních motorů

Asynchronní motory se dají dělit hned podle mnoha kritérií. Zde jsou uvedeny základní rozdělení, která jsou pro motory nejpodstatnější. Dále můžeme motory dělit například podle hlediska mechanického provedení, podle krytí, chlazení, podle speciálního účelového provedení, atd.

Podle počtu fází

1. Trojfázové
2. Jednofázové

Podle provedení vinutí rotoru

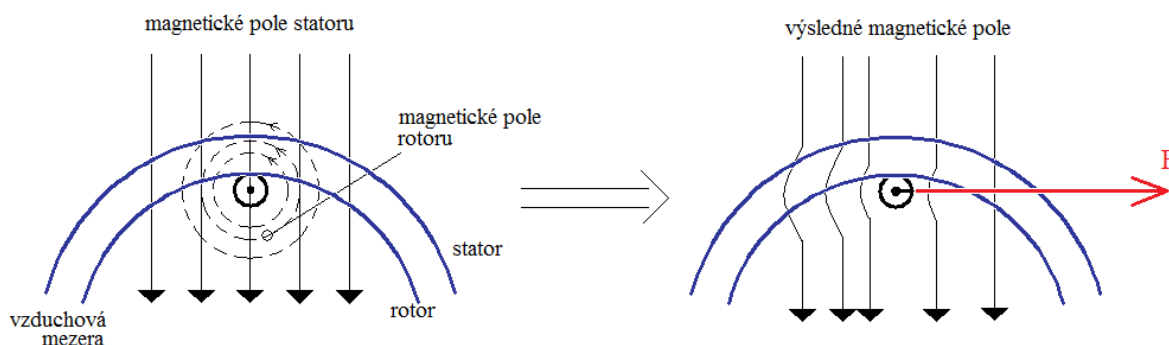
1. Nakrátko
2. Kroužkové

2.5 Asynchronní motory trojfázové

Patří k nejčastěji používaným motorům. Tyto motory mají trojfázové vinutí statorové nebo trojfázové vinutí rotorové. Statorové vinutí je připojeno přes svorkovnici motoru na souměrnou soustavu trojfázového proudu. Tím se vytvoří ve svazku statorových plechů točivé magnetické pole, které se magnetickou indukcí přenáší přes vzduchovou mezeru do svazku plechů rotoru. Jak už bylo řečeno, výkon se přenáší do rotoru ze statoru magnetickou indukcí a z tohoto důvodu se tyto motory nazývají také indukčními.

2.5.1 Princip činnosti

V této kapitole bude popsán princip vzniku síly působící na rotor asynchronního motoru. Jak už bylo řečeno, mezi nejčastěji používané motory patří trojfázový asynchronní, jehož statorové vinutí je připojeno na trojfázovou síť vytvářející točivé magnetické pole. Takto vzniklé točivé magnetické pole, které protíná vodiče rotoru, způsobí, že v nich indukuje napětí a v případě, že je vinutí rotoru uzavřeno, protéká jím proud. Proud vytváří magnetické pole rotoru, které působí na magnetické pole statoru. Vzájemným působením obou magnetických polí se vytváří síla, která působí na vodiče rotoru ve směru, kterým se pohybuje magnetické pole statoru. Tento jev vzniku síly popisuje obrázek.



Obrázek 2.4: Vznik síly působící na rotor

Na obrázku znázorněná síla F se bude vyskytovat pouze tehdy, jestliže se bude ve vodičích rotoru indukovat napětí (proud). Tento jev nastane v případě relativního pohybu pole statoru vůči vodičům rotoru. Z této situace plyne, že otáčky rotoru a otáčky točivého pole statoru, musí být různé. Rozdíl otáček pole statoru (n_1) a otáček rotoru (n), vztažených na jednu otáčku n_1 , nazýváme skluzem asynchronního motoru (s). Skluz je bezrozměrné číslo, jestliže vynásobíme rovnici 100, dostaneme skluz v procentech. Skluz vypočítáme z následující rovnice.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.0)$$

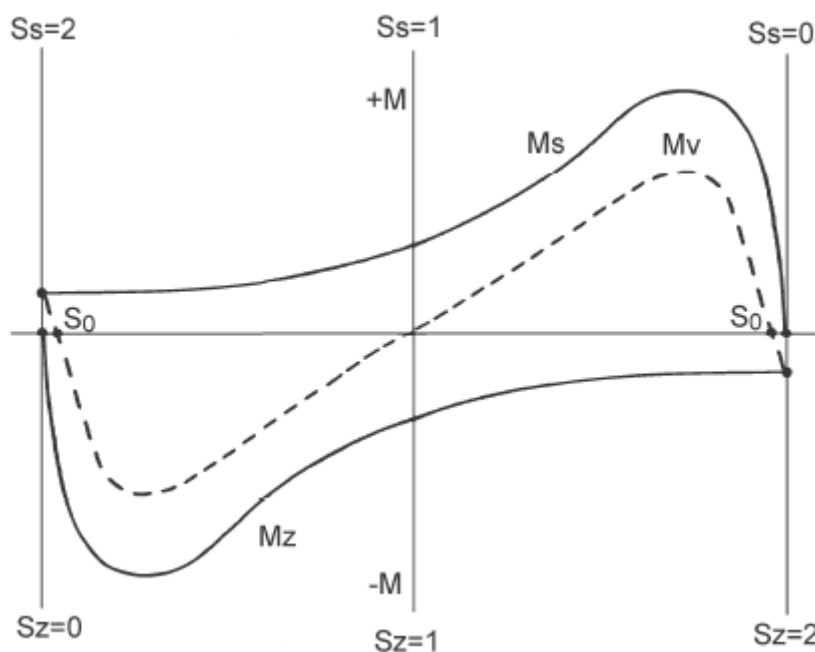
Hodnota skluzu závisí na mechanickém zatížení motoru a při jmenovitém zatížení obvykle nabývá hodnot 1% u velkých motorů a 10% u motorů malých.

2.6 Jednofázové asynchronní motory

Jednofázové asynchronní motory bývají většinou odvozeny od motorů trojfázových. Jejich zásadní rozdíl je ve statorovém vinutí a ve spouštěcím zařízení. Připojením pracovního statorového vinutí jednofázového motoru na jednofázovou síť (fáze a nulový vodič), nevznikne ve statoru točivé magnetické pole, ale pole pulsující, které nevytváří žádný točivý moment.

Z tohoto důvodu motor bez dalších zásahů setrvává v klidu a sám se nikdy neroztočí. Lze si představit, že se toto pulsující pole skládá ze dvou točivých polí poloviční velikosti, která rotují synchronně proti sobě. Tato pole vytvářejí vlastní točivé momenty, jejichž výslednicí je moment pro klidovou polohu nulový. Při pohybu rotoru na jednu nebo druhou stranu rychle vzrůstá výsledný moment. Tímto jevem je způsoben fakt, že motor se z klidové polohy sám nerozběhne, avšak při roztočení na jedno jakou stranu, následkem výsledného momentu se motor rozbíhá na tu stranu, na kterou byl roztočen.

„Točivý moment jednofázového motoru odpovídá přibližně točivému momentu trojfázového motoru stejné typové velikosti, který by však měl pouze poloviční magnetický tok. Proto je jmenovitý výkon stejně velkého jednofázového motoru pouze asi poloviční než jmenovitý výkon motoru trojfázového. Přetížitelnost jednofázového motoru je malá a je rovněž menší než u motoru trojfázového (v průměru asi 1,35 násobek proti dvojnásobku u motoru trojfázového). Protože je využití motoru jednofázového proti motoru trojfázovému přibližně poloviční, je také jeho účinnost menší (jednotky procent).“ [1]



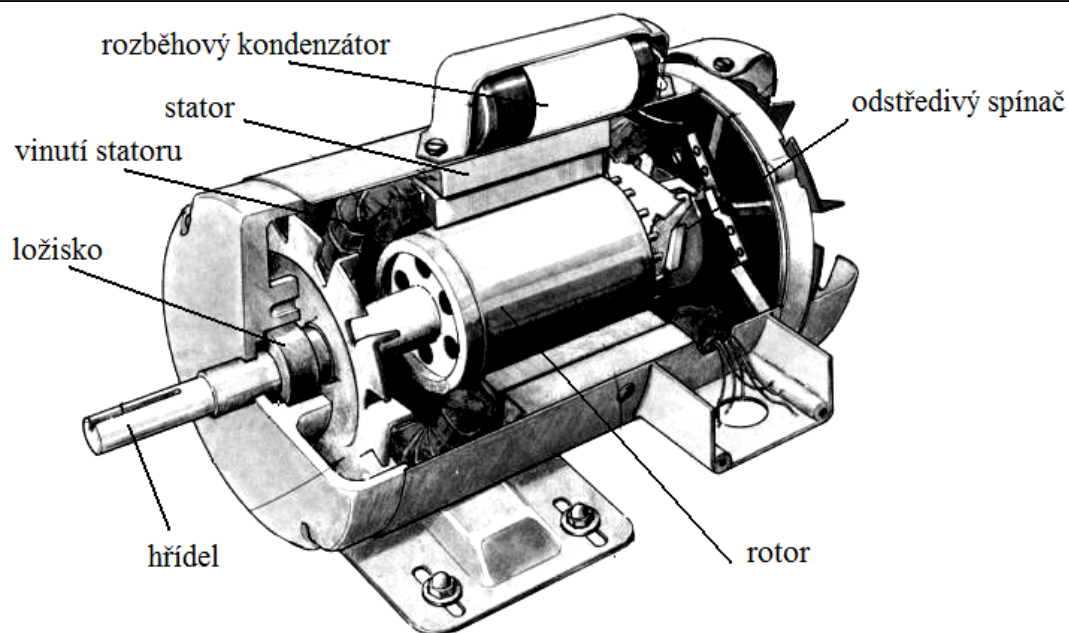
Obrázek 2.5: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru [14]

2.6.1 Spouštění jednofázových asynchronních motorů

V předchozí kapitole byl podrobně popsán důvod, proč se jednofázový asynchronní motor nerozběhne sám. Z tohoto důvodu se motor po připojení k síti uvádí do chodu dvojím způsobem.

1. Mechanickým roztočením (mechanickým pootočením, zatáhnutím za řemen, pootáčením hnaného zařízení).
2. Přídavným rozběhovým vinutím (vinutí uložené v drážkách statoru, které společně s hlavním statorovým vinutím vytváří točivé pole potřebné k rozběhu jednofázového motoru).

Dříve používaný rozběh mechanický už je dnes zcela vytlačen samočinným rozběhem s pomocnou fází. Jednofázové asynchronní motory mají v dnešní době pomocné rozběhové vinutí, ve kterém je proud posunut proti vinutí hlavnímu přibližně o 90° .



Obrázek 2.6: Jednofázový asynchronní motor s rozběhovým kondenzátorem [5]

3 ANALÝZA KONKRÉTNÍHO TYPU STROJE

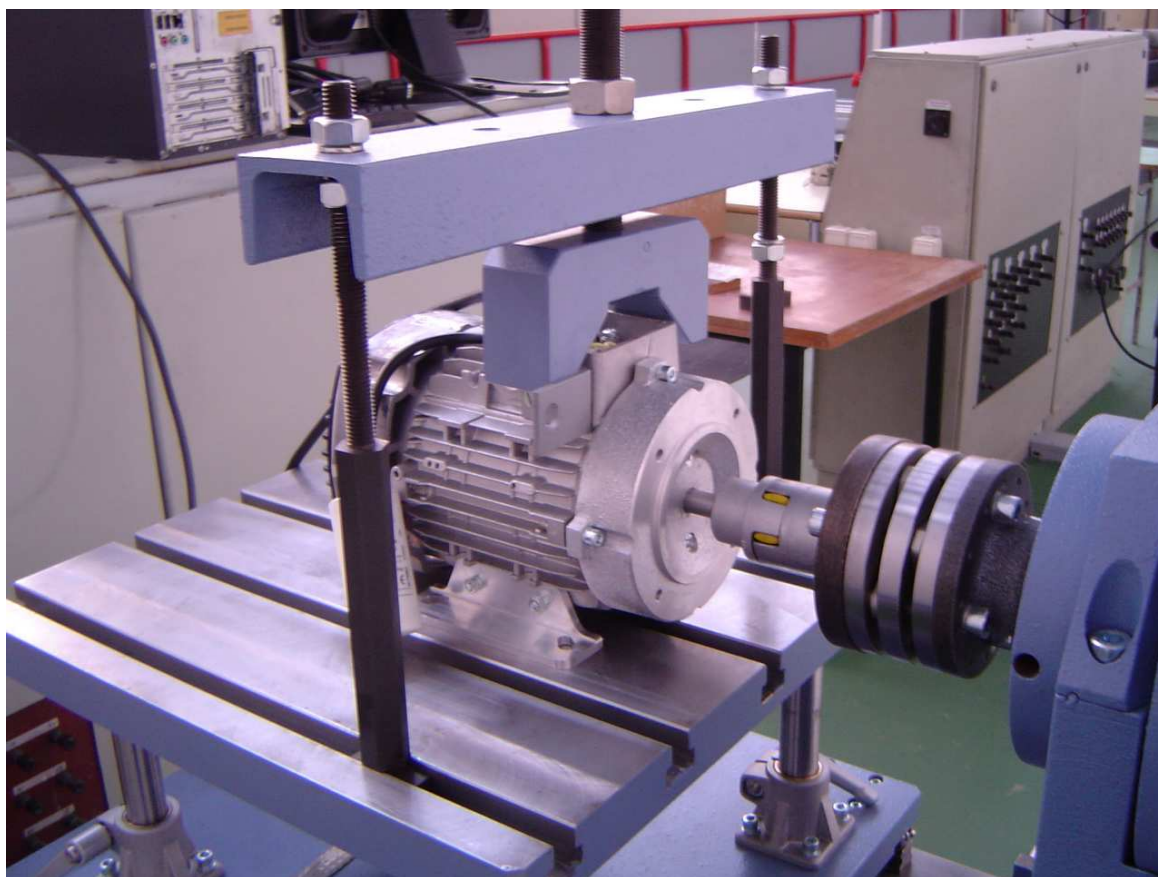
Z široké nabídky asynchronních motorů, byl zvolen jednofázový asynchronní motor s rotorem nakrátko od firmy Atas elektromotory Náchod a.s. Motor má krytí IP54, je konstruován pro trvalé zatížení S1. Statorový a rotorový svazek je z plechu pro elektrotechniku, válcovaného za studena. Tento motor je blíže popsán se všemi jeho parametry a výkresovou dokumentací, která je obsažena v přílohách práce.

typ	výkon	otáčky	proud	napětí	kmitočet	příkon	chlazení	hmotnost
	kW	min ⁻¹	A	V	Hz	W	-	kg
J22VV499	0,55	2700	4,6	220-240	50-60	930	IC411	9,8

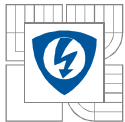
Tabulka 3.0: Parametry motoru

3.1 Měření analyzovaného motoru

V laboratořích VUT, byl zkoumaný asynchronní motor proměřen ve třech režimech. Nejprve bylo provedeno měření naprázdno. Z tohoto měření je možné určit ztráty ve vinutí statoru, ztráty v železe statoru i ztráty mechanické. Ztráty v rotoru se kvůli malé frekvenci zanedbávají. Dále bylo provedeno měření motoru nakrátko. Z tohoto měření je možné zjistit například účinník nakrátko a některé další parametry, které však nejsou podstatné pro analýzu ztrát na motoru, tudíž jsou zde pouze uvedeny naměřené hodnoty, avšak dále se s nimi nepracuje. Jako poslední měření bylo provedeno měření při zatížení, které slouží k určení účinnosti motoru. Metodika výpočtu ztrát vychází z literatury [16].



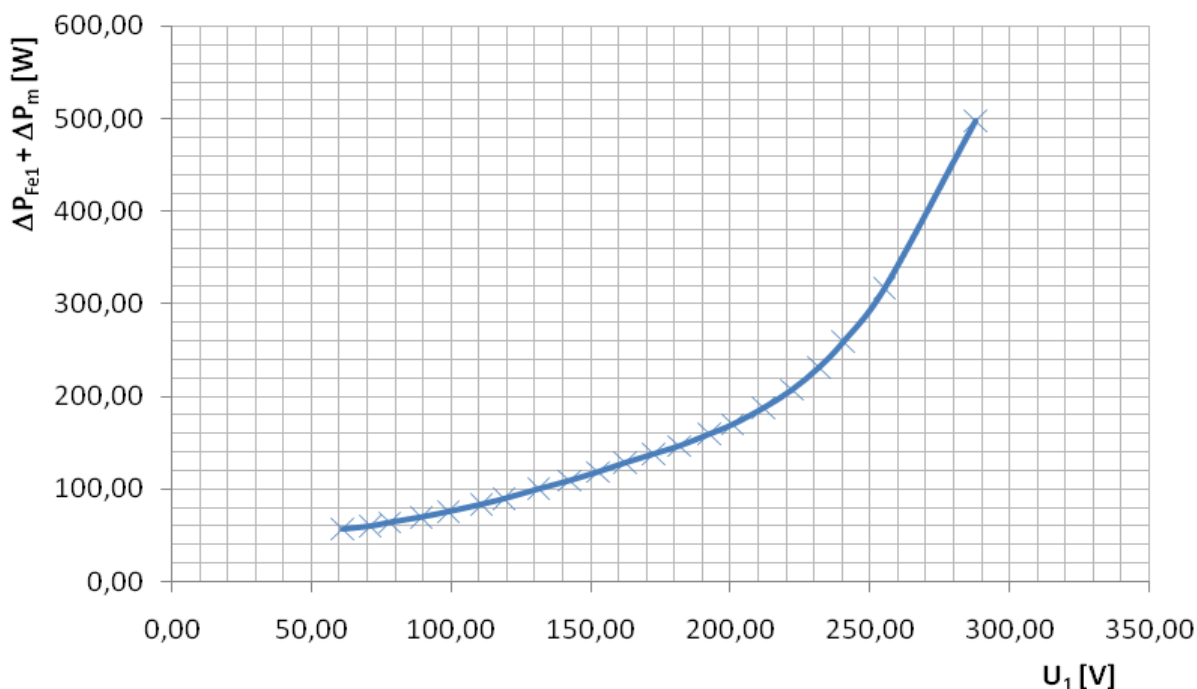
Obrázek 3.0: Měření na motoru J22VV499



3.1.1 Měření naprázdno

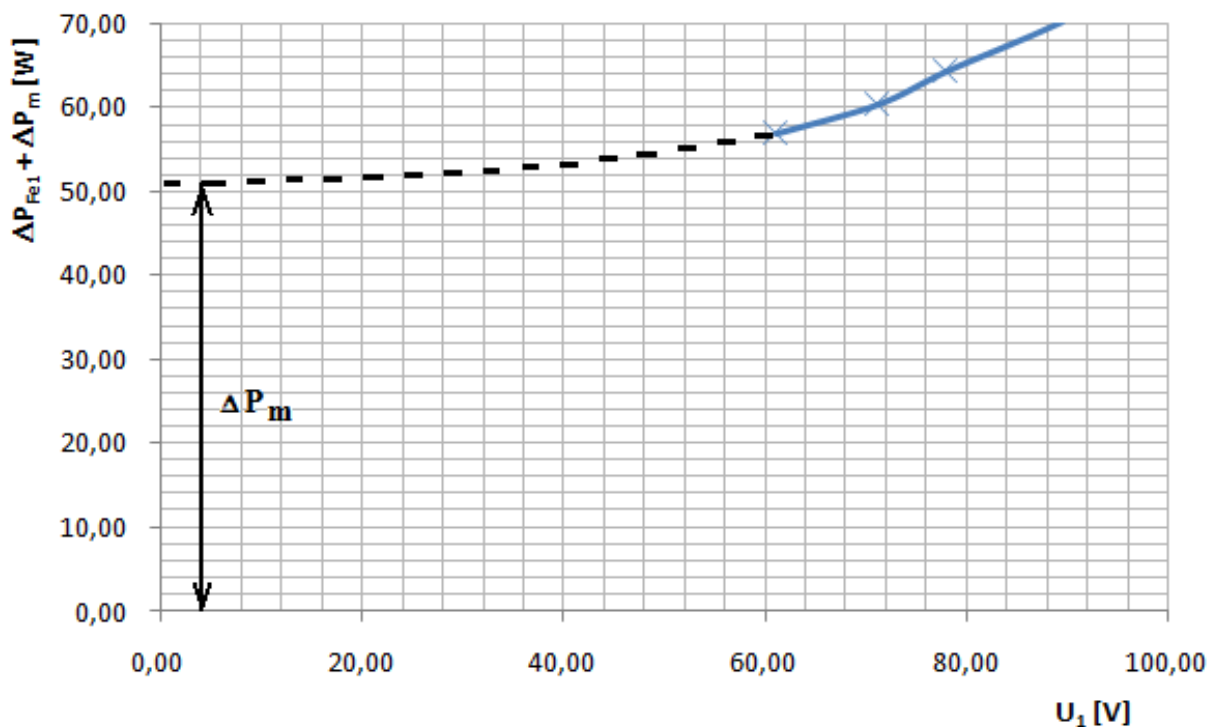
MĚŘENÍ	U_{RMS1}	I_{RMS1}	$\cos \varphi$	P_1	Q_1	S_1	rpm	ΔP_{j1}	$\Delta P_{fe} + \Delta P_m$
-	[V]	[A]	-	[W]	[Var]	[VA]	[ot/min]	[W]	[W]
1	287,47	8,03	0,40	919,60	2118,40	2309,40	2942	422,02	497,58
2	254,90	4,54	0,39	451,50	1065,90	1157,50	2956	134,86	316,64
3	240,13	3,31	0,42	330,70	723,90	795,90	2960	71,83	258,87
4	231,49	2,71	0,45	279,70	562,20	627,90	2960	48,12	231,58
5	221,70	2,15	0,50	237,20	412,80	476,20	2960	30,17	207,03
6	211,76	1,69	0,58	206,50	291,30	357,10	2960	18,59	187,91
7	200,68	1,32	0,69	181,38	191,78	263,97	2958	11,32	170,06
8	192,15	1,11	0,78	167,46	133,46	214,13	2956	8,12	159,34
9	181,50	0,96	0,88	152,74	83,16	173,91	2953	6,00	146,74
10	172,55	0,90	0,93	143,49	57,75	154,68	2949	5,26	138,23
11	162,21	0,86	0,96	133,44	39,44	139,15	2945	4,81	128,63
12	152,53	0,83	0,97	123,30	30,05	126,91	2940	4,53	118,77
13	142,36	0,82	0,98	113,84	25,79	116,72	2935	4,40	109,44
14	131,21	0,82	0,98	104,65	23,25	107,20	2925	4,37	100,28
15	118,84	0,81	0,98	94,04	20,82	96,31	2914	4,30	89,74
16	110,83	0,81	0,98	88,08	18,93	90,10	2905	4,32	83,76
17	99,14	0,83	0,98	80,44	15,74	81,96	2883	4,47	75,97
18	89,38	0,84	0,99	74,70	10,85	75,49	2853	4,67	70,03
19	78,03	0,89	1,00	69,38	5,67	69,62	2794	5,21	64,17
20	71,18	0,93	0,99	65,94	6,70	66,28	2597	5,67	60,27
21	61,07	1,08	0,98	64,40	13,07	65,71	2135	7,57	56,83

Tabulka 3.1: Naměřené a vypočtené hodnoty z měření naprázdno



Obrázek 3.1: Graf závislosti ztrát v železe a ztrát mechanických na napětí

Z obrázku 3.1, který představuje závislost ztrát mechanických a ztrát v železe na napětí je nutné jednotlivé ztráty rozdělit. To provádíme tak, že se závislost protáhne až k nulové hodnotě napětí a v jaké vzdálenosti se protne s osou y, tam dostáváme hodnotu mechanických ztrát. Zde byla uvedena jedna z možností odečtení mechanických ztrát, další, přesnější metoda spočívá v převedení napětí na hlavní ose do kvadratických souřadnic, poté má charakteristika téměř lineární průběh a odečtení mechanických ztrát je jednodušší. V našem případě velikost mechanických ztrát vychází přibližně 51W.



Obrázek 3.2: Graf závislosti oddělení mechanických ztrát od ztrát v železe

3.1.2 Měření nakrátko

MĚŘENÍ	U_{RMS1}	I_{RMS1}	$\cos \varphi$	P_1	Q_1	S_1
-	[V]	[A]	-	[W]	[Var]	[VA]
1	25,71	1,00	0,81	20,83	15,05	25,70
2	48,56	2,06	0,86	86,02	50,75	99,88
3	72,47	3,16	0,88	201,66	108,76	229,12
4	92,44	4,06	0,89	334,05	171,53	375,52
5	107,60	4,75	0,89	456,94	227,88	510,61
6	129,59	5,75	0,90	671,40	322,40	744,80
7	140,14	6,18	0,91	785,00	366,80	866,40
8	159,28	7,02	0,91	1018,80	458,80	1117,30
9	186,71	8,19	0,92	1404,80	602,90	1528,80

Tabulka 3.2: Naměřené hodnoty z měření nakrátko

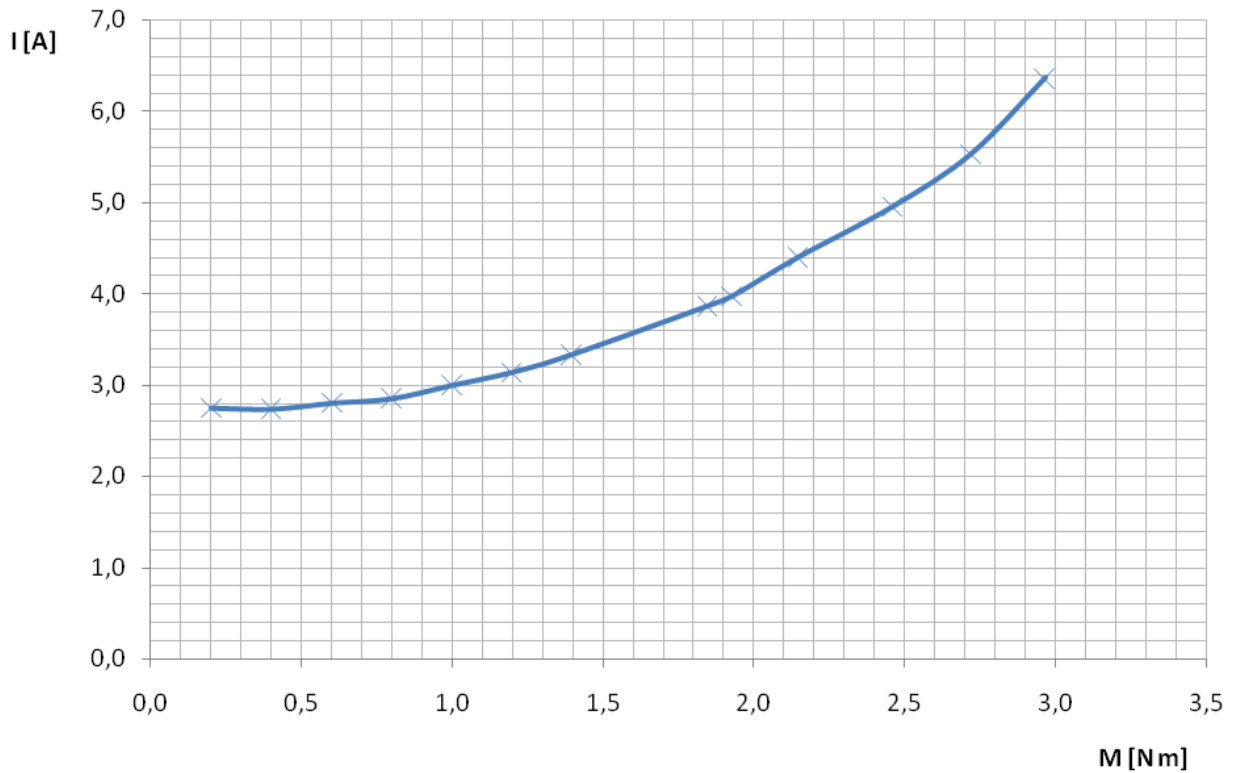
3.1.3 Měření při zatížení

MĚŘENÍ	U_{RMS1}	I_{RMS1}	$\cos \varphi$	P_1	Q_1	S_1
-	[V]	[A]	-	[W]	[Var]	[VA]
1	228,190	6,363	0,948	1375,600	464,200	1451,900
2	228,820	5,533	0,949	1200,800	401,000	1266,000
3	230,130	4,955	0,943	1075,000	380,000	1140,200
4	230,450	4,400	0,932	944,600	368,400	1013,900
5	230,810	3,975	0,914	838,900	371,300	917,400
6	231,140	3,867	0,906	809,900	377,900	893,700
7	231,870	3,335	0,851	657,700	406,600	773,300
8	231,820	3,139	0,818	595,100	418,800	727,700
9	232,040	2,998	0,772	537,300	442,000	695,700
10	231,680	2,852	0,723	477,700	456,400	660,700
11	232,470	2,803	0,653	425,700	493,200	651,500
12	232,290	2,737	0,584	371,500	515,900	635,700
13	232,790	2,749	0,503	321,900	553,100	639,900

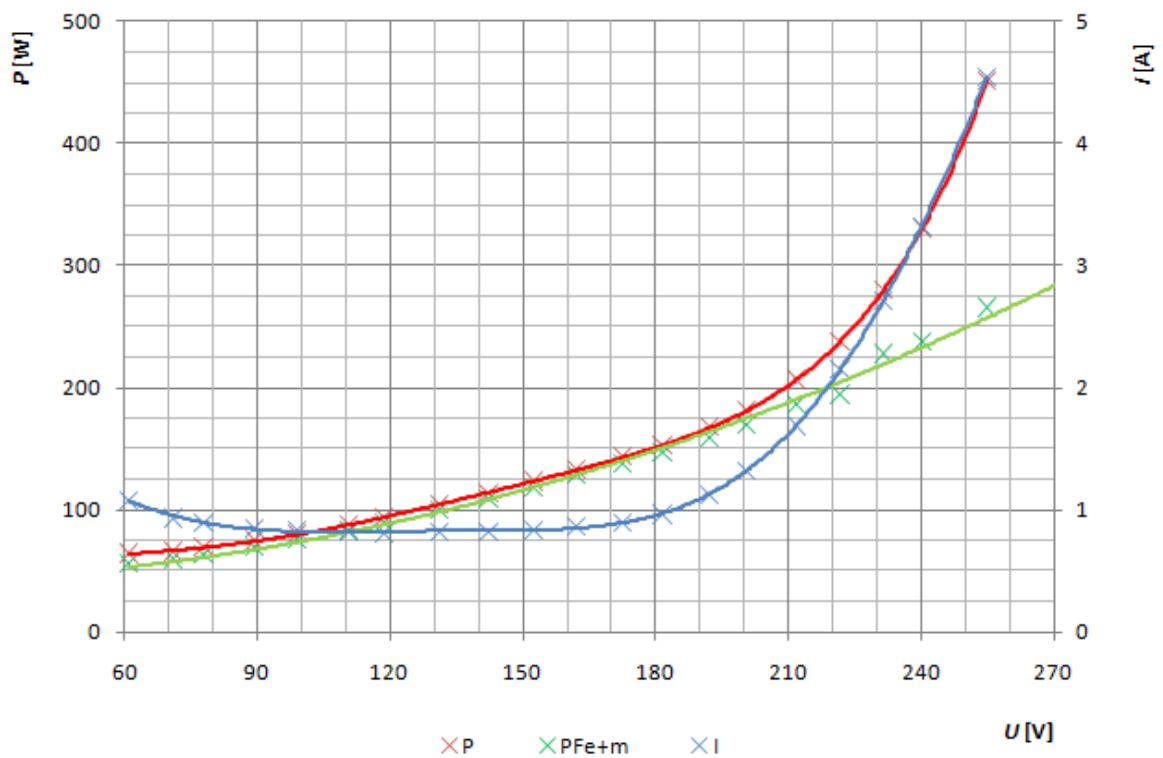
Tabulka 3.3: Naměřené hodnoty z měření při zatížení

MĚŘENÍ	M	rpm	P	η
-	[N/m]	[ot/min]	[W]	[%]
1	2,965	2220	688,95	50,08
2	2,720	2364	673,02	56,05
3	2,460	2473	636,75	59,23
4	2,146	2562	575,46	60,92
5	1,927	2632	530,86	63,28
6	1,846	2653	512,60	63,29
7	1,396	2746	401,23	61,01
8	1,196	2782	348,25	58,52
9	0,999	2816	294,45	54,80
10	0,799	2848	238,17	49,86
11	0,601	2878	181,04	42,53
12	0,399	2907	121,40	32,68
13	0,200	2936	61,46	19,09

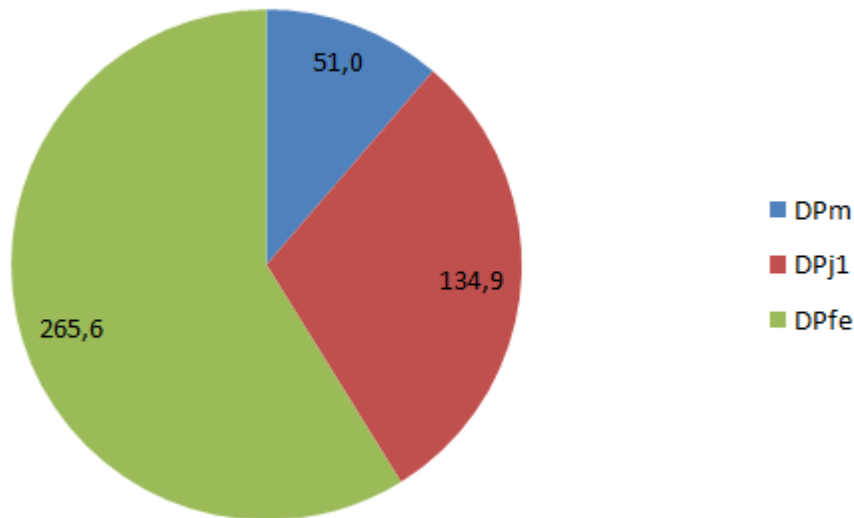
Tabulka 3.4: Naměřené a vypočítané hodnoty z měření při zatížení



Obrázek 3.3: Graf závislosti proudu na momentu



Obrázek 3.4: Graf závislosti proudu, výkonu a ztrát na napětí



Obrázek 3.5: Graf rozložení ztrát motoru J22VV499

Z obrázku 3.6 je patrné, jak velké jsou konkrétní typy ztrát v oblasti pracovního bodu motoru. Jako největší se ukázaly ztráty v železe statoru. Tyto ztráty činí celých 59% z celkových ztrát na motoru. Jako druhé největší ztráty s 30% vyšly ztráty v mědi a nejmenší jsou ztráty mechanické s 11%.

3.1.4 Příklady výpočtu

Jak už bylo uvedeno na začátku kapitoly, metodika měření motoru a následné určení ztrát vychází z literatury [16]. Zde jsou uvedeny příklady výpočtů pro první řádky tabulky.

Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1} = 1,5 \cdot R_{1w} \cdot I_{10}^2 = 1,5 \cdot 4,36 \cdot 8,03^2 = 422,02W \quad (3.0)$$

Součet ztrát v železe statoru a mechanických ztrát

$$\Delta P_{Fe1} + \Delta P_m = P_1 - \Delta P_{j1} = 919,6 - 422,02 = 497,58W \quad (3.1)$$

Výkon motoru:

$$P = M \cdot \omega = 2,965 \cdot \frac{2\pi \cdot 2220}{60} = 688,95W \quad (3.2)$$

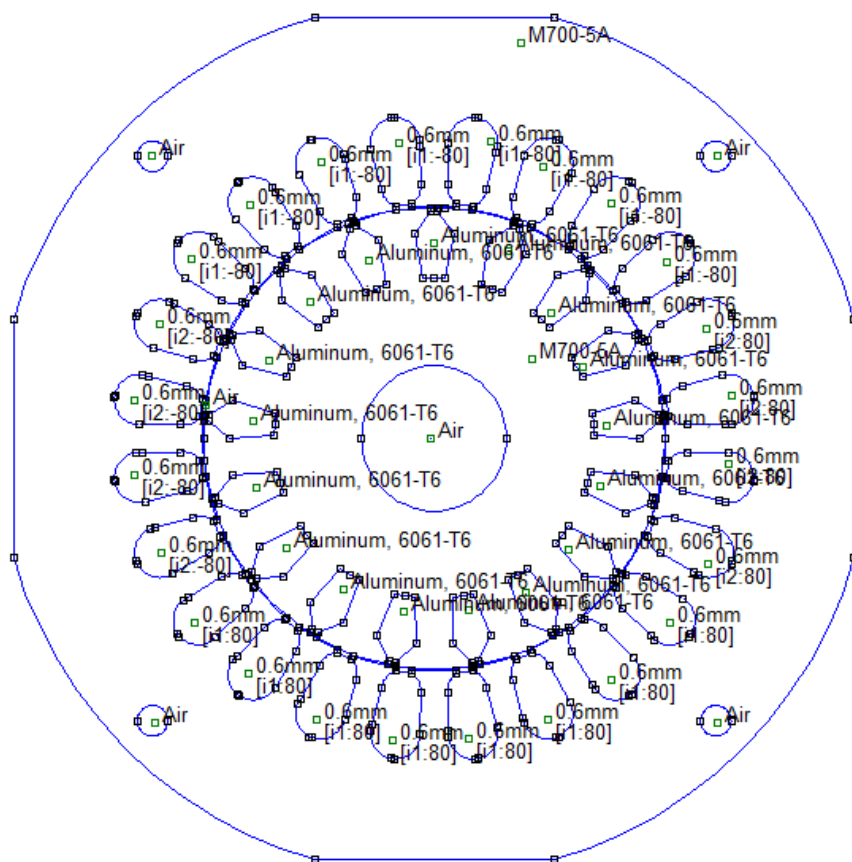
Účinnost motoru:

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 = \frac{688,95}{1375,6} \cdot 100 = 50,08\% \quad (3.3)$$

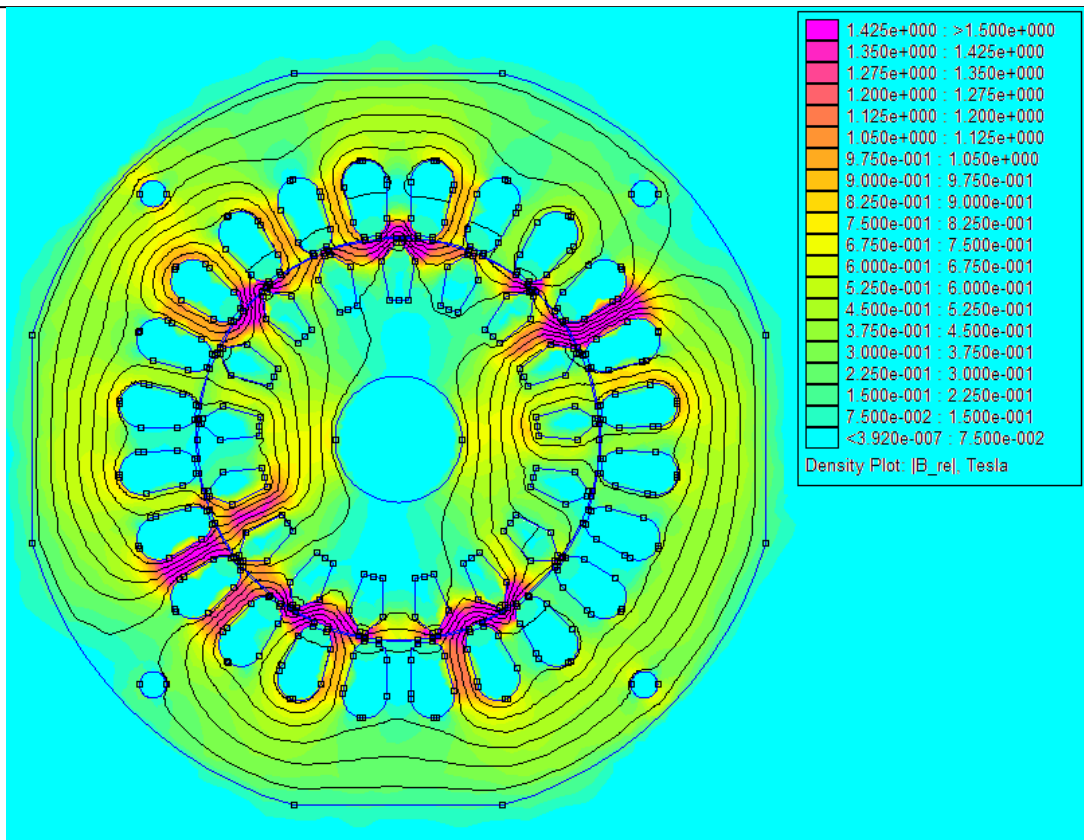
3.2 Analýza motoru v programu FEMM

Podle výkresové dokumentace od výrobce, která je obsažena v přílohách, byly narýsovány statorové a rotorové plechy v programu AutoCad. Následně byl importováním narýsovaného motoru zanesen model do programu Femm. Tento program nám umožňuje analýzu modelovaného motoru pomocí metody konečných prvků. Modelu bylo nejdříve důležité přiřadit

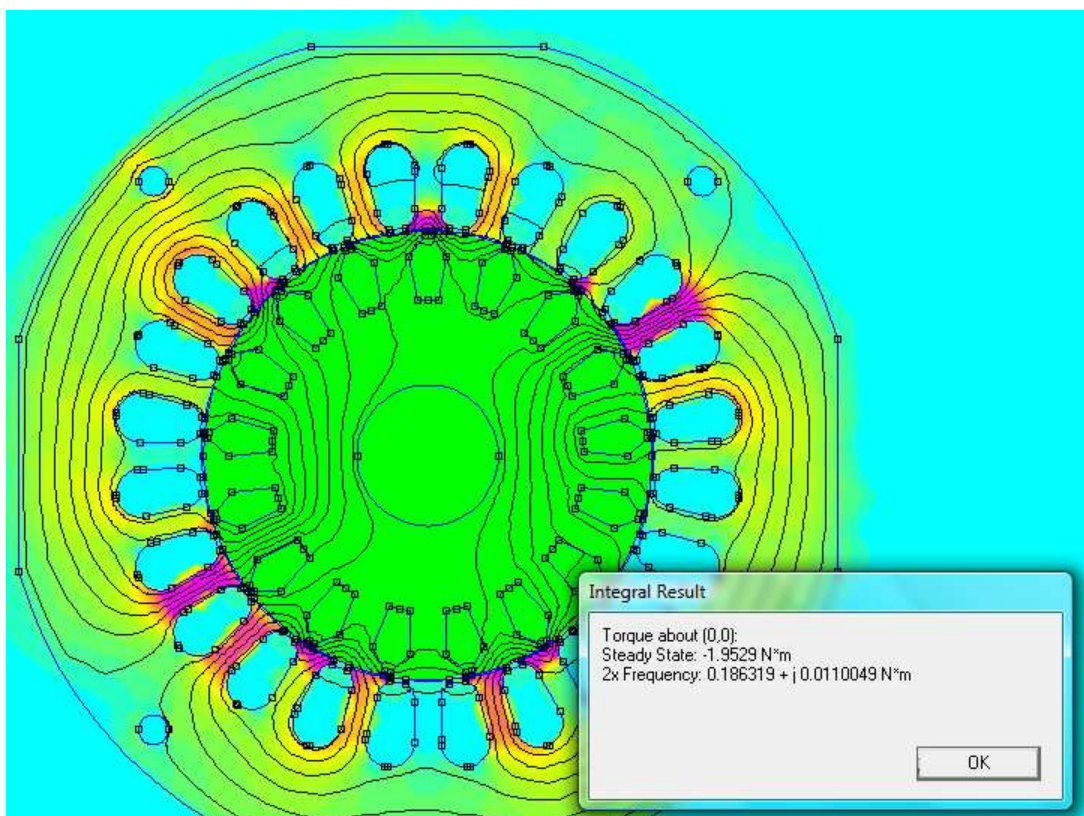
konkrétní druhy materiálů, definovat jednotlivá vinutí, počty a průměry závitů, definovat proudy vinutím, zadat šířku stroje a určit skluzovou frekvenci. Výsledkem modelu je rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře, v železe statoru i rotoru a velikost momentu na hřídeli motoru. Tyto parametry jsou patrné z následujících obrázků, na kterých vidíme velikosti magnetické indukce podle sytosti zbarvení a vypočtenou hodnotu momentu. Velikost momentu na hřídeli je -1.953Nm . Záporné znaménko značí opačný smysl působení. Simulace motoru byla provedena podle naměřených hodnot na reálném, výše analyzovaném motoru pro jeden bod zatížení. V tomto bodě byly změřeny proudy jdoucí do pomocného a hlavního vinutí stroje. Dále byl určen fázový posun mezi vinutími. Z naměřených otáček byla určena hodnota skluzové frekvence. Pro jednotlivé naměřené hodnoty proudů byl model simulován a jako kontrola správnosti simulovaného modelu nám může posloužit právě hodnota momentu, která se liší pouze o $0,3\text{Nm}$, což je zanedbatelná odchylka v našem případě.



Obrázek 3.6: Ukázka zadávaných parametrů modelu



Obrázek 3.7: Rozložení magnetické indukce

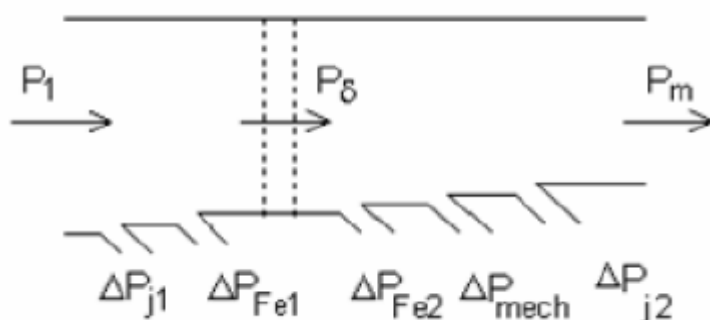


Obrázek 3.8: Výpočet momentu

4 ENERGETICKÁ BILANCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU

„Trend současné doby je zaměřen na snižování spotřeby elektrické energie. Jedním z významných hledisek, která mohou vést ke značným úsporám, je sledování účinnosti elektrických motorů. Účinnost η je poměr mezi mechanickým výkonem na hřídeli (P_2 nebo P_{mech}) a elektrickým příkonem na svorkách statorového vinutí (P_1). Větší účinnost znamená, že motor přeměňuje elektrický příkon na mechanický výkon s menšími ztrátami. Tento údaj o motoru tak může být rozhodujícím o pořízení nového motoru. Účinnost motoru je natolik významným pojmem, že v současné době probíhají i některé změny v legislativě. Cílem je stanovení pravidel pro výrobce a spotřebitele tak, aby technicko-ekonomické posuzování bylo sjednocené a jasně definované”. [4]

Ztráty v procesu přeměny elektrické energie na mechanickou způsobují oteplování motoru. Účinnost motoru tedy závisí na ztrátách motoru. Účinnost asynchronního motoru se odvíjí od velikosti ztrát. Proto minimalizací ztrát dosáhneme vyšší účinnosti asynchronního motoru. Ztráty dělíme do tří základních skupin a to ztráty ve vinutí (v mědi), ztráty v železe a ztráty mechanické. V některých výpočtech se uvádějí ještě ztráty dodatečné, ale ty nemají na výpočet indukčnosti podstatný vliv.



Obrázek 4.0: Energetická bilance asynchronního motoru [5]

P_1 – příkon motoru

P_δ – výkon ve vzduchové mezeře

P_m – mechanický výkon

ΔP_{j1} – ztráty ve vinutí statoru

ΔP_{Fe1} – ztráty v železe statoru

ΔP_{Fe2} – ztráty v železe rotoru

ΔP_{mech} – mechanické ztráty

ΔP_{j2} – ztráty ve vinutí rotoru

4.1 Výpočet ztrát a účinnosti

Při zanedbání ztrát v železe rotoru ΔP_{Fe2} a ztrát mechanických ΔP_{mech} platí pro výkon ve vzduchové mezeře P_δ mezi statorem a rotorem:

$$P_\delta = P_m + \Delta P_{j2} \quad (4.0)$$

Pro výkon platí:

$$\omega_s M = \omega M + \Delta P_{j2} \quad (4.1)$$

Ztráty ve vinutí rotoru jsou úměrné skluzu.

$$\Delta P_{j2} = M\omega_s - M\omega = M\omega_s \left(1 - \frac{\omega}{\omega_s}\right) = P_\delta s \quad (4.3)$$

Mechanický výkon na hřídeli:

$$P_m = P_\delta (1-s) \quad (4.4)$$

Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (4.5)$$

Ztráty v klecovém vinutí rotoru nakrátko:

$$\Delta P_{j2} = Q_2 R_2 I_2^2 \quad (4.6)$$

Ztráty v železe statoru (hlavní):

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \left(k_{dj} B_{j1}^2 \pi (D_{j1} - h_{j1}) h_{j1} l_{Fe1} k_{Fe} \gamma + k_{dz} B_{z1av}^2 h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe} k_{Fe} \gamma_{Fe}\right) \quad (4.7)$$

β - exponent závislý na druhu oceli

$\Delta p_{1,0}$ - měrné ztráty v železe

k_{dj} - činitel nerovnoměrnosti rozložení toku v magnetickém obvodu

k_{dz} - činitel vlivu technologie výroby statorového svazku

B_{j1} - indukce ve jhu

B_{z1av} - střední indukce v zubech statoru

h_{j1} - výška jha statoru

h_{z1} - výpočtová výška zubu statoru

b_{z1av} - střední šířka zubu statoru

γ_{Fe} - měrná hustota oceli

k_{fe} - činitel plnění železa

Q_1 - počet drážek statoru

Q_2 - počet drážek rotoru

m_1 - počet fází

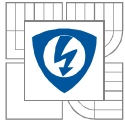
l_{Fe} - délka železa stroje

f_1 - frekvence

Povrchové ztráty ve statoru:

$$\Delta P_{\delta p1} = \Delta p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe1} \quad (4.8)$$

$$\Delta p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} (Q_2 n)^{1,5} (B_{01} t_{d2})^2 \quad (4.9)$$



Povrchové ztráty v rotoru:

$$\Delta P_{\delta p2} = \Delta p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 l_{Fe2} \quad (4.10)$$

$$\Delta p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} (Q_1 n)^{1,5} (B_{02} t_{d1})^2 \quad (4.11)$$

t_d - drážková rozteč

b - šířka drážky

Q - počet drážek

l_{Fe} - délka železa stroje

B - magnetická indukce

k - činitel (1,7 – 2)

Pulsační ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left[\frac{(b_{02} / \delta)^2}{1000} \times \frac{5 + b_{02}}{2t_{d1}} \times B_{z1av} \right]^2 h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe} k_{Fe} \gamma_{Fe} \quad (4.12)$$

Pulsační ztráty v rotoru:

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left[\frac{(b_{01} / \delta)^2}{1000} \times \frac{5 + b_{01}}{2t_{d2}} \times B_{z2av} \right]^2 h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe} k_{Fe} \gamma_{Fe} \quad (4.13)$$

δ - velikost vzduchové mezery

h_{z2} - výška zubu rotoru

b_{z2av} - střední šířka zubu rotoru

Dodatečné ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} \quad (4.14)$$

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} \quad (4.15)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_{mech} \approx K_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \times (10D)^3 \quad (4.16)$$

n - otáčky motoru

D - průměr

K_T - činitel (nabývá hodnoty 5 pro $2p = 2$ a hodnoty 6 u ostatních motorů)

Celkové ztráty asynchronního motoru:

$$\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{dod} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad (4.17)$$

Účinnost asynchronního motoru

$$\eta = \frac{P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P} \quad (4.18)$$

4.2 Ztráty mechanické

Tyto ztráty lze dále dělit do dvou základních skupin a to ztráty ventilační a ztráty způsobené třením. Ventilační ztráty jsou způsobené rotačním pohybem rotoru uvnitř statoru. Na rotoru bývají zpravidla namontovány nebo přímo odlity ventilátory, kvůli chlazení, které tyto ztráty ještě zvětšují. Ventilační ztráty jsou tedy způsobeny brzděním rotoru o vzduch, tedy se jedná o aerodynamický odpor, který je závislý na vyšší mocnině otáček. Ztráty třením jsou způsobeny pohybem rotoru v ložiskách. Ztráty třením v ložiskách jsou u zaběhnutého motoru a při stálé teplotě prakticky lineárně závislé na otáčkách motoru. Volbou vhodných ložisek a chlazení se tedy dají mechanické ztráty značně omezit, avšak nemůže jít omezení mechanických ztrát na úkor životnosti motoru.

4.3 Ztráty v železe

Určují se obtížně a s menší přesností, protože materiál, ze kterého je tvořen magnetický obvod, má nelineární magnetizační charakteristiky. Ztráty v železe můžeme rozdělit na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Tyto ztráty lze určit ze znalosti hysterezní materiálové konstanty, magnetické indukce, frekvence, hmotnosti a činitele charakterizujícího druh materiálu. Pokud se snažíme tyto ztráty eliminovat na co nejmenší hodnotu, musíme nahradit plechy statoru a rotoru kvalitnějšími materiály. Jako další možnost snížení ztrát v železe je použití užších statorových i rotorových plechů. Valná většina dnes vyráběných asynchronních motorů využívá plechy o tloušťce 0,5mm, pokud by došlo k výměně za plechy o tloušťce 0,35mm, což jsou plechy běžně používané pro výrobu transformátorů, došlo by k snížení ztrát v železe. Ale zde se dostáváme do rozporu s náročností výroby svazku plechů, ať pro stator nebo rotor motoru.

4.4 Ztráty ve vinutí statoru a rotoru

Tyto ztráty lze určit ze znalosti proudové hustoty v drážce, proudu procházejícího vodiči drážky, z počtu závitů v drážce, z rozměrů drážky, měrného odporu materiálu vinutí a délky vinutí. Obecně však platí, že celkové ztráty v mědi můžeme vypočítat ze vztahu platného pro všechny elektrické motory. Zde je nějaký druh inovace prakticky nemožný, tedy alespoň ve statorovém vinutí. V rotorovém vinutí je možné ztráty do jisté míry omezit, a to konkrétně u motorů s kotvou nakrátko. U takovýchto motorů se nahrazují běžně použité tyče, vyrobené metodou tlakového lití hliníku, měděnými tyčemi. Tato metoda však dosahuje lepších výsledků u motorů vyšších výkonů.

Ztráty v mědi:

$$\Delta P_{cu} = \rho_{cu} \times J^2 \times V_{cu} \quad (4.19)$$

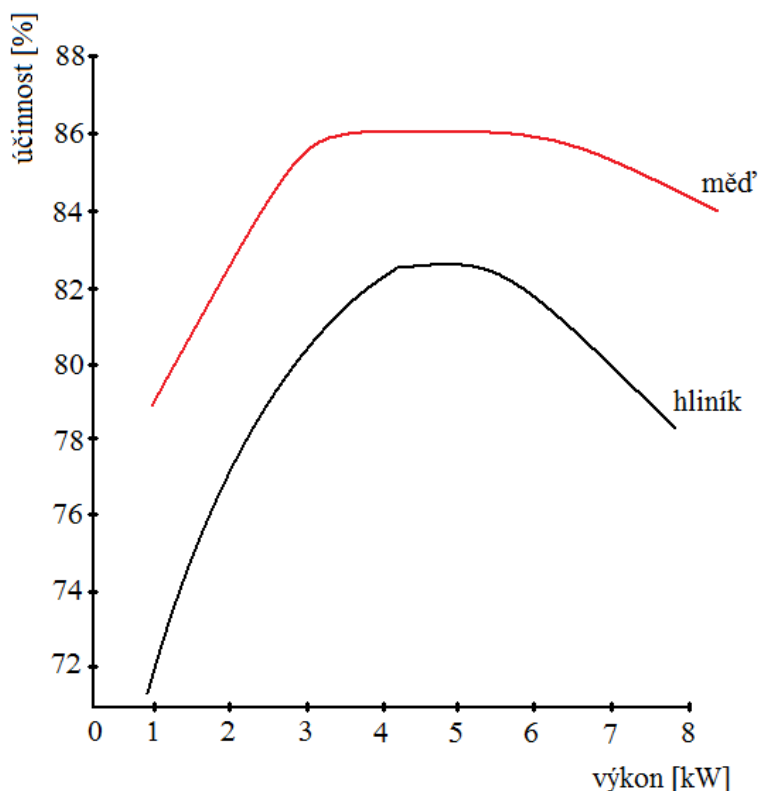
ρ_{cu} - měrný odpor mědi

J^2 - proudová hustota

V_{cu} - celkový objem mědi

4.4.1 Motory využívající měděných rotorů

Třífázové střídavé asynchronní motory dosahují za dlouhou etapu vývoje velmi vysoké účinnosti, avšak její další zvyšování je stále možné. Jedním z posledních trendů zvyšování účinnosti je použití měděného rotoru namísto rotoru hliníkového. Parametrem, který dosáhne tímto krokem zlepšení, není pouze účinnost, ale také provozní chování motoru a úspora energie. Jedinou nevýhodou je náročnost technologického postupu a tím zvýšení nákladů na výrobu, avšak tyto zvýšené náklady jsou mizivé oproti úsporám energie spotřebované chodem motoru. Tato úspora nabývá větších hodnot pro motory větších výkonů, jak je patrné z grafu, kde je vyobrazena účinnost stejného motoru s použitím hliníkového a měděného rotoru.



Obrázek 4.1: Účinnost hliníkového a měděného rotoru

„Při technickém využití jsou v praxi v současné době aplikovány pouze dva materiály vodičů. Pro odlévání klecového rotoru nakrátko byl doposud volen hliník, protože jeho teplota tání je pouhých 660 °C (měď, dosud jen jako teoretická alternativa, až při 1 083 °C). Protože však měď má o 35 % lepší vodivost, byla vyvinuta forma, v níž je možné dosáhnout výrazně vyšších odlévacích teplot při současné požadované ekonomické době života. Na Hannover Messe 2003 představila firma SEW Eurodrive první řadu motorů s novým druhem rotorů. Lepší měrná vodivost mědi přispívá ke snižování ztrát, poskytuje však ještě další výhody.“ [6]



Obrázek 4.2: Asynchronní motor s měděným rotorem od firmy siemens [7]

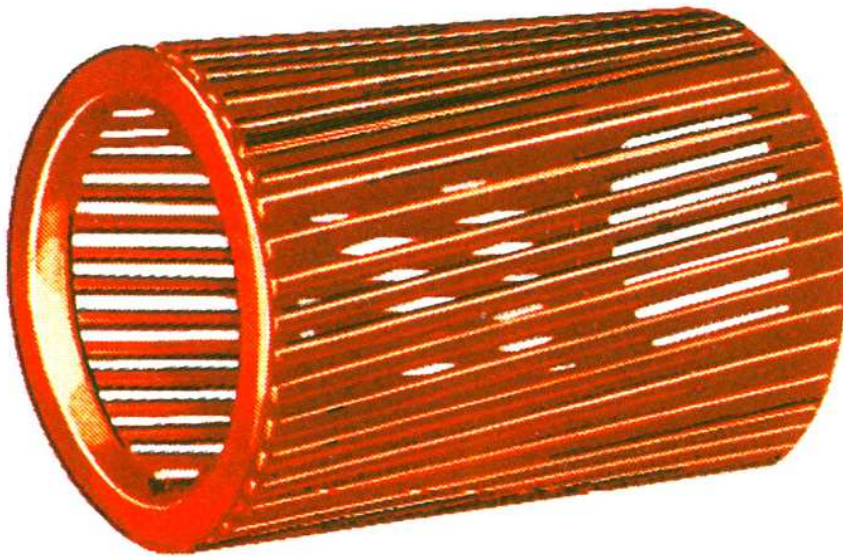
4.5 Ztráty přídavné

„Měřením na asynchronních motorech bylo zjištěno, že se na motoru nevyskytují pouze ztráty v železe a mědi, ale také další ztráty, závislé na zatížení motoru. Tyto ztráty se nazývají přídavnými. Určují se měřením, jako rozdíl ztrát daných z diferencí příkonu, výkonu a součtu dílčích ztrát naprázdno a nakrátko. Původně byly tyto ztráty odhadnuty na 0,5% výkonu a toto číslo bylo převzato do řady norem. Přená měření však ukázala, že tato hodnota odpovídá strojům s kroužkovou kotvou, kdežto u motorů s kotvou nakrátko mohou tyto přídavné ztráty dosáhnout mnohem vyšších hodnot (normálně 1-2%, výjimečně až 5%). Fyzikální příčinou těchto ztrát jsou vyšší harmonické síly, které vyvolávají takzvané povrchové a pulsační ztráty. U kotev nakrátko se pak ještě vyskytují při rovných tyčích přídavné ztráty v kleci a při šikmých neizolovaných tyčích ztráty vlivem proudů, tekoucích železem rotoru napříč od jedné tyče ke druhé.“[4]

Takže jak už bylo řečeno, mezi ztráty přídavné patří obvykle ztráty vířivého charakteru a jsou způsobovány rozptylovými toky prostorových harmonických, nerovnoměrnostmi ve vzduchové mezeře a pulzací toku. Definovat přídavné ztráty je dosti složité.

4.5.1 Vliv zešikmení drážek na přídavné ztráty

Zešikmením rotorových drážek o jednu statorovou rozteč, lze potlačit parazitní momenty, vyvolané stupňovými harmonickými. Stejným způsobem můžeme prakticky úplně zrušit přídavné ztráty v klecové kotvě, které jsou způsobeny při chodu naprázdno otevřením statorových drážek a při zatížení stupňovými harmonickými. Podle úvah se uplatní vliv zešikmených drážek pouze tehdy, jsou-li tyče rotoru zcela izolovány od železa rotoru. Jsou-li tyče neizolované, dosáhnou přídavné ztráty stejných hodnot jako u nezešikmených drážek.



Obrázek 4.3: Rotor s klecovým vinutím a zešikmenými drážkami [8]

4.6 Vliv konstrukce motoru na jeho účinnost

„Při návrhu motoru je nutné z konstrukčního hlediska zvážit vliv všech výše uvedených prvků, přičemž základním omezením je normami definovaná velikost kostry. Ztráty v železe lze ovlivnit použitím kvalitních materiálů, ztráty ve vinutí rotoru lze snížit zvětšením rozměrů tyčí a kruhů, což vede ke snížení odporu. Na ztráty ve statorovém vinutí má vliv návrh rozměrů drážky a tloušťka izolace – zmenší-li se, lze zvýšit průřez vodičů ve statoru. Mechanické ztráty dané odporem vzduchu a ztráty třením v ložiskách mohou být redukovány částečně výběrem kvalitních ložisek a těsnění a zvláště optimalizovaným návrhem chladicího ventilátoru. Motor s větší účinností má menší ztráty, proto může mít menší ventilátor, což vede rovněž ke snížení hladiny hluku. Významným prvkem pro návrh motoru je velikost vzduchové mezery mezi rotorem a státorem. Větší vzduchová mezera snižuje výrobní náklady. Všeobecně menší vzduchová mezera zlepšuje účinnost a účinník motoru. Extrémní zmenšování rozměrů vzduchové mezery vede dokonce k ještě lepšímu účinníku. Účinnost pod určitou hranici vzduchové mezery začne naopak klesat a navíc je třeba posoudit vibrace motoru.“ [4]

4.7 Další výhody použití motorů s větší účinností

„Při použití kvalitních materiálů a menšího ventilátoru přinášejí motory s větší účinností kromě úspor ve spotřebě elektrické energie také delší dobu životnosti, menší nároky na údržbu, menší hlučnost a rovněž snížení emisí CO₂. Elektrické motory jsou stále tažným koněm průmyslu a představují kolem 65 % spotřeby elektrické energie. Použití motorů s větší účinností se jistě vyplatí, neboť náklady na spotřebu elektrické energie během jejich životnosti jsou stokrát vyšší než náklady na jejich pořízení.“ [4]

5 NÁVRH FUNKČNÍHO VZORKU MOTORU

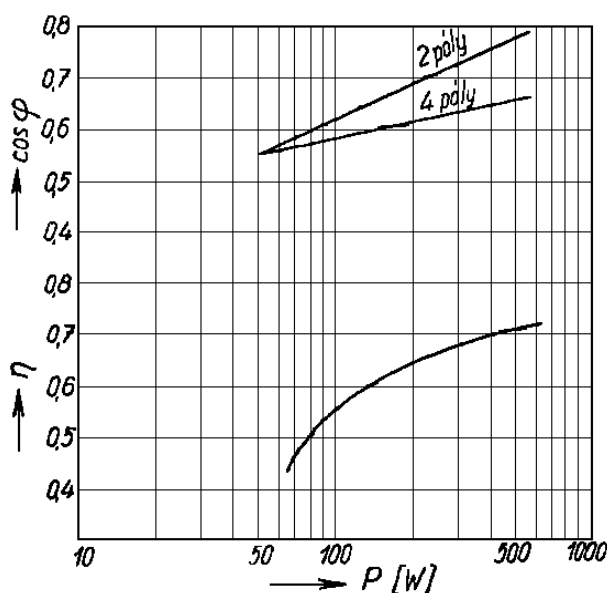
V této kapitole bude proveden pokusný výpočet návrhu jednofázového asynchronního motoru s pomocným vinutím. Jako prvek pro posun fáze bude nastálo zapojen kondenzátor v pomocné fázi. Výkon motoru je volen 550W stejně tak jako u analyzovaného motoru od firmy Atas Náchod.

Postup a metodika návrhu asynchronního motoru s pomocnou fází vychází a je čerpána z literatury [12] a [13].

P	0,55	kW
2p	4	[-]
U ₁	230	V
f	50	Hz

Tabulka 5.0: Výchozí parametry motoru

Nejprve je nutné určit hodnotu účinníku a účinnosti z následujícího grafu.



Obrázek 5.0: Závislost účinníku a účinnosti na výkonu motoru [13]

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$\eta = 0,72$$

Dále určíme úbytek napětí ε ve stroji z tabulky 5.1.

2p	2	4	6	8	10	12	16	20
ε [V]	0,032	0,04	0,048	0,056	0,065	0,072	0,09	0,105

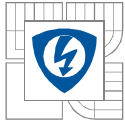
Tabulka 5.1: Úbytek napětí v závislosti na počtu pólů

$$\varepsilon = 0,04 \text{ V}$$

Vnitřní zdánlivý výkon stroje:

$$S_i = \frac{P(1-\varepsilon)}{\eta \cdot \cos\varphi} = \frac{550 \cdot (1-0,04)}{0,72 \cdot 0,8} = 916, \bar{6} \text{ VA}$$

(5.0)



Metoda návrhu asynchronního motoru vychází z výpočtu třífázového motoru, ale s větším výkonem. Tudíž musíme výkon jednofázového stroje zvětšit o 50%.

Odpovídající výkon 3f stroje:

$$S_3 = 1,5 \cdot S_i = 1,5 \cdot 916,6 = 1375 \text{VA} \quad (5.1)$$

Vrtání statoru:

$$D = (6,7 + 2p) \cdot S_3^{0,29} = (6,7 + 4) \cdot 1375^{0,29} = 87 \text{mm} \quad (5.2)$$

Amplituda magnetické indukce ve vzduchu:

$$B_\delta = 0,39 \cdot S_3^{0,05} = 0,39 \cdot 1375^{0,05} = 0,56 \text{T} \quad (5.3)$$

Konstantu C_A určíme podle počtu pólů z tabulky 5.2.

2p	2	4	6	8	10	12	16	20	24	32	40
C_A [-]	6200	7400	7850	7940	7960	7800	7600	7350	7100	6500	6200

Tabulka 5.2: Konstanta C_A podle počtu pólů

$$C_A = 7400$$

Intenzita proudové vrstvy obvodu stroje:

$$A = C_A \cdot S_3^{0,15} = 7400 \cdot 1375^{0,15} = 21876,46 \text{A/m} \quad (5.4)$$

Činitel plnění pólové křivky:

$$\alpha = 0,815 \cdot S_3^{-0,012} = 0,815 \cdot 1375^{-0,012} = 0,75[-] \quad (5.5)$$

Pólová rozteč:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 87}{4} = 68,33 \text{mm} \Rightarrow 68 \text{mm} \quad (5.6)$$

Velikost skutečného proudu motoru I_1 vypočteme z požadovaných parametrů uvedených v tabulce 5.0.

Skutečný proud motoru:

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{550}{230 \cdot 0,72 \cdot 0,8} = 4,15 \text{A} \quad (5.7)$$

Proud náhradního 3f motoru:

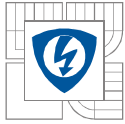
$$I_3 = \frac{1,5 I_1}{3} = \frac{1,5 \cdot 4,15}{3} = 2,08 \text{A} \quad (5.8)$$

Počet závitů v sérii:

$$N_{s1} = \frac{\pi D A}{6 I_3} = \frac{\pi \cdot 0,087 \cdot 21876,46}{6 \cdot 2,08} = 479,11 \Rightarrow 480[-] \quad (5.9)$$

Musíme odhadnout činitele vinutí k_v .

$$k_v = 0,8$$



Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_1 \cdot (1 - \varepsilon)}{\pi \sqrt{2} k_v f N_{S1}} = \frac{230 \cdot (1 - 0,04)}{\pi \sqrt{2} \cdot 0,8 \cdot 50 \cdot 480} = 2,59 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (5.10)$$

Efektivní délka železa:

$$L_e = \frac{\Phi}{\alpha \tau_p B_\delta} = \frac{2,59 \cdot 10^{-3}}{0,75 \cdot 0,068 \cdot 0,56} = 0,0907 \text{ m} \Rightarrow 90,7 \text{ mm} \Rightarrow 91 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Přibližná délka čela:

$$l_c = 1,5 \tau_p = 1,5 \cdot 68 = 102 \text{ mm} \quad (5.12)$$

Z vnitřního zdánlivého výkonu stroje, lze určit přibližnou hodnotu ztrát v mědi statoru, tedy velikost ztrát vinutí statoru.

Ztráty v mědi statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = 0,42 \cdot S_i^{0,75} = 0,42 \cdot 916,6^{-0,75} = 69,97 \text{ W} \quad (5.13)$$

Odpor vinutí:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{Cu1}}{I_1^2} = \frac{69,97}{4,15^2} = 4,06 \Omega \quad (5.14)$$

Pro další výpočty musíme stanovit rezistivitu mědi ρ_{Cu} .

$$\rho_{Cu} = 0,021 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$$

Průřez drátu:

$$S_1 = \frac{2 \rho_{Cu} (L_e + l_c) N_{S1}}{R_1} = \frac{2 \cdot 0,021 (0,091 + 0,102) \cdot 480}{4,06} = 0,96 \text{ mm}^2 \quad (5.15)$$

Průměr drátu:

$$d_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_1}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,96}{\pi}} = 1,10 \text{ mm} \quad (5.16)$$

Pro výpočet je nutné počítat s tloušťkou smaltu t_s na vodičích, tato tloušťka se nejčastěji volí v rozmezí od 0,05mm do 0,08mm

$$t_s = 0,05 \text{ mm}$$

Průřez drátu se smaltováním:

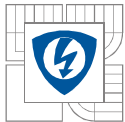
$$S_{p1} = \pi \cdot \left(\frac{d_1 + t_s}{2} \right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{1,1 + 0,05}{2} \right)^2 = 1,04 \text{ mm}^2 \quad (5.17)$$

Pro výpočet je dále velice důležité určit počet drážek statoru Q_1 . Počet drážek byl zvolen totožný s počtem drážek analyzovaného motoru v kapitole 3.

$$Q_1 = 24$$

Dále je zapotřebí určit kolik drážek bude určeno pouze pro hlavní vinutí. Tento údaj se značí q_g a opět vycházím z analyzovaného motoru.

$$q_h = 16$$



Ze znalosti počtů drážek a počtu závitů, může být určen počet závitů do drážek.

Počet vodičů v drážce:

$$n_{d1} = \frac{2 \cdot N_{s1}}{q_h} = \frac{2 \cdot 480}{16} = 60[-] \quad (5.18)$$

Do středních drážek pólu se vkládá n_{d1} závitů, což je v našem případě dvě drážky na pól po n_{d1} závitěch, do sousedních dvou po n_{d2} a do dalších dvou po n_{d3} . V průběhu výpočtu budou známy i počty závitů pomocným vinutí a tam bude přesné rozložení závitů vyjasněno přesněji.

Počet vodičů v drážce:

$$n_{d2} = n_{d1} \cdot \frac{\cos 45^\circ}{\cos 15^\circ} = 60 \cdot \frac{\cos 45^\circ}{\cos 15^\circ} = 43,92 \Rightarrow 44[-] \quad (5.19)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_{d3} = n_{d1} \cdot \frac{\cos 75^\circ}{\cos 15^\circ} = 60 \cdot \frac{\cos 75^\circ}{\cos 15^\circ} = 16,07 \Rightarrow 16[-] \quad (5.20)$$

Činitel vinutí:

$$k_v = \frac{n_{d1} \cdot \cos 15^\circ + n_{d2} \cdot \cos 45^\circ + n_{d3} \cdot \cos 75^\circ}{n_{d1} + n_{d2} + n_{d3}} = \frac{60 \cdot \cos 15^\circ + 44 \cdot \cos 45^\circ + 16 \cdot \cos 75^\circ}{60 + 44 + 16} = 0,77 \quad (5.21)$$

Drážková rozteč statoru:

$$t_{3s} = \frac{\pi D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 87}{24} = 11,39 \text{ mm} \quad (5.22)$$

Pro další výpočty musím vycházet ze znalosti materiálů, z kterých bude statorový plech vyráběn. V tomto případě volím stejnou magnetickou indukci v zubu statoru B_{zs} jako v literatuře.

$$B_{zs} = 1,6 \text{ T}$$

Dále je zapotřebí určit k_1 , což je konstanta zohledňující plnění plechů

$$k_1 = 0,9$$

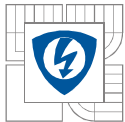
Šířka zubu statoru:

$$b_{zs} = t_{3s} \frac{B_\delta}{k_1 \cdot B_{zs}} = 11,39 \cdot \frac{0,56}{0,9 \cdot 1,6} = 4,43 \text{ mm} \quad (5.23)$$

Magnetickou indukci ve jhu statoru volíme stejnou jako v zubu statoru. Dále musíme zvolit parametry drážky statoru.

B _{js}	1,6	T	magnetická indukce ve jhu statoru
h _s	20,6	mm	hloubka statorové drážky
h _{ms}	0,6	mm	výška můstku na statoru
t _{dr}	0,7	mm	tloušťka izolace statorové drážky

Tabulka 5.3: Parametry drážky statoru



Ze zvolených parametrů drážky a magnetické indukce ve jhu satoru lze vypočítat výška jha satoru.

Výška jha satoru:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2L_e \cdot 0,9B_{js}} = \frac{2,59 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,091 \cdot 0,9 \cdot 1,6} = 0,00997m \Rightarrow 9,97mm \quad (5.24)$$

Vnější průměr plechů:

$$D_e = D + 2h_s + 2h_{js} = 87 + 2 \cdot 20,6 + 2 \cdot 9,97 = 148,14mm \Rightarrow 148mm \quad (5.25)$$

Jako následující parametr je zapotřebí zvolit velikost vzduchové mezery δ . Chceme, aby tento parametr dosáhl co nejmenší velikosti, ale musíme brát v potaz mechanické rozpory. Jako je třeba výchylka rotoru od osy stroje a následný kontakt rotoru se statorem.

Stejně tak jak jsme zvolili počet drážek na satoru, zvolíme i počet drážek na rotoru Q_2 .

$$Q_2 = 17$$

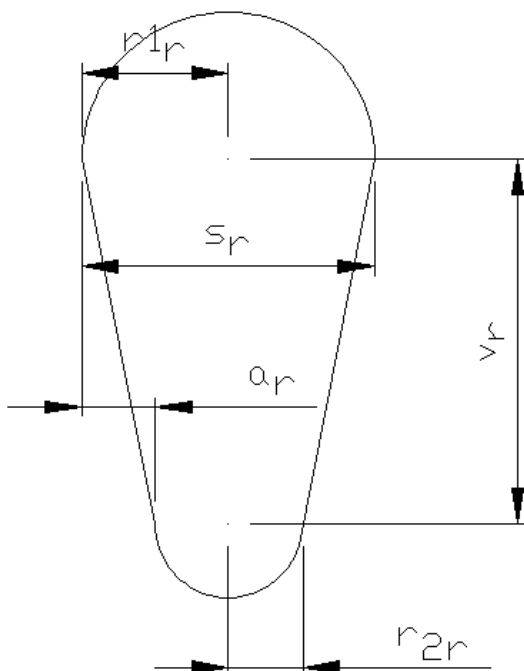
Šířka zubu rotoru:

$$b_{zr} = (1 - \varepsilon) \cdot b_{zs} \cdot \frac{Q_1}{Q_2} = (1 - 0,04) \cdot 4,43 \cdot \frac{24}{17} = 6,00mm \quad (5.26)$$

Jako další parametry volím geometrické rozměry drážky rotoru.

hr	16,6	mm	hloubka drážky rotoru
hmr	0,6	mm	výška můstku na rotoru
dhr	20	mm	průměr hřídele pod plechy
r_{1r}	4	mm	
r_{2r}	2	mm	
s_r	8	mm	
v_r	10	mm	
a_r	2	mm	

Tabulka 5.4: Parametry drážky rotoru



Obrázek 5.1: Rozměry rotorové drážky

Ze známých parametrů rotorové drážky je zapotřebí vypočítat průřez drážky.

Průřez rotorové tyče:

$$S_t = \frac{\pi \cdot r_{1r}^2}{2} + \frac{\pi \cdot r_{2r}^2}{2} + \left(s_r \cdot v_r - 2 \cdot \frac{a_r \cdot v_r}{2} \right) = \frac{\pi \cdot 4^2}{2} + \frac{\pi \cdot 2^2}{2} + \left(8 \cdot 10 - 2 \cdot \frac{2 \cdot 10}{2} \right) = 91,42 \text{ mm}^2 \quad (5.27)$$

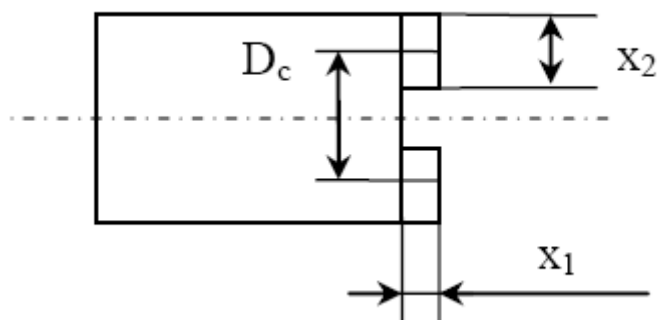
Průřez kruhů:

$$S_c = S_t \frac{Q_2}{2p\pi} = 91,42 \frac{17}{4\pi} = 123,67 \text{ mm}^2 \quad (5.28)$$

Drážková rozteč rotoru:

$$t_{3r} = \frac{\pi \cdot (D - 2\delta)}{Q_2} = \frac{\pi \cdot (87 - 2 \cdot 0,2)}{17} = 16,00 \text{ mm} \quad (5.29)$$

Z následujícího obrázku je vidět, že pro další výpočty musíme zvolit velikosti x_1 a x_2 .



Obrázek 5.2: Kruh rotoru [13]

$$x_1 = 5\text{mm}$$

$$x_2 = 20\text{mm}$$

Dalším parametrem, který musí být zvolen je otevření statorové drážky b_{3s} .

$$b_{3s} = 2,3\text{mm}$$

Stejně tak jako u rotoru je určena vzdálenost mezi zuby rotoru, neboli tzv. otevření rotorové drážky b_{3r} .

$$b_{3r} = 0,9\text{mm}$$

Carterův činitel pro stator:

$$k_{cs} = \frac{t_{3s}}{t_{3s} + \delta - 0,75 \cdot b_{3s}} = \frac{11,39}{11,39 + 0,2 - 0,75 \cdot 2,3} = 1,15[-] \quad (5.30)$$

Carterův činitel pro rotor:

$$k_{cr} = \frac{t_{3r}}{t_{3r} + \delta - 0,75 \cdot b_{3r}} = \frac{16}{16 + 0,2 - 0,75 \cdot 0,9} = 1,03[-] \quad (5.31)$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru:

$$U_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} k_{cs} k_{cr} \delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,56 \cdot 1,15 \cdot 1,03 \cdot 0,0002 = 212,26\text{A} \quad (5.32)$$

Délka indukční čáry v zubu statoru:

$$h_{ys} = h_{1s} - \frac{r_{1s} + r_{2s}}{2} = 20 - \frac{6 + 4}{2} = 15\text{mm} \quad (5.33)$$

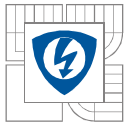
Hodnota H_{zs} , což je intenzita magnetického pole v zubu statoru, odpovídá magnetické indukci B_{zs} . Tuto hodnotu si mohou určit pomocí následující tabulky.

B [T]	1,6	1,07	0,53
H [A/m]	3500	360	140

Tabulka 5.5: Velikost intenzity závislá na magnetické indukci

Magnetické napětí pro zuby statoru:

$$U_{zs} = 2 \cdot h_{ys} \cdot H_{zs} = 2 \cdot 0,015 \cdot 3500 = 105\text{A} \quad (5.34)$$



Střední intenzitu magnetického pole, lze vypočítat jako aritmetický průměr třech známých veličin intenzity.

Střední intenzita magnetického pole

$$H_{js} = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{3} = \frac{3500 + 360 + 140}{3} = 1333, \bar{3} \text{ A/m} \quad (5.35)$$

Délka indukční čáry:

$$l_{js} = \frac{\pi D_e}{2p} = \frac{\pi \cdot 148}{4} = 116,24 \text{ mm} \quad (5.36)$$

Magnetické napětí pro jho statoru:

$$U_{js} = l_{js} \cdot H_{js} = 0,116 \cdot 1333, \bar{3} = 154, \bar{6} \text{ A} \quad (5.37)$$

Pro další výpočty je uvažováno, že velikosti magnetické indukce v zubech statoru se rovnají velikostem magnetické indukce v zubech rotoru. Pak tedy platí: $B_{zr} = B_{zs} = 1,6 \text{ T}$ a $H_{zr} = H_{zs} = 3500 \text{ A/m}$.

Délka indukční čáry v zubu rotoru:

$$h_{yr} = h_{1r} - \frac{r_{1r} + r_{2r}}{2} = 16 - \frac{4 + 2}{2} = 13 \text{ mm} \quad (5.38)$$

Magnetické napětí pro zuby rotoru:

$$U_{zr} = 2 \cdot h_{yr} \cdot H_{zr} = 2 \cdot 0,013 \cdot 3500 = 91 \text{ A} \quad (5.39)$$

Z literatury lze převzít hodnoty pro střední magnetickou indukci ve jhu rotoru B_{jr} a střední intenzitu magnetického pole ve jhu rotoru H_{jr} .

$$B_{jr} = 0,85 \text{ T}$$

$$H_{jr} = 125 \text{ A/m}$$

Délka indukční čáry:

$$l_{jr} = \tau_p = 68 \text{ mm} \quad (5.40)$$

Magnetické napětí pro jho rotoru:

$$U_{jr} = l_{jr} \cdot H_{jr} = 0,068 \cdot 125 = 8,5 \text{ A} \quad (5.41)$$

Magnetomotorická síla pólové dvojice:

$$F_m = U_\delta + U_{zs} + U_{js} + U_{zr} + U_{jr} = 212,26 + 105 + 154, \bar{6} + 91 + 8,5 = 571,43 \text{ A} \quad (5.42)$$

Ze znalosti magnetomotorické síly můžeme určit velikost magnetizačního proudu.

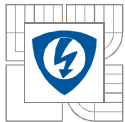
Magnetizační proud:

$$I_m = \frac{p \cdot F_m}{1,8 \cdot k_v \cdot N_{S1}} = \frac{2 \cdot 571,43}{1,8 \cdot 0,77 \cdot 480} = 1,72 \text{ A} \quad (5.43)$$

Pro následující výpočty je nezbytné znát hustotu statorového plechu γ .

$$\gamma = 7700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Dále pro určení ztrát v železe je zapotřebí znát hmotnost železa ve statoru.



Hmotnost zubů statoru:

$$m_{zs} = Q_1 \cdot h_s \cdot b_{zs} \cdot 0,9 \cdot L_e \cdot \gamma = 24 \cdot 0,0206 \cdot 0,0044 \cdot 0,9 \cdot 0,091 \cdot 7700 = 1,37 \text{ kg} \quad (5.44)$$

Střední průměr jha statoru:

$$D_s = D_e - h_{js} = 148,14 - 9,97 = 138,17 \text{ mm} \quad (5.45)$$

Hmotnost jha statoru:

$$m_{js} = \pi \cdot D_s \cdot h_{js} \cdot 0,9 \cdot L_e \cdot \gamma = \pi \cdot 0,01382 \cdot 0,0997 \cdot 0,9 \cdot 0,091 \cdot 7700 = 2,73 \text{ kg} \quad (5.46)$$

Magnetickou indukci v celém statoru uvažujeme konstantní $B_{cs} = 1,6 \text{ T}$. Výpočet ztrát v železe provedeme pomocí tzv. ztrátového činitele p_1 .

$$p_1 = 2,6 \text{ W/kg}$$

Ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = 3 \cdot p_1 \cdot B_{cs}^2 \cdot (m_{zs} + m_{js}) = 3 \cdot 2,6 \cdot 1,6^2 \cdot (1,37 + 2,73) = 81,87 \text{ W} \quad (5.47)$$

Z výkonu motoru vynásobeným koeficientem 0,08 dostáváme přibližné mechanické ztráty motoru.

Mechanické ztráty

$$\Delta P_m = 0,08 \cdot P = 0,08 \cdot 550 = 44 \text{ W} \quad (5.48)$$

Ztrátový proud

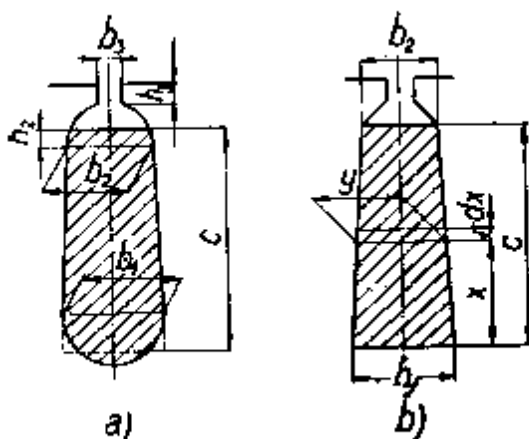
$$I_z = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_m}{U_1} = \frac{81,87 + 44}{230} = 0,55 \text{ A} \quad (5.49)$$

Následně volím rozměry statorové drážky, jejich parametry odpovídají značení na následujícím obrázku.

c	15	mm
b ₂	8	mm
b ₃	2,3	mm
h ₃	0,5	mm

délka indukční čáry v zubu statoru

Tabulka 5.6: Rozměry statorové drážky 1



Obrázek 5.3: Rozměry drážek [13]

Jednotková rozptylová vodivost statorové drážky:

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{b_3} + 0,524 - \frac{h_2}{b_2} + \frac{c}{3b_2} = \frac{0,5}{2,3} + 0,524 - 0 + \frac{15}{3 \cdot 8} = 1,37[-] \quad (5.50)$$

Průřez čisté mědi v drážce statoru:

$$S_{Cu} = S_{p1} \cdot n_{d1} = 1,04 \cdot 60 = 62,4 \text{ mm}^2 \quad (5.51)$$

Do statorové drážky se snažíme dostat co největší počet vodičů. Jelikož jsou závitky kruhového průřezu, nemůžeme uvažovat drážku plnou měděných vodičů. Z tohoto důvodu je zaveden tzv. činitel plnění k_p .

$$k_p = 0,4$$

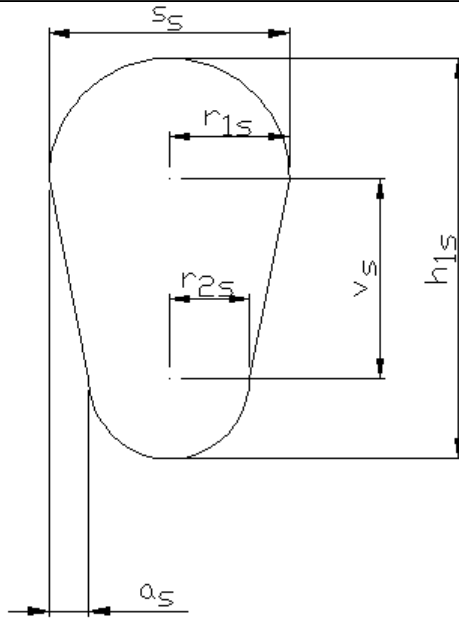
Průřez statorové drážky

$$S_{ds} = \frac{S_{Cu}}{k_p} = \frac{62,4}{0,4} = 156 \text{ mm}^2 \quad (5.52)$$

Zvolená statorová drážka má parametry uvedené v následující tabulce.

rozměr	r_{1s}	r_{2s}	v_s	s_s	a_s
[mm]	6	4	10	12	2

Tabulka 5.7: Rozměry statorové drážky 2



Obrázek 5.4: Rozměry statorové drážky

Tloušťka drážkové izolace t_{dr} nám určuje tloušťku izolace mezi vinutím a plechem statoru.

$$t_{dr} = 0,7\text{mm}$$

Průřez izolované statorové drážky:

$$S_{id} = \frac{\pi \cdot (r_{1s} - t_{dr})^2}{2} + \frac{\pi \cdot (r_{2s} - t_{dr})^2}{2} + \left(v_s \cdot (s_s - 2 \cdot t_{dr}) - 2 \cdot \frac{a_s \cdot v_s}{2} \right) = \frac{\pi \cdot (6 - 0,7)^2}{2} + \frac{\pi \cdot (4 - 0,7)^2}{2} + \left(10 \cdot (12 - 2 \cdot 0,7) - 2 \cdot \frac{2 \cdot 10}{2} \right) = 157,23\text{mm}^2 \quad (5.53)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$q_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{Q_1}{2p} = \frac{2}{3} \cdot \frac{24}{4} = 4[-] \quad (5.54)$$

Drážková reaktance:

$$X_{d1} = \frac{4\pi f N_{s1}^2}{pq_1} \mu_0 L_e \lambda_{d1} = \frac{4\pi 50 \cdot 480^2}{2 \cdot 4} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 90,7 \cdot 1,37 = 2,83\Omega \quad (5.55)$$

Rotorový proud:

$$I_2 = I_1 (1 - 2\varepsilon) \frac{2k_v N_{s1}}{Q_2} = 4,15 \cdot (1 - 2 \cdot 0,04) \frac{2 \cdot 0,777 \cdot 480}{17} = 167,52 \text{ [A]} \quad (5.56)$$

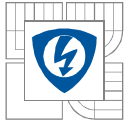
Jestliže je známa hodnota rotorového proudu, dostávám po jejím vynásobení číslem 5 velikost proudu nakrátko.

Proud nakrátko:

$$I_{2k} = 5 \cdot I_2 = 5 \cdot 167,52 = 837,60\text{A} \quad (5.57)$$

Následné výpočty vyžadují volbu magnetické indukce B_m .

$$B_m = 2\text{T}$$



Magnetický tok nasyceným můstkem:

$$\Phi_m = 0,9 \cdot L_e \cdot h_{mr} \cdot B_m = 0,9 \cdot 0,091 \cdot 0,0006 \cdot 2 = 9,83 \cdot 10^{-5} \text{ Wb} \quad (5.58)$$

Jednotková magnetická vodivost můstku:

$$\lambda_m = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2} \cdot I_{2k} \cdot \mu_0 \cdot L_e} = \frac{9,83 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{2} \cdot 837,6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,091} = 0,73[-] \quad (5.59)$$

Již dříve ve výpočtu byla stanovena velikost $b_{2r} = 8\text{mm}$ a dále musí být určen rozměr rotorové drážky c_r .

$$c_r = 13\text{mm}$$

Rozptylová vodivost rotorové drážky s můstkem:

$$\lambda_{d2} = \lambda_m + \frac{c_r}{3 \cdot b_{2r}} = 0,73 + \frac{0,013}{3 \cdot 0,008} = 1,27[-] \quad (5.60)$$

Volba počtu závitů v sérii N_{S2} , je vždy u klecového rotoru vždy rovna hodnotě 0,5.

$$N_{S2} = 0,5$$

Počet fází klece:

$$m_2 = \frac{Q_2}{p} = \frac{17}{2} = 8,5[-] \quad (5.61)$$

Další konstantou u klecového vinutí je q_2 , která se stejně jako počet závitů v sérii rovná 0,5.

$$q_2 = 0,5$$

Drážková reaktance:

$$X_{d2} = \frac{4\pi f \cdot N_{S2}^2}{pq_2} \mu_0 L_e \lambda_{d2} = \frac{4\pi \cdot 50 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 0,5} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,091 \cdot 1,27 = 2,28 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (5.62)$$

Přepočítací činitel:

$$\kappa = \frac{4pk_v^2 N_{S1}^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 0,777^2 \cdot 480^2}{17} = 65458,43[-] \quad (5.63)$$

Drážková reaktance přepočítaná na stator:

$$X_{d21} = \kappa \cdot X_{d2} = 65458,43 \cdot 2,28 \cdot 10^{-5} = 1,49\Omega \quad (5.64)$$

Jednotkovou vodivost rozptylu čel λ_c odečteme z následující tabulky.

Stator	Rotor	
	dvouvrstvé vinutí	klecové
soustředné dvoupatrové, rovnoběžná čela	0,336	0,334
soustředné dvoupatrové, vějířová čela	0,389	0,359
soustředné trojpatrové, rovnoběžná čela	0,310	0,304
soustředné trojpatrové, vějířová čela	0,315	0,329
jednovrstvé stejné cívky	0,326	0,318
dvouvrstvé stejné cívky drátové	0,286	0,269
dvouvrstvé tyčové	0,317	0,325

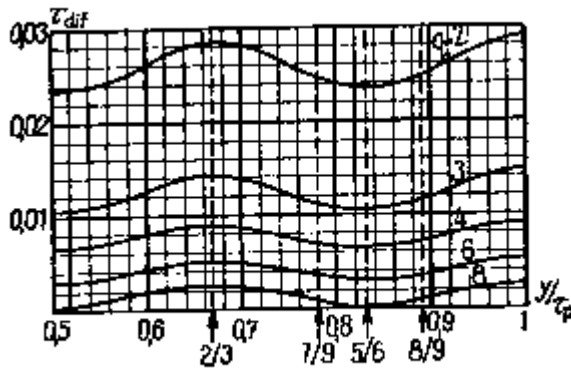
Tabulka 5.8: Střední hodnoty jednotkové vodivosti

$$\lambda_c = 0,318$$

Reaktance čel:

$$X_c = \frac{4\pi f \cdot N_{S1}^2}{p} \mu_0 l_c \lambda_c = \frac{4\pi \cdot 50 \cdot 480^2}{2} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,102 \cdot 0,318 = 2,95\Omega \quad (5.65)$$

Pro určení činitele diferenčního rozptylu statoru τ_{dif1} , použijeme graf.



Obrázek 5.5: Činitelé diferenčního rozptylu

Diferenční reaktance statoru:

$$X_{dif1} = \tau_{dif1} \cdot \frac{F_m}{U_\delta} \cdot \frac{U_1}{I_m} = 0,03 \cdot \frac{571,43}{212,26} \cdot \frac{230}{1,72} = 10,80\Omega \quad (5.66)$$

Činitel diferenčního rozptylu klece:

$$\tau_{dif2} = \frac{3,33}{m_2^2} = \frac{3,33}{8,5^2} = 0,046[-] \quad (5.67)$$

Diferenční reaktance rotoru:

$$X_{dif2} = \tau_{dif2} \cdot \frac{F_m}{U_\delta} \cdot \frac{U_1}{I_m} = 0,046 \cdot \frac{571,43}{212,26} \cdot \frac{230}{1,72} = 16,56\Omega \quad (5.68)$$

Reaktance hlavního vinutí v nenasyceném stavu:

$$X = X_{d1} + X_{d21} + X_c + X_{dif1} + X_{dif2} = 2,82 + 1,49 + 2,95 + 10,80 + 16,56 = 34,62\Omega \quad (5.69)$$

Odpor hlavního vinutí:

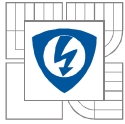
$$R_1 = \frac{2\rho_{Cu}(L_e + l_c)N_{S1}}{S_1} = \frac{2 \cdot 0,021 \cdot 10^{-6} \cdot (0,091 + 0,102) \cdot 480}{0,96 \cdot 10^{-6}} = 4,05\Omega \quad (5.70)$$

Jestliže chceme vypočítat odpor tyče klece R_t , je zapotřebí znát rezistivitu hliníku.

$$\rho_{Al} = 0,033 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$$

Odpor tyče klece:

$$R_t = \rho_{Al} \frac{L_e}{S_t} = 0,033 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,091}{91,42 \cdot 10^{-6}} = 3,38 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (5.71)$$



Průměr kruhu:

$$D_c = D - 2 \cdot \frac{x_2}{2} = 87 - 2 \cdot \frac{20}{2} = 67 \text{ mm} \quad (5.72)$$

Odpor kruhu:

$$R_c = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi D_c}{S_c} = 0,033 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi 0,067}{123,67 \cdot 10^{-6}} = 5,62 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (5.73)$$

Odpor fáze klece:

$$R_2 = \frac{1}{p} \left(R_t + 2R_c \frac{Q_2}{(2 \cdot p \cdot \pi)^2} \right) = \frac{1}{2} \left(3,38 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 5,62 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{17}{(2 \cdot 2 \cdot \pi)^2} \right) = 2,29 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (5.74)$$

Odpor fáze klece přepočítaný na stator:

$$R_{21} = \kappa \cdot R_2 = 65458,43 \cdot 2,29 \cdot 10^{-5} = 1,50 \Omega \quad (5.75)$$

Celkový odpor:

$$R_{c1} = R_1 + R_{21} = 4,05 + 1,50 = 5,55 \Omega \quad (5.76)$$

Nenasycená impedance:

$$Z = \sqrt{R_{c1}^2 + X^2} = \sqrt{5,55^2 + 34,62^2} = 35,06 \Omega \quad (5.77)$$

Nenasycený proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_1}{Z} = \frac{230}{35,06} = 6,56 \text{ A} \quad (5.78)$$

Při výpočtu reaktancí v nasyceném stavu, uvažujeme, že se diferenční reaktance zmenšuje na polovinu.

Nasycená reaktance:

$$X_n = X - \frac{1}{2}(X_{dif1} + X_{dif2}) = 34,62 - \frac{1}{2}(10,8 + 16,56) = 20,94 \Omega \quad (5.79)$$

Nasycená impedance:

$$Z_n = \sqrt{R_{c1}^2 + X_n^2} = \sqrt{5,55^2 + 20,94^2} = 21,66 \Omega \quad (5.80)$$

Nasycený proud nakrátko:

$$I_{kn} = \frac{U_1}{Z_n} = \frac{230}{21,66} = 10,62 \text{ A} \quad (5.81)$$

Výpočet parametrů a veličin rozběhového vinutí uvažuje záběrný proud stejný jako ve vinutí hlavním. Tento proud je určen pouze činným odporem, při zařazeném kondenzátoru.

Odpor rozběhového vinutí:

$$R_{r1} = \frac{U_1}{I_{kn}} - R_{21} = \frac{230}{10,62} - 1,5 = 20,16 \Omega \quad (5.82)$$

Dále platí rovnice:

$$a = \frac{N_{sr}}{S_r} = \frac{R_{r1}}{2\rho_{Cu}(L_e + l_c)} = \frac{20,16}{2 \cdot 0,021 \cdot 10^{-6} \cdot (0,091 + 0,102)} = 2,49 \cdot 10^9 \text{ m}^{-2} \quad (5.83)$$

Předpokládejme, že pro uložení rozběhové vinutí je k dispozici polovina prostoru pro vinutí hlavní.

Druhá rovnice:

$$b = N_{sr} \cdot S_r = 0,5 \cdot N_{S1} \cdot S_1 = 0,5 \cdot 480 \cdot 0,96 \cdot 10^{-6} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (5.84)$$

Řešením obou rovnic dostáváme:

$$N_{sr} = \sqrt{a \cdot b} = \sqrt{a \cdot b} = 756,77 \Rightarrow 757 \quad [-] \quad (5.85)$$

Průřez drátu:

$$S_r = \frac{b \cdot 10^6}{N_{sr}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6}{757} = 0,31 \text{ mm}^2 \quad (5.86)$$

Ze znalosti průřezu vodiče stanovíme průměr drátu.

Průměr drátu:

$$d_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_r}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,31}{\pi}} = 0,63 \text{ mm} \quad (5.87)$$

Nyní je možné z vypočteného průměru drátu pomocného vinutí, dopočítat jednotlivé počty závitů do zbývajících statorových drážek.

Počet vodičů v drážce:

$$n_{d4} = (n_{d1} - n_{d3}) \cdot \frac{2 \cdot N_{sr}}{N_{S1}} = (60 - 16) \cdot \frac{2 \cdot 757}{480} = 138,78 \Rightarrow 139 \quad (5.88)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_{d5} = (n_{d1} - n_{d2}) \cdot \frac{2 \cdot N_{sr}}{N_{S1}} = (60 - 44) \cdot \frac{2 \cdot 757}{480} = 50,46 \Rightarrow 50 \quad (5.89)$$

Počet drážek na pól a fázi rozběhového vinutí:

$$q_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{Q_1}{2p} = \frac{1}{3} \cdot \frac{24}{2 \cdot 2} = 2[-] \quad (5.90)$$

číslo drážky	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
p.z. hlavní vinutí	16	44	60	60	44	16	16	44	60	60	44	16
p.z. pomocné vinutí	124	45	-	-	45	124	124	45	-	-	45	124

Tabulka 5.9: Rozložení závitů do vinutí 1

číslo drážky	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
p.z. hlavní vinutí	16	44	60	60	44	16	16	44	60	60	44	16
p.z. pomocné vinutí	124	45	-	-	45	124	124	45	-	-	45	124

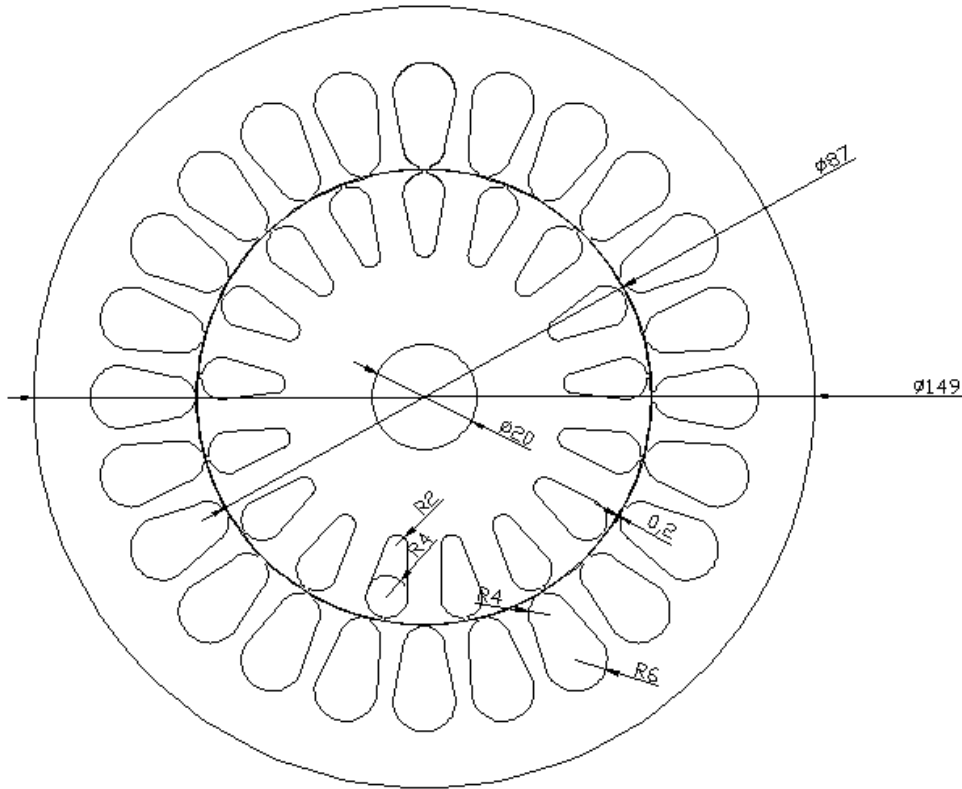
Tabulka 5.10: Rozložení závitů do vinutí 2

Jako poslední bod výpočtu je určení kapacity rozběhového kondenzátoru. Tento výpočet bude vycházet z empirického vztahu vyhledaného v literatuře [14]. Vztah zahrnuje konstantu k , která je závislá na napájecím napětí stroje. Vztah dále zahrnuje výkon P , který však není roven námi navrhovanému výkonu motoru, ale ekvivalentnímu výkonu motoru třífázového. Tudíž výkon jednofázového násobený dvěma. Výkon se dosazuje v kW a kapacita vychází v μF .

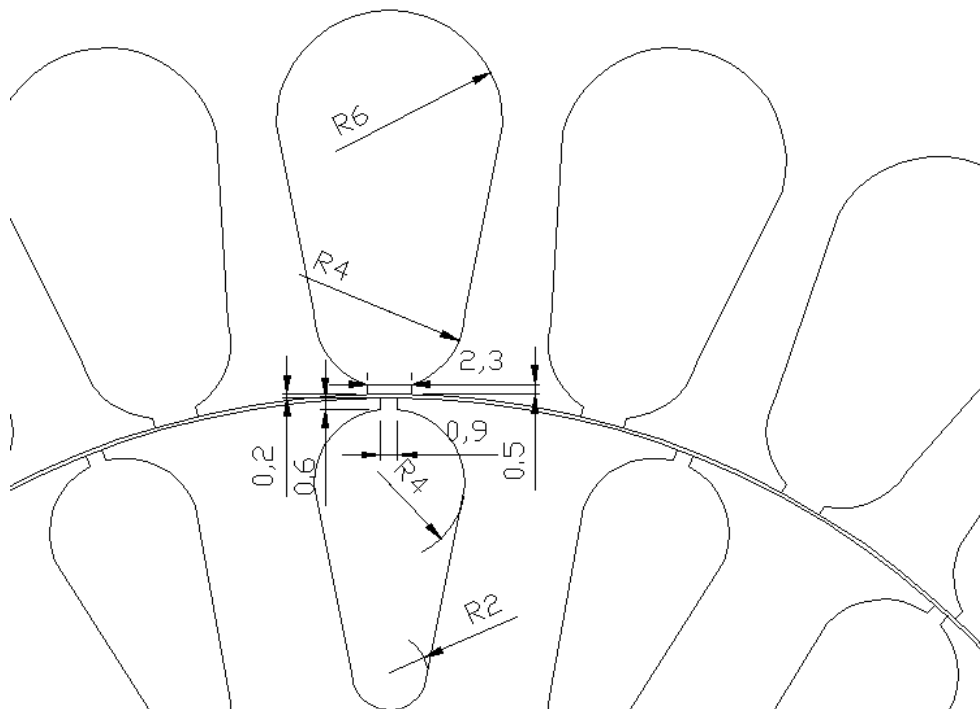
$k = 68$

Kapacita rozběhového kondenzátoru:

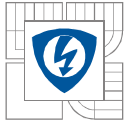
$$C = 0,29 \cdot k \cdot P = 0,29 \cdot 68 \cdot 1,1 = 21,69 \mu F \quad (5.91)$$



Obrázek 5.6: Rozměry plechů navrhnutého motoru



Obrázek 5.7: Detail na drážky rotoru a statoru



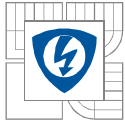
6 ZÁVĚR

V diplomové práci bylo pojednáno o asynchronních motorech menších výkonů, což jsou ve valné většině motory jednofázové, na něž je převážná část kapitol zaměřena. Práce obsahuje souhrnné informace o principu činnosti, provedení, základních parametrech a rozdělení asynchronních strojů. Stručně zde byly objasněny způsoby získávání záběrového momentu, včetně rozboru odlišností třífázových motorů od motorů jednofázových. Velká část projektu je věnována energetické bilanci motorů, kde jsou uvedeny matematické vztahy potřebné pro výpočet ztrát na asynchronním motoru. Jednotlivé ztráty jsou zde popsány a je zde vysvětlený důvod jejich vzniku, protože právě zkoumáním a následným snížením ztrát lze docílit vyšší účinnosti. Jako jedno z technických vylepšení pro zvýšení účinnosti je jedna část kapitoly zaměřena na měděné rotory.

V další kapitole je podrobně popsán jednofázový asynchronní motor od firmy Atas elektromotory Náchod a.s. O tomto motoru jsou uvedeny všechny provozní parametry a v přílohách je umístěna část technické dokumentace. Tento motor byl ve školních laboratořích proměřen pro analýzu ztrát motoru. Dále byla provedena analýza tohoto motoru pomocí programu Femm, pomocí níž bylo dopodrobna zkoumáno rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře a v železe statoru a rotoru. Z výsledků měření vyplynula poměrně malá účinnost motoru pohybující se kolem 60% při provozu ve jmenovitém bodě.

V následující kapitole je uveden kompletní návrh jednofázového asynchronního motoru. Jedná se o motor stejného výkonu jako u motoru zkoumaného v kapitole 3. Parametry výpočtu byly směřovány k co možná největší podobnosti s analyzovaným motorem. Motory mají shodný počet drážek jak statorových, tak i rotorových plechů. Ostatní parametry určené výpočtem se zcela liší. Jako nejzásadnější odlišnost vypočteného motoru oproti analyzovanému lze považovat o 23mm větší vrtání statoru a s tím spojené zvětšení plochy jednotlivých statorových drážek. Jako další zajímavost při návrhu lze považovat aktivní délku stroje, i když mají oba motory stejný výkon, podle teoretických předpokladů by mělo se zvětšením vrtání statoru dojít ke zmenšení délky stroje, ale návrhem určený motor je i do délky o 21mm větší.

Pro přesné určení výkonu, ztrát, momentu a zbývajících parametrů by bylo zapotřebí navrhnutý motor prostřednictvím firmy Atas, vyrobit a podrobit stejné analýze jako motor zkoumaný v kapitole 3. Následným porovnáním výsledků by došlo k ověření správnosti výpočtu.



LITERATURA

- [1] PŘIBYSLAVSKÝ, Jaroslav. *Elektrické pohony asynchronními motory*. 1964. 173 s.
- [2] HELLER, Bedřich. Hamata, Václav. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. 1961. 202 s.
- [3] SCHLESINGER, Petr. *Návrh jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází*. [s.l.], 2007. 30 s. Semestrální práce. VUT, FEKT.
- [4] PAVELKOVÁ, Naděžda. *Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie* [online]. 2008 [cit. 2010-04-21]. Odborné časopisy. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37850>.
- [5] Zdroj obrázků [online]. 2010. Dostupné z WWW: < <http://www.google.cz>>.
- [6] MARŠÍKOVÁ, Jarmila. *Měděné rotory* [online]. 2008 [cit. 2010-04-21]. Odborné časopisy. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26281>.
- [7] *Copper motor rotor* [online]. 2006 [cit. 2010-04-21]. Tests Show Mass-Produced Copper-Rotor Motors More Efficient Than Nameplate Claims. Dostupné z WWW: <http://www.copper-motor-rotor.org/update/Nov_06/topstory_sea01.html>.
- [8] NOVÁK, Ivo. *Emotor* [online]. 2008 [cit. 2010-04-21]. Asynchronní elektromotor třífázový. Dostupné z WWW: <<http://www.emotor.cz/asynchronni-elektromotor-trifazovy.htm>>.
- [9] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje. Přednášky a elektronické texty*.
- [10] *EMP* [online]. 2009 [cit. 2010-04-23]. Asynchronní motory. Dostupné z WWW: <http://www.emp-slavkov.cz/tm_jmc.html>.
- [11] ČERVINKA, Dalibor. *Elektrické regulované pohony. Přednášky a elektronické texty*.
- [12] CIGÁNEK, Ladislav. *Elektrické stroje*. Upravené vydání. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. 816 s.
- [13] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Vydání 1. Praha: SNTL, 1958. 716 s.
- [14] ŠEVČÍK, Pavel. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru*. [s.l.], 2010. 80 s. Diplomová práce. VUT, FEKT.
- [15] NEKOVÁŘ, Martin. *Návrh a analýza jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází*. [s.l.], 2010. 49 s. Bakalářská práce. VUT, FEKT.
- [16] LYOCSA, Štefan. *Měření na asynchronním motoru*. 1. Praha : Statní nakladatelství technické literatury, 1972. 126 s.