



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

MĚŘENÍ A ANALÝZA VYSOKOotáčkového MOTORU S KLECOVÝM VINUTÍM

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF HIGH SPEED SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ruben Kaczmarczyk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Klíma

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Ruben Kaczmarczyk

ID: 168593

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Měření a analýza vysokootáčkového motoru s klecovým vinutím

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s principem funkce asynchronních motorů a popište rozdělení ztrát u běžného a vysokootáčkového motoru.
2. Na základě výrobní dokumentace k předloženému laboratornímu vzorku motoru proveďte zjednodušený výpočet zadaného asynchronního stroje.
3. Proveďte analytický výpočet v programu RMxprt a změřte vzorek motoru.
4. Zhodnoťte výsledky měření a výpočtu

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.

[2] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcová. "Design of Rotating Electrical machines". první. [s.l.] : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B).

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Jiří Klíma

Konzultant bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá seznámením se s klasickými asynchronními a vysokootáčkovými motory, jejich konstrukcí a principem. Jsou zde také popsány konstrukční zvláštnosti vysokootáčkového motoru a také porovnání ztrát mezi oběma motory. Dále je pak na základě výrobní dokumentace proveden zjednodušený výpočet zadaného asynchronního motoru. Analytický výpočet je proveden i v programu RMxprt po nastavení všech požadovaných parametrů motoru. Součástí bakalářské práce je i experimentální měření na laboratorním vzorku pro ověření požadovaných vlastností.

Abstract

The thesis is focused on familiarization with classical asynchronous and high-speed motors, their construction and principle. There are also described constructional peculiarities of the high-speed motor and comparison of losses between both motors. Then, on the basis of production documentation a simplified calculation of the particular asynchronous motor is made. Analytical calculation is also made in RMxprt program after setting of all given parameters of the motor. Experimental measurement upon the laboratory sample for the verification of given qualities is also embodied in the bachelor thesis.

Klíčová slova

Asynchronní motor; vysokootáčkový motor; analytický výpočet; rozdělení ztrát

Keywords

Asynchronous motor; high-speed motor; analytical calculation; distribution of losses

Bibliografická citace

KACZMARCZYK, R. *Měření a analýza vysokootáčkového motoru s klecovým vinutím*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Klíma.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření a analýza vysokootáčkového motoru s klecovým vinutím, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

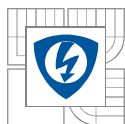
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Klímovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora



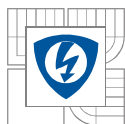
OBSAH

1. ÚVOD	12
2. PRINCIP A KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	12
3. VYSOKOOTÁČKOVÉ MOTORY	13
3.1 KONSTRUKCE VYSOKOOTÁČKOVÝCH MOTORŮ	13
3.2 ZTRÁTY	15
3.2.1 ROZDĚLENÍ ZTRÁT	15
3.2.1.1 Ztráty ve vinutí	15
3.2.1.2 Ztráty v železe	15
3.2.1.3 Mechanické ztráty	16
3.2.1.4 Dodatečné ztráty	16
3.2.2 POROVNÁNÍ ZTRÁT U KLASICKÉHO A VYSOKOOTÁČKOVÉHO MOTORU	16
4. ZJEDNODUŠENÝ VÝPOČET	18
4.1 ZADANÉ OBECNÉ PARAMETRY	18
4.2 VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO OBVODU	18
4.2.1 VÝPOČET MAGNETIZAČNÍHO PROUDU	18
4.2.2 VÝPOČET ODPORŮ A REAKTANCÍ	22
4.2.3 PARAMETRY NÁHRADNÍHO OBVODU	26
4.3 VÝPOČET ZTRÁT	27
4.3.1 ZTRÁTY V ŽELEZE.....	27
4.3.2 ZTRÁTY VE VINUTÍ	29
4.3.3 MECHANICKÉ ZTRÁTY	29
4.3.4 DODATEČNÉ ZTRÁTY	29
4.3.5 CELKOVÉ ZTRÁTY A ÚČINNOST MOTORU	30
4.4 VELIČINY PRO URČENÍ PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY	30
5. ANALYTICKÝ VÝPOČET V PROGRAMU RMXPRT	31
5.1 VYTVOŘENÍ MODELU	31
6. MĚŘENÍ VYSOKOOTÁČKOVÉHO MOTORU	32
6.1 MĚŘENÍ ODPORŮ VINUTÍ	32
6.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO	32
6.3 ZKOUŠKA PŘI ZATÍŽENÍ	34
6.4 MĚŘENÍ NAPĚŤOVÉ CHARAKTERISTIKY	36
7. POROVNÁNÍ MĚŘENÍ A VÝPOČTŮ	37
8. ZÁVĚR	40
LITERATURA	41



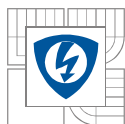
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2.1 Ampérová síla, převzato z [8].....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3.1 Maximální výkon v závislosti na rychlosti otáčení pro lištěný a masivní rotor [3]... </i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3.2 Tok výkonu v asynchronním motoru [6]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3.3 Podíl jednotlivých ztrát u klasického asynchronního a vysokootáčkového motoru, převzato z [10].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4.1 Činitel k_E v závislosti na D_e [7]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 4.2 BH křivka</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 4.3 Činitel $k_{\gamma'}$ [7]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4.4 Činitel k_i [7].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4.5 Závislost $\beta_0 = f(b_0 / \delta)$ [7]</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 5.1 Strom projektu, zadané parametry a model motoru</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 6.1 Měřící pracoviště motoru.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 6.2 Konstantní ztráty v závislosti na druhé mocnině fázového napětí.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 6.3 Ztráty v železe při zatížení v závislosti na napětí naprázdno.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 6.4 Účinnost v závislosti na sdruženém napětí</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 7.1 Moment v závislosti na otáčkách</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 7.2 Proud v závislosti na otáčkách</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 7.3 Účinnost v závislosti na výkonu</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 7.4 Účinitel v závislosti na výkonu.....</i>	<i>39</i>



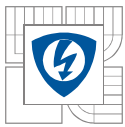
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3.1 Porovnání parametrů motorů, převzato z [10]</i>	16
<i>Tabulka 4.1 Činitel plnění železa</i>	19
<i>Tabulka 4.2 Činitelé K_ε a K_v pro výpočet vsypaného vinutí [7]</i>	22
<i>Tabulka 4.3 Rezistivita materiálů pro různá vinutí [7]</i>	23
<i>Tabulka 4.4 Měrné ztráty a hodnoty β [7]</i>	28
<i>Tabulka 6.1 Naměřené hodnoty odporů</i>	32
<i>Tabulka 6.2 Naměřené a vypočítané hodnoty měření naprázdno</i>	33
<i>Tabulka 6.3 Naměřené a vypočítané hodnoty při měření při zatížení</i>	34
<i>Tabulka 7.1 Hodnoty magnetických indukcí</i>	37
<i>Tabulka 7.2 Parametry náhradního obvodu</i>	37
<i>Tabulka 7.3 Hodnoty jednotlivých ztrát při zvolených otáčkách</i>	37
<i>Tabulka 7.4 Porovnání parametrů při jmenovitém výkonu</i>	37



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_{kn}	střední výška kruhů nakrátko
b	definovaný rozměr statorové drážky
b_0	otevření drážky
b_{kn}	šířka kruhů nakrátko
b_{zr}	šířka zubu rotoru
b_{zs}	šířka zubu statoru
$\cos \varphi$	účinník
D	vnitřní průměr statoru
D_e	vnější průměr statoru
D_{ef}	efektivní průměr vodiče
D_h	průměr hřídele
D_{kn}	střední průměr kruhu nakrátko
D_r	vnější průměr rotoru
f	napájecí frekvence
h_{0r}	definovaný rozměr rotorové drážky
h_{0s}	výška otevření statorové drážky
h_1	definovaný rozměr statorové drážky
h_2	definovaný rozměr statorové drážky
h_3	definovaný rozměr statorové drážky
h_{dr}	hloubka drážky rotoru
h_{jr}	výška j_{ha} rotoru
h_{js}	výška j_{ha} statoru
k_{Fe}	činitel plnění železa
l_e	efektivní délka stroje
m	počet fází
N	počet závitů na jednu fázi
n	synchronní otáčky
n_1	jmenovité otáčky
p	počet pólových dvojic
P_2	výkon motoru
Q_r	počet drážek rotoru
Q_s	počet drážek statoru



S_t	průřez tyče
U_f	fázové napětí
δ	vzduchová mezera
μ_0	permeabilita vakua



1. ÚVOD

Asynchronní stroje patří mezi nejrozšířenější střídavé elektrické stroje. Jako točivý elektrický stroj může i asynchronní stroj měnit elektrickou energii na mechanickou energii a naopak. Jde-li o přeměnu z elektrické energie na mechanickou, jedná se o motory, mění-li se energie z mechanické na elektrickou, jedná se o generátory. Asynchronní stroje se však převážně používají jako motory s výstupním mechanickým pohybem otáčivým nebo lineárním. Obrovskou výhodou těchto motorů je, že se provozují téměř bez údržby a jsou velmi spolehlivé. Konstrukce těchto motorů je velmi jednoduchá, což se odráží i na konečné ceně. Jako nejčastější asynchronní motor se používá motor s klecovým vinutím, neboli s kotvou nakrátko nebo také s kroužkovou kotvou.

Výkony těchto motorů se pohybují řádově od jednotek wattů až do několika tisíců kilowattů a napětí na těchto největších strojích se může pohybovat řádově v desítkách kilovoltů. Kmitočet u třífázových a jednofázových motorů vyráběných v ČR je 50 Hz a otáčky se pohybují od 500 do 3000 min^{-1} . S nástupem výkonové elektroniky, konkrétně s frekvenčními měniči, se naskytla možnost napájení motoru s frekvencí vyšší než 50 Hz. To umožnilo dosahovat otáček až několik set tisíc za minutu. V případě zvýšení otáček se přímo úměrně zvýšil také výstupní výkon. Motory, které dosahují těchto otáček, se nazývají vysokootáčkové motory. Nedílnou součástí při návrhu takového stroje je také mechanický výpočet z pohledu odstředivých sil, které jsou závislé na rychlosti, která se mění s kvadrátem a také na poloměru. Další důležitou věcí je také tepelný návrh, vzhledem k tomu, že při nárůstu otáček se zvětší ztráty. Celá kapitola čerpá z literatury[1].

2. PRINCIP A KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

V aktivní části asynchronního motoru se mění odebírána elektrická energie ze sítě na energii mechanickou. Aktivní část motoru se skládá ze statorového a rotorového balení, legovaných a izolovaných plechů- dynamo plechů a vinutí statoru a rotoru. Vinutí statoru se skládá z jednotlivých cívek, které jsou uloženy ve vysekaných/ vypálených drážkách. U motorů s kroužkovou kotvou má rotor třífázové vinutí jako stator, které je připojeno na kroužky. U motorů s kotvou nakrátko je klecové vinutí, které může být jednofázové, častěji pak trojfázové. Klecový rotor má vinutí z neizolovaných tyčí, které mají kruhový průřez (u menších výkonů motoru). Tyče jsou po obou stranách rotoru nakrátko spojené vodivými prstenci. Vinutí vytváří jednoduchou klec, která se odlévá z hliníku. Rotorové drážky klecového vinutí bývají polouzavřené. Mohou být jednoduché, vírové nebo dvojité. Tvar těchto drážek má vliv na průběh točivého momentu, který závisí na rychlosti otáčení a také na záběrný moment. Stator motoru s kroužkovou kotvou a motoru s kotvou nakrátko bývají vzhledem ke zjednodušení výroby stejné. Motor s kotvou nakrátko má oproti motoru s kroužkovou kotvou lepší účinnost, větší účinník, větší momentovou a i výkonovou přetížitelnost.

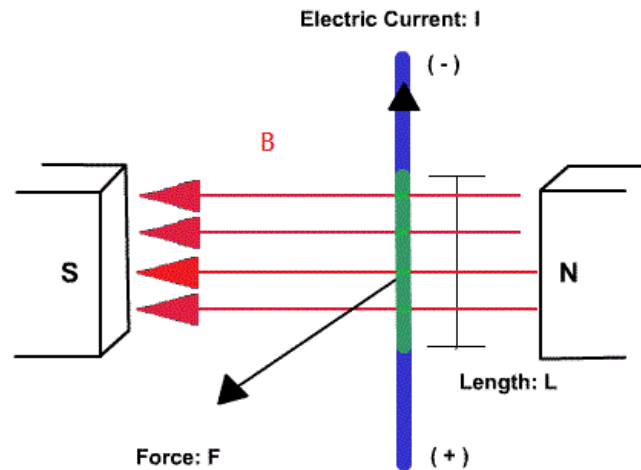
Asynchronní motor je z elektrického hlediska transformátor, který je složený z primární (stator) a sekundární (rotor) části. Od běžného transformátoru se liší tím, že vinutí asynchronního motoru jsou uložena na oddělených železných jádrech, mezi kterými je vzduchová mezera. Rotor je uložený v ložiskách a vzhledem ke statoru je otáčivý.

Pokud je vinutí rotoru spojeno nakrátko a primární vinutí se připojí na třífázovou síť, vzniká ve vzduchové mezeře otáčivé magnetické pole a v sekundárním vinutí se indukují napětí a teče jím proud.

Při známé magnetické indukci v místě proudového vodiče, je síla na element vodiče, kterým protéká proud, dána vztahem:

$$d\vec{F} = I \cdot (d\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

Kde $d\vec{F}$ je síla, I je proud, $d\vec{l}$ je element elektrického vodiče a \vec{B} je magnetická indukce.



Obrázek 2.1 Ampérová síla, převzato z [8]

Pokud je vinutí rotoru spojené nakrátko a rotor je zabrzděný, celý elektrický výkon přenesený ze sítě se přemění na elektrické teplo. V případě, že se rotor bude otáčet, budou jeho otáčky po připojení motoru na síť téměř totožné jako otáčky magnetického pole.

Výkon je možné přenášet na rotor jen tehdy, když vinutí rotoru bude protínat magnetické siločáry pole, to znamená, že se rotor bude otáčet menší rychlostí než je rychlost magnetického pole. Proto rotor a jeho vinutí zaostává za magnetickým polem o tzv. skluz. V synchronním režimu se ve vinutí rotoru nebude indukovat napětí a točivý moment motoru bude nulový.

V normálních provozech se rotor nikdy netočí synchronně s polem, ale pomaleji, proto se všechny motory na tomto principu nazývají asynchronní motory. Důvodem, proč můžeme tyto motory označovat i jako indukční, jsou indukční zákony, které jsou základem i pro tyto motory. Celá kapitola čerpá z literatury [2].

3. VYSOKOOTÁČKOVÉ MOTORY

Vysokorychlostní stroje se používají především pro dmýchadla, ventilátory, kompresory, čerpadla a k pohonu obráběcích vřeten. Nejlepší účinnosti těchto zařízení je dosaženo při vyšších otáčkách. Zvýšení účinnosti pomohl i fakt, že již není třeba používat převodovky, které jsou konstrukčně složité a zvětšují celkovou hmotnost a rozměry pohonů, jelikož výkonové frekvenční měniče dokáží plynule regulovat otáčky při zachování momentu. Vysokootáčkové motory ve většině případů používají cizí ventilaci nebo vodní chlazení. Vlastní chlazení téměř není možné a to kvůli vysokým otáčkám motoru. Velmi vysoké otáčky také kladou velké nároky na mechanickou pevnost rotoru. Proto i ložiska zde sehrávají významnou roli [3].

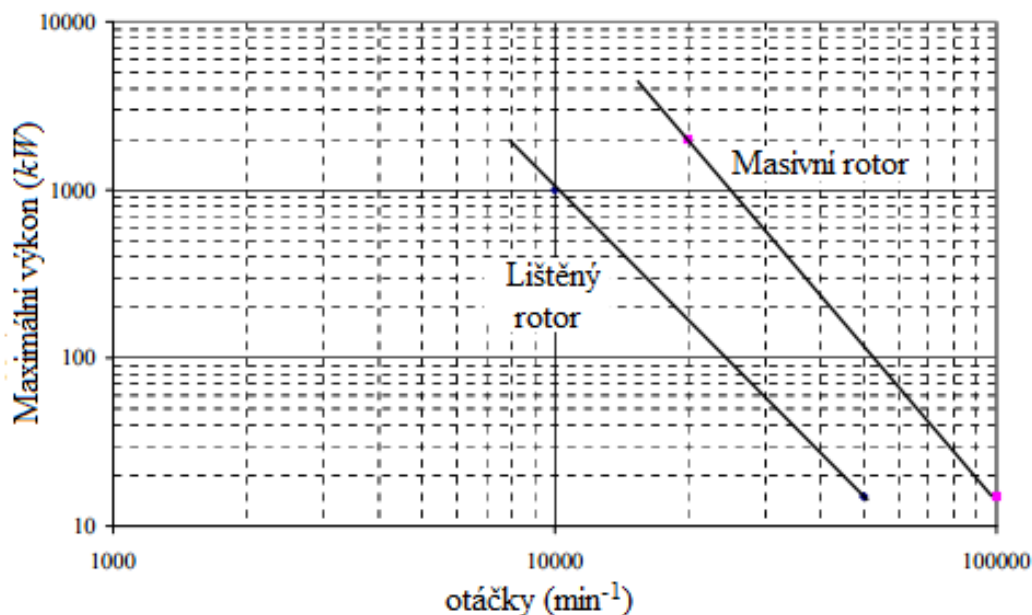
3.1 Konstrukce vysokootáčkových motorů

Konstrukce vysokootáčkových motorů se principiálně příliš neliší od konstrukce běžného asynchronního motoru. Konstrukce statoru je téměř stejná jako u běžných asynchronních motorů, to znamená, že statorové jádro je složeno z dynamových plechů, kde je statorové vinutí navinuto

do drážek po vnitřním obvodu. Tyto plechy mají tloušťku 0,2- 0,35 *mm*. Důvodem takto volené tloušťky je omezení ztrát při velké napájecí frekvenci.

Rotor se však podstatně liší a můžeme ho rozdělit do dvou skupin. Na motor s lištěným rotorem a na motor s masivním rotorem. Motor s lištěným rotorem se skládá z izolovaných plechů, které jsou staženy ocelovými svorníky kvůli zvětšení mechanické pevnosti. Tudíž rotor není nalisován na hřídel. Hřídel společně s přírubou tvoří jednu část, která je z nemagnetického materiálu. Rotor má uzavřené drážky, do kterých se odlévají tyče. Motor s lištěným rotorem má větší výkon, účinnost i účinník oproti motoru s masivním rotorem. [4]. Rotor masivního motoru je vyroben z jednoho kusu pevného feromagnetického materiálu. Hřídel je uložena v ložiscích v předním a zadním štítu stroje. Používají se kontaktní a nekontaktní ložiska. Mezi kontaktní patří kuličková ložiska, která jsou konstrukčně jednoduchá, velmi odolná a vyžadují malou údržbu. Mezi nekontaktní patří ložiska vzduchová, hydrostatická nebo hydrodynamická a ložiska magnetická. Tyto se používají pro speciální účely. Nejjednodušší masivní rotor je s hladkým rotorem. Elektromagnetické vlastnosti jsou však velmi špatné, zejména velký skluz. Proto se používá několik modifikací. První zlepšení je zvětšení hloubky vniku magnetického pole do rotoru, pomocí axiálního drážkování. Dále pak je sváření dobře vodivých nemagnetických zkratovacích kruhů na ukončení axiálních drážek a vložení měděných tyčí do těchto drážek. Používají se např. jako pomocné motory pro spuštění turbo alternátorů, jako motory a generátory pracující v podmínkách vysoké teploty, atd. Více upřednostňované jsou motory s masivním motorem díky jednoduché konstrukci vysoké mechanické pevnosti a nízké úrovni hluku a vibrací.

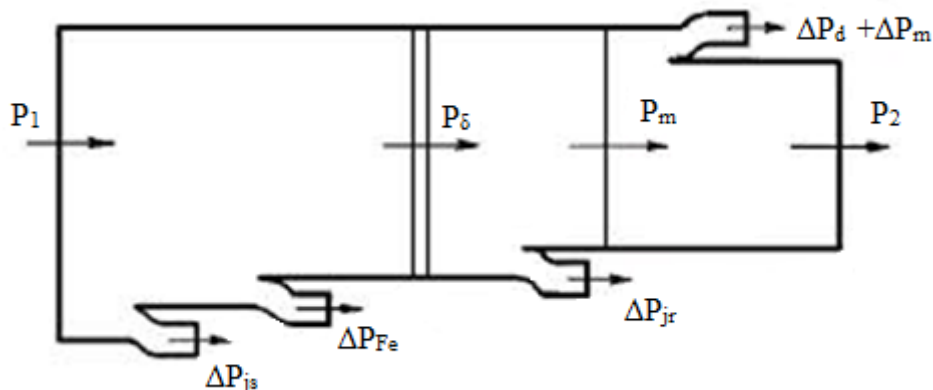
Na obrázku 3.1 jsou znázorněny křivky, které znázorňují maximální výkon v závislosti na rychlosti otáčení pro masivní a lištěný rotor, dle literatury[3]. Maximální otáčky pro lištěný rotor se pohybují od 50 000 min^{-1} do 10 000 min^{-1} , zatímco výkon se zvyšuje od několika kilowattů do řádově megawattů. Pro dosažení takto vysokých otáček se používají speciální plechy vyrobeny ze slitin, například Co- Fe. Také horní rychlostní limit u masivních rotorů je dán mechanickým omezením a je to od 100 000 min^{-1} do 20 000 min^{-1} . Maximální výkon je vždy definován tepelnou konstrukcí stroje. Kapitola 3.1 z literatury [3].



Obrázek 3.1 Maximální výkon v závislosti na rychlosti otáčení pro lištěný a masivní rotor [3]

3.2 Ztráty

3.2.1 Rozdělení ztrát



Obrázek 3.2 Tok výkonu v asynchronním motoru [6]

Pro obr. 3.1 platí

P_1	příkon motoru
ΔP_{js}	ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{Fe}	ztráty v železe statoru
P_δ	výkon přenesený přes vzduchovou mezeru
ΔP_{jr}	ztráty ve vinutí rotoru
P_m	mechanický výkon
$\Delta P_d + \Delta P_m$	dodatečné a mechanické ztráty
P_2	výkon motoru

3.2.1.1 Ztráty ve vinutí

Základní vztah pro výpočet ztrát ve vinutí:

$$\Delta P_{Cu} = m R_{Cu} I_n^2 \quad (3.1)$$

Kde odpor vinutí se vypočte jako

$$R_{Cu} = k_R \frac{N l_{av}}{\sigma S_c} \quad (3.2)$$

Kde k_R je činitel skin efektu, N je počet závitů l_{av} je střední délka závitu vodiče, σ je vodivost vodiče a S_c průřez vodiče [9].

Odpor vinutí je závislý na frekvenci, právě díky skin efektu. S rostoucím kmitočtem se snižuje hloubka vniku vzduchové mezery a odpor se zvyšuje až do mezní frekvence [9].

3.2.1.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe se skládají ze dvou typů, ze ztrát vířivých a hysterezních ztrát.

Vířivé ztráty jsou způsobeny vířivými proudy, které se uzavírají přímo ve vodivém materiálu a způsobují jeho zahřívání. Ze vztahu 3.3 je patrné, že jsou ztráty závislé na kvadrátu frekvence a také magnetické indukci. Tyto ztráty můžeme snížit použitím co nejtenčího plechu, snížením



amplitudy magnetické indukce a také zvětšením měrného odporu jádra statoru[9]. Vztah pro výpočet těchto ztrát podle [9] je:

$$P_v = \frac{V_{Fe} \pi^2 f^2 d^2 \hat{B}_{max}^2}{6\rho} \quad (3.3)$$

Kde V_{Fe} je objem feromagnetika d je tloušťka plechu, B_{max} je maximální magnetická indukce v jádře statoru a ρ je měrný odpor jádra statoru.

Hysterezní ztráty způsobují nežádoucí zahřívání plechů, které je způsobeno střídavým magnetováním. Tyto ztráty jsou přímo úměrné ploše hysterezní křivky a jejich velikost závisí na remanentní magnetické indukci B_r a koercivity H_c . Vztah pro výpočet těchto ztrát je podle [9]:

$$P_h = \eta V_{Fe} f B_{max}^n \quad (3.4)$$

Kde η je empirická konstanta, V_{Fe} je objem feromagnetika, f je frekvence a exponent n je dán z intervalu [1.5, 2.5]. [9].

3.2.1.3 Mechanické ztráty

Tyto ztráty jsou způsobeny třením ložisek a ventilací. Ztráty v ložiscích závisí na rychlosti otáčení hřídele, typu ložiska, vlastnosti maziva a zatížení ložiska. Ventilací ztráty se stávají významnými s nárůstem mechanické rychlosti stroje a jsou způsobeny třením rotujících ploch s okolním plynem, obvykle vzduchem, proto také závisí na povrchu rotoru. [9].

3.2.1.4 Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty je velmi těžké vypočítat nebo změřit, proto se předpokládá podle normy IEC, že je to 0.5% z příkonu, když účinnost se vypočítá nepřímou z měření ztrát. Největší podíl dodatečných ztrát vzniká při zatížení. A to díky vyšším harmonickým magnetického napětí. Dalším příspěvkem do těchto ztrát mohou být i vibrace motoru. [9].

3.2.2 Porovnání ztrát u klasického a vysokootáčkového motoru

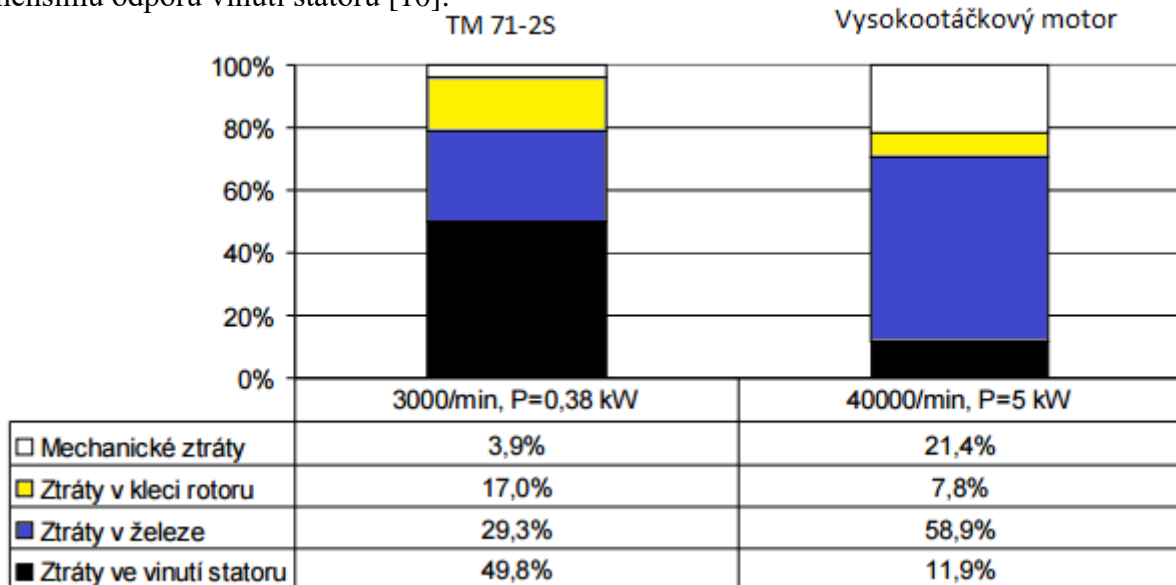
Porovnání ztrát je provedeno na dvou konkrétních motorech stejné velikosti. V tabulce 3.1 jsou zobrazeny parametry klasického asynchronního motoru TM71-2S a vysokootáčkového motoru.

Jmenovité hodnoty	TM 71-2S	Vysokootáčkový
Napětí	3x230 V	3x230 V
Frekvence	50 Hz	666,7 Hz
Proud	0,93A	12,4 A
Výkon	0,38 kW	5 kW
Synchronní otáčky	3000 min^{-1}	40000 min^{-1}
Moment	1,3 Nm	1,3 Nm
Hmotnost aktivních částí	1,84 kg	1,84 kg

Tabulka 3.1 Porovnání parametrů motorů, převzato z [10]

Na obrázku 3.3 jsou vyobrazeny ztráty klasického asynchronního motoru a vysokootáčkového motoru. Z obrázku je patrné, že mechanické ztráty (kde jsou zahrnuty třecí, ventilací ztráty a ztráty v ložiscích) jsou až pětinasobně vyšší u vysokootáčkového motoru než u motoru klasického. Je to způsobeno výrazně vyššími otáčkami motoru. Také ztráty v železe statoru jsou podstatně vyšší u vysokootáčkového motoru a to díky ztrátám vířivými proudy

v železe, které jsou závislé na frekvenci. Ztráty v železe rotoru u vysokootáčkových motorů jsou zanedbatelné a to díky skluzu, který se pohybuje u hladkého rotoru okolo 1%. Nicméně dochází k nárůstu ztrát v kleci rotoru, které jsou způsobeny vyššími harmonickými proudy při povrchu rotoru. Pozorujeme také nižší ztráty ve vinutí statoru u vysokootáčkových motorů a to díky menšímu odporu vinutí statoru [10].



Obrázek 3.3 Podíl jednotlivých ztrát u klasického asynchronního a vysokootáčkového motoru, převzato z [10]



4. ZJEDNODUŠENÝ VÝPOČET

V této bakalářské práci byl vybrán třífázový motor, který má synchronní otáčky 24000 min^{-1} . Byl však vyroben jako klasický asynchronní motor, bez konstrukčních zvláštností. Rotor má klecové vinutí, neboli je to rotor s kotvou nakrátko, jehož obvodová rychlost je 48 ms^{-1} . Motor je použit jako hobby vřeteno pro dřevo obrábění. Není však určen pro trvalý chod, má malou tepelnou konstantu a velice rychle se zahřívá. Výpočet a všechny uvedené vztahy, pokud není uvedeno jinak, jsou aplikovány podle literatury [7]. Jednotlivé rozměry byly stanoveny z výkresové dokumentace.

4.1 Zadané obecné parametry

Jmenovitý výkon	$P_2 = 750 \text{ W}$
Napájecí frekvence	$f = 400 \text{ Hz}$
Počet závitů	$N = 56 \text{ z.}$
Počet pólových dvojic	$p = 1$
Jmenovité otáčky	$n_1 = 23\,700 \text{ min}^{-1}$
Efektivní délka stroje	$l_e = 50 \text{ mm}$
Počet fází	$m = 3$
Účinník	$\cos \varphi = 0,75$
Účinnost	$\eta = 63,7\%$
Fázové napětí	$U_f = 132,8 \text{ V}$

4.2 Výpočet parametrů náhradního obvodu

4.2.1 Výpočet magnetizačního proudu

Vzduchovou mezeru je možné vypočítat pomocí empirického vztahu, kde

$$\delta \approx (0,3 + 1,5D)10^{-3} = (0,3 + 1,5 \cdot 0,0385) \cdot 10^{-3} = 0,36 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Hodnota vzduchové mezery byla ale zvolena z výkresové dokumentace.

$$\delta = 0,25 \text{ mm}$$

Drážková rozteč statoru

$$t_{ds} = \frac{\pi D}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 38,5}{12} = 10,08 \text{ mm} \quad (4.2)$$

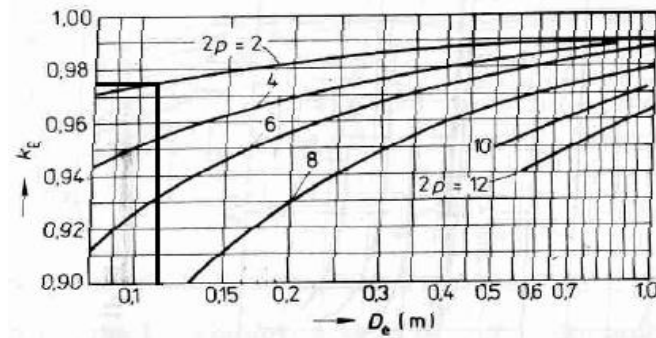
Drážková rozteč rotoru

$$t_{dr} = \frac{\pi D_r}{Q_r} = \frac{\pi \cdot 38}{16} = 7,46 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{k_E U_f}{4k_B N k_{v1} f} = \frac{0,976 \cdot 132,8}{4,44 \cdot 56 \cdot 0,97 \cdot 400} = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (4.4)$$

Činitel k_E je určen z obr. 4.1 a je to poměr indukovaného napětí vinutí statoru ke jmenovitému napětí.



Obrázek 4.1 Činitel k_E v závislosti na D_e [7]

Kde činitel tvaru pole k_B je 1,11 a činitel statorového vinutí k_{V1} se vypočte jako

$$k_{V1} = k_{VY} \cdot k_{VR} = 1 \cdot 0,97 = 0,97 \quad (4.5)$$

Kde činitel kroku k_{vy} je 1 pro jednovrstvé vinutí a činitel rozlohy se vypočte jako

$$k_{VR} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \sin \frac{\pi}{6q}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot 2}} = 0,97 \quad (4.6)$$

Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_s}{2pm} = \frac{12}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 2 \quad (4.7)$$

Indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{p \Phi}{D l_e} = \frac{1 \cdot 1,34 \cdot 10^{-3}}{38,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05} = 0,70 \text{ T} \quad (4.8)$$

Indukce v zubu statoru

$$B_{zs} = \frac{B_\delta t_{ds}}{b_{zs} k_{Fe}} = \frac{0,70 \cdot 10,08 \cdot 10^{-3}}{4,85 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,50 \text{ T} \quad (4.9)$$

Kde činitel plnění železa $k_{Fe}=0,97$ je určen z tabulky 4.1

h (mm)	U (V)	Stator		Rotor nakrátko	
		způsob izolace	k_{Fe}	způsob izolace	k_{Fe}
50 až 250	≤ 660	vrstva oxidu	0,97	vrstva oxidu	0,97
280 až 355	≤ 660	lakování	0,95	vrstva oxidu	0,97
400 až 560	6 000	lakování	0,95	lakování	0,95

Tabulka 4.1 Činitel plnění železa

Indukce ve jhu statoru

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 h_{js} l_e k_{Fe}} = \frac{1,34 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 \cdot 0,97} = 1,34 \text{ T} \quad (4.10)$$

Indukce v zubu rotoru

$$B_{zr} = \frac{B_{\delta} t_{dr}}{b_{zr} k_{Fe}} = \frac{0,70 \cdot 7,46 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,80 \text{ T} \quad (4.11)$$

Indukce ve jhu rotoru

$$B_{jr} = \frac{\Phi}{2 h_{jr} l_e k_{Fe}} = \frac{1,34 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 14,02 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 \cdot 0,97} = 0,99 \text{ T} \quad (4.12)$$

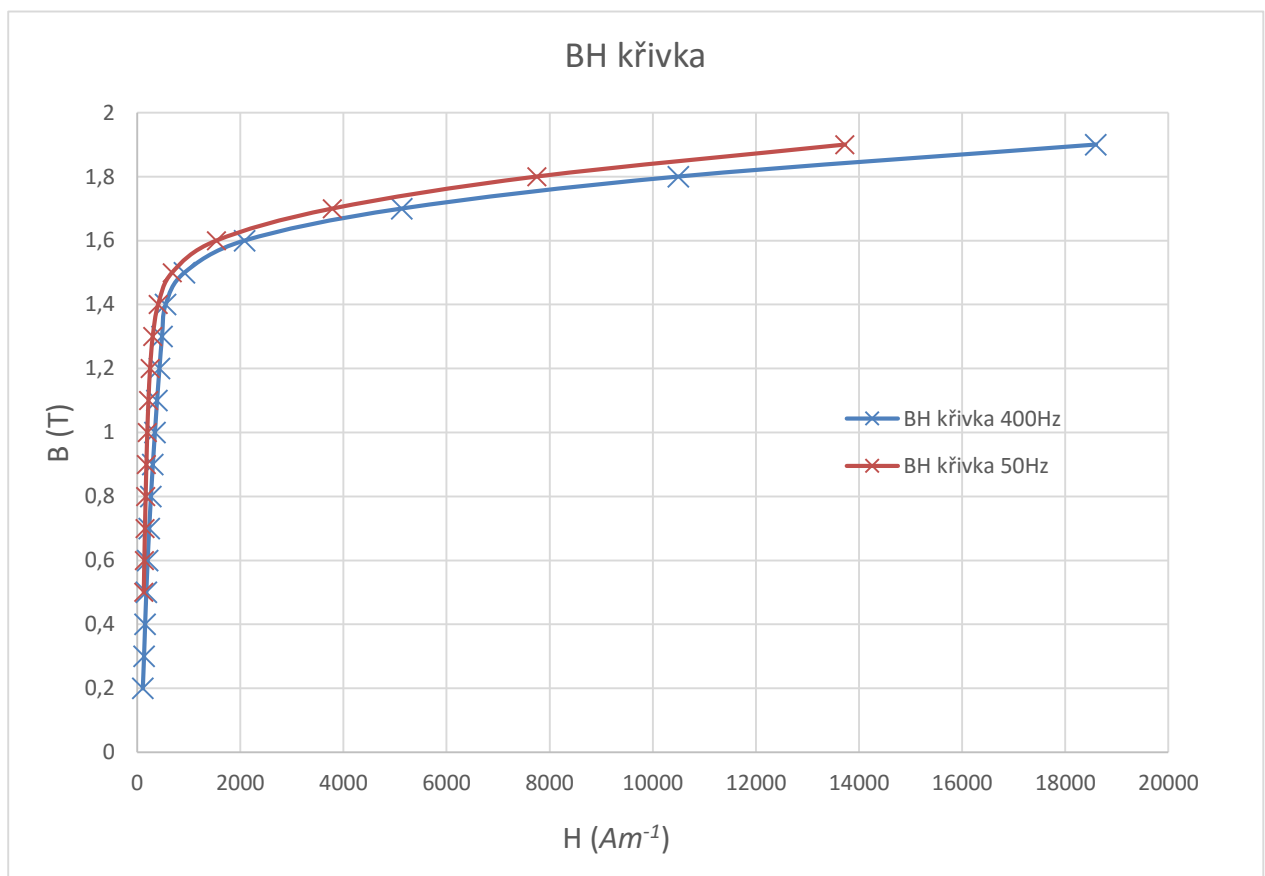
Dále vypočítáme Carterův čísel

$$k_c = \frac{t_{ds}}{t_{ds} - \gamma \delta} = \frac{10,08 \cdot 10^{-3}}{10,08 \cdot 10^{-3} - 6,667 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = 1,20 \quad (4.13)$$

Kde čísel γ se vypočítá

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_0}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{2,5}{0,25}\right)^2}{5 + \left(\frac{2,5}{0,25}\right)} = 6,67 \quad (4.14)$$

Dále je možné vypočítat magnetické napětí. Hodnoty magnetické intenzity byly odečteny z grafu. (Pro plech M700- 50A)



Obrázek 4.2 BH křivka



Magnetická intenzita jha statoru (pro $B_{js} = 1,34$ T) je $H_{js} = 511,30 \text{ Am}^{-1}$

Magnetická intenzita jha rotoru (pro $B_{jr} = 0,99$ T) je $H_{jr} = 342,76 \text{ Am}^{-1}$

Magnetická intenzita zubu statoru (pro $B_{zs} = 1,50$ T) je $H_{zs} = 684,50 \text{ Am}^{-1}$

Magnetická intenzita zubu rotoru (pro $B_{zr} = 1,80$ T) je $H_{zr} = 8767,72 \text{ Am}^{-1}$

Při známé magnetické intenzitě v zubu rotoru, je možné vyjádřit magnetickou indukci v zubu rotoru, pomocí vztahu, který respektuje tok drážkou. [9]

$$\begin{aligned} B_{zr2} &= B_{zr} - \left(\frac{l_e t_{dr}}{l_e k_{Fe} b_{zr}} - 1 \right) \mu_0 H_{zr} = \\ &= 1,80 \left(\frac{0,05 \cdot 0,698 \cdot 7,48 \cdot 10^{-3}}{0,05 \cdot 0,97 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8767,72 \\ &= 1,77 \text{ T} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře

$$U_\delta = \frac{2 B_\delta \delta k_C}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 0,70 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,20}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 334,12 \text{ A} \quad (4.16)$$

Dále magnetické napětí ve jhu statoru

$$U_{js} = H_{js} L_{js} = 511,30 \cdot 102,49 \cdot 10^{-3} = 52,32 \text{ A} \quad (4.17)$$

Kde střední délka siločáry ve jhu statoru

$$L_{js} = \frac{\pi(D_e - h_{js})}{2p} = \frac{\pi(75,5 - 10,25)}{2 \cdot 1} = 102,49 \text{ mm} \quad (4.18)$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru

$$U_{jr} = H_{jr} L_{jr} = 342,76 \cdot 40,87 \cdot 10^{-3} = 14,01 \text{ A} \quad (4.19)$$

Kde střední délka siločáry ve jhu rotoru

$$L_{jr} = \frac{\pi(D_h + h_{jr})}{2p} = \frac{\pi(12 + 14,02)}{2 \cdot 1} = 40,87 \text{ mm} \quad (4.20)$$

Magnetické napětí v zubu statoru

$$U_{zs} = H_{zs} L_{zs} = 684,50 \cdot 16,5 \cdot 10^{-3} = 11,16 \text{ A} \quad (4.21)$$

Kde délka siločáry v zubu statoru

$$L_{zs} = 2 \left(\frac{D_e - D}{2} - h_{js} \right) = 2 \cdot \left(\frac{75,5 - 38,5}{2} - 10,25 \right) = 16,5 \text{ mm} \quad (4.22)$$

Magnetické napětí v zubu rotoru

$$U_{zr} = H_{zr} L_{zr} = 8767,72 \cdot 11,98 \cdot 10^{-3} = 105,04 \text{ A} \quad (4.23)$$

Kde délka siločáry v zubu rotoru

$$L_{zr} = 2 \left(\frac{D_r - h_{jr} - D_h}{2} \right) = 2 \cdot \left(\frac{38 - 14,02 - 12}{2} \right) = 11,98 \text{ mm} \quad (4.24)$$



Celkové magnetické napětí

$$F_m = U_\delta + U_{js} + U_{jr} + U_{zs} + U_{zr} =$$
$$= 334,12 + 52,32 + 14,01 + 11,16 + 105,04 = 516,65 \text{ A} \quad (4.25)$$

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{pF_m}{0,9mNk_{V1}} = \frac{1 \cdot 516,65}{0,9 \cdot 3 \cdot 56 \cdot 0,97} = 3,54 \text{ A} \quad (4.26)$$

4.2.2 Výpočet odporů a reaktancí

Střední šířka cívky

$$b_c = \frac{\pi(D + h_{ds})}{2p} \beta = \frac{\pi(38,5 + 8,2)}{2 \cdot 1} \cdot 1 = 73,36 \text{ mm} \quad (4.27)$$

Poměrné zkrácení kroku statorového vinutí u jednovrstvých vinutí se uvažuje $\beta = 1$.

Kde hloubka drážky statoru

$$h_{ds} = \frac{D_e - D}{2} - h_{js} = \frac{75,5 - 38,5}{2} - 10,25 = 8,25 \text{ mm} \quad (4.28)$$

Délka čela

$$l_\zeta = K_\zeta b_c + 2B = 1,1 \cdot 73,36 + 2 \cdot 4 = 88,70 \text{ mm} \quad (4.29)$$

Vyložení čel vinutí

$$l_d = K_v b_c + B = 0,26 \cdot 73,36 + 4 = 23,07 \text{ mm} \quad (4.30)$$

Kde činitelé $K_\zeta = 1,20$ a $K_v = 0,26$ byly určeny z tabulky 4.1 pro počet pólů $2p = 2$ a neizolovaná čela. Činitel K_ζ byl však ještě poupraven na hodnotu 1,1. Délka přímé části cívky při výstupu z drážky od čela statorového svazku do začátku ohybu čela $B = 4 \text{ mm}$ (z výkresové dokumentace).

Počet pólů $2p$	Cívky statoru			
	čela neizolovaná		čela izolovaná páskou	
	K_ζ	K_v	K_ζ	K_v
2	1,20	0,26	1,45	0,44
4	1,30	0,40	1,55	0,50
6	1,40	0,50	1,75	0,62
8	1,50	0,50	1,90	0,72

Tabulka 4.1 Činitelé K_ζ a K_v pro výpočet vsypaného vinutí [7]

Střední délka závitu vinutí

$$l_{av} = 2(l_e + l_\zeta) = 2 \cdot (50 + 88,70) = 277,40 \text{ mm} \quad (4.31)$$



Celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí

$$L = l_{av} N = 0,2774 \cdot 56 = 15,52 \text{ m} \quad (4.32)$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí

$$R_1 = \rho_{Cu80^\circ C} \frac{L}{S_{ef}} = 2,1810^{-8} \cdot \frac{15,52}{0,57 \cdot 10^{-6}} = 0,60 \Omega \quad (4.33)$$

Efektivní průřez vodiče je dán vztahem

$$S_{ef} = 2 \frac{\pi D_{ef}^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} = 0,57 \text{ mm}^2 \quad (4.34)$$

Rezistivita mědi při 80 °C je dána vztahem

$$\begin{aligned} \rho_{Cu80^\circ C} &= \rho_{Cu20^\circ C} (1 + \alpha \Delta t) = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 60) = \\ &= 2,18 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Teplotní součinitel elektrického odporu α je pro měď a hliník $4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ a Δt je rozdíl teplot. V našem případě $t_2 - t_1$, kde t_2 je koncová a t_1 je počáteční teplota.

Rezistivita mědi ρ_{Cu} při 20°C je odečtena z tabulky 4.2

Typ vinutí	Materiál	Rezistivita $\rho(\Omega \cdot \text{m})$ při teplotě ϑ (°C)		
		20	75	115
Vinutí z měděných vodičů nebo z neizolované pásové mědi	měď	$\frac{1}{57} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{47} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{41} \cdot 10^{-6}$
Vinutí nakrátko rotorů asynchronních strojů	hliníkové tyče	$\frac{1}{35} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{28} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{26} \cdot 10^{-6}$
	litý hliník	$\frac{1}{30} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{24} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{22} \cdot 10^{-6}$

Tabulka 4.2 Rezistivita materiálů pro různá vinutí [7]

Příčný průřez kruhu nakrátko

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 8,43 \cdot 8 = 67,44 \text{ mm}^2 \quad (4.36)$$

Odpor kruhu mezi dvěma sousedními tyčemi klece nakrátko

$$\begin{aligned} R_{kn} &= \rho_{Al80^\circ C} \frac{\pi D_{kn}}{Q_r S_{kn}} = 4,74 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,028}{16 \cdot 67,44 \cdot 10^{-6}} \\ &= 3,8659 \cdot 10^{-6} \Omega \end{aligned} \quad (4.37)$$

Rezistivita hliníku při 80 °C je dána vztahem

$$\begin{aligned} \rho_{Al80^\circ C} &= \rho_{Al75^\circ C} (1 + \alpha \Delta t) = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 5) = \\ &= 4,74 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m} \end{aligned} \quad (4.38)$$



Kde rezistivita ρ_{Al} pro litý hliník při 75°C je odečtena z tabulky 4.2, nicméně je to hodnota pro čistý hliník, avšak po zalití do drážek vznikají nečistoty, uvažuje se hodnota $1/21,5 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$.

Odpor jedné tyče klece rotoru

$$R_t = \rho_{Al75^\circ\text{C}} \frac{l_e}{S_t} = 4,74 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,05}{16 \cdot 10^{-6}} = 1,48 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (4.39)$$

Odpor jedné fáze klece rotoru

$$R_2 = R_t + \frac{2 R_{kn}}{\Delta^2} = 1,302 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 3,87 \cdot 10^{-6}}{0,39^2} = 1,99 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (4.40)$$

Kde činitel přepočtu proudů v kruhu na proud v tyči

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Q_r} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{16} = 0,39 \quad (4.41)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= \frac{h_3}{3b} k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_0}{2b} + \frac{h_{0s}}{b_0} + \frac{h_2}{b} \right) k_{\beta'} = \\ &= \frac{4,9}{3 \cdot 5,5} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{2,5}{2 \cdot 5,5} + \frac{0,2}{2,5} + \frac{0,2}{5,5} \right) \cdot 1 = \\ &= 0,97 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Při plném kroku pro jednovrstvá vinutí platí $k_\beta = k_{\beta'} = 1$

Činitel magnetické vodivosti čel vinutí statoru

$$\begin{aligned} \lambda_{cs} &= 0,64 \frac{q}{l_e} (l_\xi - 0,64 t_p) \\ &= 0,64 \cdot \frac{2}{0,05} \cdot (88,70 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 60,48 \cdot 10^{-3}) = \\ &= 0,68 \end{aligned} \quad (4.43)$$

Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_s}{2pm} = \frac{12}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 2 \quad (4.44)$$

Kde pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 38,5}{2 \cdot 1} = 60,48 \text{ mm} \quad (4.45)$$

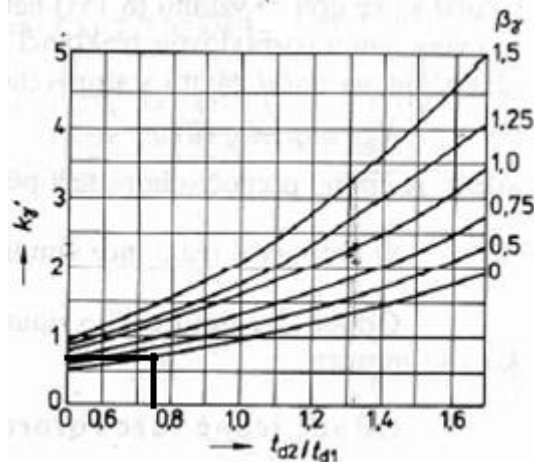
Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statorového vinutí

$$\lambda_{difs} = \frac{t_{ds}}{12\delta k_c} \xi = \frac{10,08 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,00025 \cdot 1,20} \cdot 0,7887 = 1,93 \quad (4.46)$$

Kde činitel

$$\xi = 2 k_{\gamma'} - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{dr}}{t_{ds}} \right)^2 = 2 \cdot 0,65 - 0,97^2 \cdot \left(\frac{7,46}{10,08} \right)^2 = 0,7887 \quad (4.47)$$

Činitel k vypočtení magnetické vodivosti diferenčního rozptylu k_{γ} byl určen z křivek na obrázku 4.5 (Činitel natočení drážek $\beta\gamma = 0$)



Obrázek 4.3 Činitel k_{γ} [7]

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí

$$X_s = 15,8 \frac{f}{100} \left(\frac{N}{100} \right)^2 \frac{l_e}{pq} (\lambda_{ds} + \lambda_{cs} + \lambda_{difs}) = \quad (4.48)$$

$$= 15,8 \cdot \frac{400}{100} \cdot \left(\frac{56}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,05}{2 \cdot 1} \cdot (0,97 + 0,68 + 1,93) = 1,77 \Omega$$

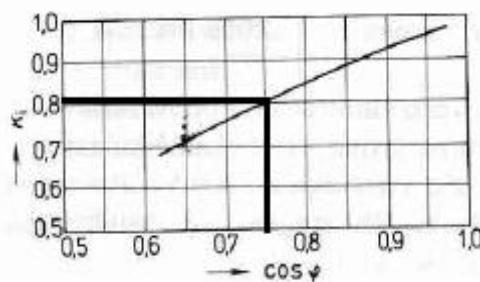
Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru

$$\lambda_{dr} = 0,3 + 1,12 \left(\frac{h_{or}}{I_{nr}} \right) 10^6 = 0,3 + 1,12 \cdot \left(\frac{0,185 \cdot 10^{-3}}{63,94} \right) \cdot 10^6 = 3,54 \quad (4.49)$$

Kde proud v jedné tyči klece rotoru

$$I_{nr} = k_i I_{ns} p_i = 0,8 \cdot 3,94 \cdot 20,28 = 63,94 \text{ A} \quad (4.50)$$

Kde činitel k_i se určí z obrázku 4.6



Obrázek 4.4 Činitel k_i [7]

Kde jmenovitý proud vinutí statoru jedné fáze

$$I_{ns} = \frac{P_2}{\cos \varphi \eta m U_f} = \frac{750}{0,75 \cdot 0,637 \cdot 3 \cdot 132,8} = 3,94 \text{ A} \quad (4.51)$$

Činitel přepočtu proudů

$$p_i = \frac{2 m N k_{v1}}{Q_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 56 \cdot 0,97}{16} = 20,28 \quad (4.52)$$



Činitel magnetické vodivosti čel vinutí rotoru

$$\begin{aligned}\lambda_{cr} &= \frac{2,3 D_{kn}}{Q_r l_e \Delta^2} \log \frac{4,7 D_{kn}}{a_{kn} + 2b_{kn}} = \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,028}{16 \cdot 0,05 \cdot 0,39^2} \log \frac{4,7 \cdot 0,028}{8,43 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,008} = 5,16 \cdot 10^{-5}\end{aligned}\quad (4.53)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotorového vinutí

$$\lambda_{difr} = \frac{t_{dr}}{12\delta k_c} \xi = \frac{7,48 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,20} \cdot 1 = 2,08 \quad (4.54)$$

Kde činitel $\xi = 1$, jelikož $Q_r/p \geq 10$

Rozptylová reaktance jedné fáze klece rotoru

$$\begin{aligned}X_r &= 7,9 f l_e (\lambda_{dr} + \lambda_{cr} + \lambda_{difr}) 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 400 \cdot 0,05 \cdot (3,54 + 5,16 \cdot 10^{-5} + 2,08) \cdot 10^{-6} = \\ &= 8,87 \cdot 10^{-4} \Omega\end{aligned}\quad (4.55)$$

4.2.3 Parametry náhradního obvodu

Odpor jedné fáze statorového vinutí

$$R_1 = 0,60 \Omega$$

Odpor jedné fáze klece rotoru přepočítaný na statorové vinutí

$$R_{2'} = R_2 4m \frac{(N k_{v1})^2}{Q_r} = 1,99 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(56 \cdot 0,97)^2}{16} = 0,44 \Omega \quad (4.56)$$

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí

$$X_s = 1,77 \Omega$$

Rozptylová reaktance jedné fáze klece rotoru přepočítaná na statorové vinutí

$$X_{r'} = X_r 4m \frac{(N k_{v1})^2}{Q_r} = 8,87 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(56 \cdot 0,97)^2}{16} = 1,95 \Omega \quad (4.57)$$

Odpor příčné větve náhradního obvodu

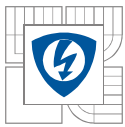
$$R_{12} = \frac{\Delta P_{Feh}}{m I_\mu^2} = \frac{173,30}{3 \cdot 3,54^2} = 4,62 \Omega \quad (4.58)$$

Reaktance příčné větve náhradního obvodu

$$X_{12} = \frac{U_f}{I_\mu} - X_s = \frac{132,8}{3,54} - 1,77 = 35,77 \Omega \quad (4.59)$$

Hopkinsonův činitel

$$c \approx 1 + \frac{X_s}{X_{12}} = 1 + \frac{1,77}{35,77} = 1,05 \quad (4.60)$$



Magnetizační impedance

$$\bar{Z}_\mu = \frac{jR_{Fe} X_{12}}{R_{Fe} + jX_{12}} = \frac{j \cdot 257,96 \cdot 35,77}{252,96 + j35,77} = 5,06 + j35,76 \Omega \quad (4.61)$$

Kde odpor respektující ztráty v železe se vypočte jako

$$R_{Fe} = \frac{3 E_m^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{3 \cdot 124,83^2}{181,23} = 257,96 \Omega \quad (4.62)$$

Potom napětí ve vzduchové mezeře

$$E_m = 0,94 U_f = 0,94 \cdot 132,8 = 124,83 V \quad (4.63)$$

Impedance statorového obvodu

$$\bar{Z}_s = R_1 + jX_s = 0,60 + j1,77 \Omega \quad (4.64)$$

Impedance rotorového obvodu

$$\bar{Z}_r = \frac{R_2'}{s} + jX_{r'} = \frac{0,44}{0,0125} + j1,95 = 35,2 + j1,95 \Omega \quad (4.65)$$

Celková impedance:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_c &= \frac{\bar{Z}_\mu \bar{Z}_r}{\bar{Z}_\mu + \bar{Z}_r} + \bar{Z}_s = \\ &= \frac{5,06 + j35,76 \cdot 35,2 + j1,95}{(5,06 + j35,76) + (35,2 + j1,95)} + 0,60 + j1,77 = \\ &= 16,29 + j18,39 \Omega \end{aligned} \quad (4.66)$$

4.3 Výpočet ztrát

4.3.1 Ztráty v železe

Hmotnost jha statoru

$$\begin{aligned} m_{js} &= \pi(D_e - h_{js}) h_{js} l_e k_{Fe} \gamma_{Fe} = \\ &= \pi(75,5 \cdot 10^{-3} - 10,25 \cdot 10^{-3}) \cdot 10,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 \cdot 0,97 \cdot 7,85 \cdot 10^3 = \\ &= 0,81 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.67)$$

Kde hustota oceli $\gamma_{Fe} = 7,85 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$

Hmotnost zubů statoru

$$\begin{aligned} m_{zs} &= Q_s h_{ds} b_{zs} l_e k_{Fe} \gamma_{Fe} = \\ &= 12 \cdot 8,2 \cdot 10^{-3} \cdot 4,85 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 \cdot 0,97 \cdot 7,85 \cdot 10^3 = 0,18 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.68)$$

Potom hlavní ztráty v železe

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \left(\frac{f}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{js}^2 m_{js} + k_{dz} B_{zs}^2 m_{zs}) = \\ &= 2,5 \cdot \left(\frac{400}{50} \right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,34^2 \cdot 0,81 + 1,8 \cdot 1,50^2 \cdot 0,18) = \\ &= 173,30 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.69)$$

Kde k_{dj} a k_{dz} jsou činitelé uvažující vliv nerovnoměrností rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku. U strojů o výkonu do 250 kW je k_{dj} přibližně 1,6 a k_{dz} přibližně 1,4.

Měrné ztráty v železe $\Delta p_{1,0}$ se berou z tabulky 4.3 pro elektrotechnickou ocel třídy 2013.

Elektrotechnická ocel třídy		Tloušťka plechů (mm)	$\Delta p_{1,0/50}$ (W · kg ⁻¹)	β
GOST	2013, 2011, 2211	0,5	2,5 až 2,6	1,5
	2312	0,5	1,75	1,4
	2411	0,5	1,6	1,3

Tabulka 4.3 Měrné ztráty a hodnoty β [7]

Hustota povrchových ztrát rotoru

$$\begin{aligned} p_{\delta pr} &= 0,5 k_{or} \left(\frac{Q_s n}{10000} \right)^{1,5} (B_{or} t_{ds} 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{12 \cdot 24000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,3352 \cdot 10,08 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 1,33 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned} \quad (4.70)$$

Kde $k_{or}=1,5$ je činitel zahrnující vliv opracování hlav a zubů

Kde synchronní otáčky

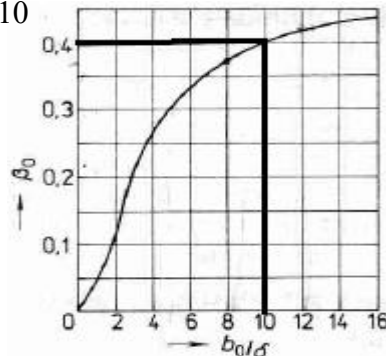
$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 400}{1} = 24000 \text{ min}^{-1} \quad (4.71)$$

Amplituda pulzací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů rotoru

$$B_{or} = \beta_{or} k_c B_\delta = 0,4 \cdot 1,20 \cdot 0,70 = 0,34 \text{ T} \quad (4.72)$$

Kde β_{or} se určí z obrázku 4.7

Poměr $b_o/\delta = 2,5/0,25=10$



Obrázek 4.5 Závislost $\beta_0 = f(b_o/\delta)$ [7]



Povrchové ztráty rotoru

$$\Delta P_{\delta pr} = p_{\delta pr} t_{dr} Q_r l_e = 1,33 \cdot 10^3 \cdot 7,48 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 0,05 = 7,93 \text{ W} \quad (4.73)$$

Pulzní ztráty v zubech rotoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{pr} &= 0,11 \left(\frac{Q_s n}{1000} B_{pr} \right)^2 m_{zs} = \\ &= 0,11 \cdot \left(\frac{12 \cdot 24000}{1000} \cdot 1,12 \cdot 10^{-5} \right)^2 \cdot 0,18 = 3,80 \cdot 10^{-8} \text{ W} \end{aligned} \quad (4.74)$$

Kde amplituda pulzací frekvence v zubech rotoru

$$B_{pr} = \frac{\gamma \delta}{2 t_{dr}} B_{zr} = \frac{6,67 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,48 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,80 = 1,12 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad (4.75)$$

Hmotnost zubů rotoru

$$\begin{aligned} m_{zr} &= Q_r h_{dr} b_{zr} l_e k_{Fe} \gamma_{Fe} = \\ &= 16 \cdot 1,815 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 \cdot 0,97 \cdot 7,85 \cdot 10^3 = 0,0323 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.76)$$

Celkové ztráty v železe

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fe} &= \Delta P_{Feh} + \Delta P_{\delta pr} + \Delta P_{pr} = \\ &= 173,30 + 7,93 + 3,80 \cdot 10^{-8} = 181,23 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.77)$$

4.3.2 Ztráty ve vinutí

Elektrické ztráty ve všech fázích vinutí statoru

$$\Delta P_{js} = m R_1 I_{ns}^2 = 3 \cdot 0,60 \cdot 3,94^2 = 27,82 \text{ W} \quad (4.78)$$

Elektrické ztráty v klecovém vinutí rotoru nakrátko

$$\Delta P_{jr} = Q_r R_2 I_{nr}^2 = 16 \cdot 1,99 \cdot 10^{-4} \cdot 63,94^2 = 13,02 \text{ W} \quad (4.79)$$

4.3.3 Mechanické ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= K_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (10D)^3 = 5 \cdot \left(\frac{24000}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot 0,0385)^3 = \\ &= 164,35 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.80)$$

Kde činitel $K_T=5$ pro $2p=2$

Jedná se pouze o odhad, z měření naprázdno, které je popsáno v kapitole 6.2 bylo zjištěno, že ztráty mají hodnotu $\Delta P_m=61,12 \text{ W}$, s těmito ztráty bude i nadále počítáno.

4.3.4 Dodatečné ztráty

$$\Delta P_d = 0,005 P_2 = 0,005 \cdot 750 = 3,75 \text{ W} \quad (4.81)$$



4.3.5 Celkové ztráty a účinnost motoru

Celkové ztráty

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{js} + \Delta P_{jr} + \Delta P_m + \Delta P_d = \\ &= 181,23 + 27,82 + 13,02 + 61,12 + 3,75 = 286,94 \text{ W}\end{aligned}\quad (4.82)$$

Účinnost motoru

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} 100 = \frac{750}{750 + 286,94} \cdot 100 = 72,33 \% \quad (4.83)$$

4.4 Veličiny pro určení pracovní charakteristiky

Záběrný proud

$$\begin{aligned}I_z &= \frac{U_f}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_s + X_{r'})^2}} = \frac{132,8}{\sqrt{(0,60 + 0,44)^2 + (1,77 + 1,95)^2}} = \\ &= 34,38 \text{ A}\end{aligned}\quad (4.84)$$

Záběrný moment

$$M_z = \frac{3R_2' I_z^2 p}{\omega} = \frac{3 \cdot 0,44 \cdot 34,38^2 \cdot 1}{2\pi \cdot 400} = 0,62 \text{ Nm} \quad (4.85)$$

Skluz zvratu

$$\begin{aligned}s_z &= \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_s + cX_{r'})^2}} = \frac{0,44}{\sqrt{0,60^2 + (1,77 + 1,05 \cdot 1,95)^2}} \cdot 100 = \\ &= 11,30 \%\end{aligned}\quad (4.86)$$

Maximální moment

$$\begin{aligned}M_{max} &= \frac{3p}{2\omega} \frac{U_f^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_s + cX_{r'})^2}} \\ &= \frac{3 \cdot 1}{2 \cdot 2\pi \cdot 400} \cdot \frac{132,8^2}{0,60 + \sqrt{0,60^2 + (1,77 + 1,05 \cdot 1,95)^2}} \\ &= 2,36 \text{ Nm}\end{aligned}\quad (4.87)$$

Jmenovitý skluz

$$s = \frac{n - n_1}{n} 100 = \frac{24000 - 23700}{24000} \cdot 100 = 1,25 \% \quad (4.88)$$

Jmenovitý moment

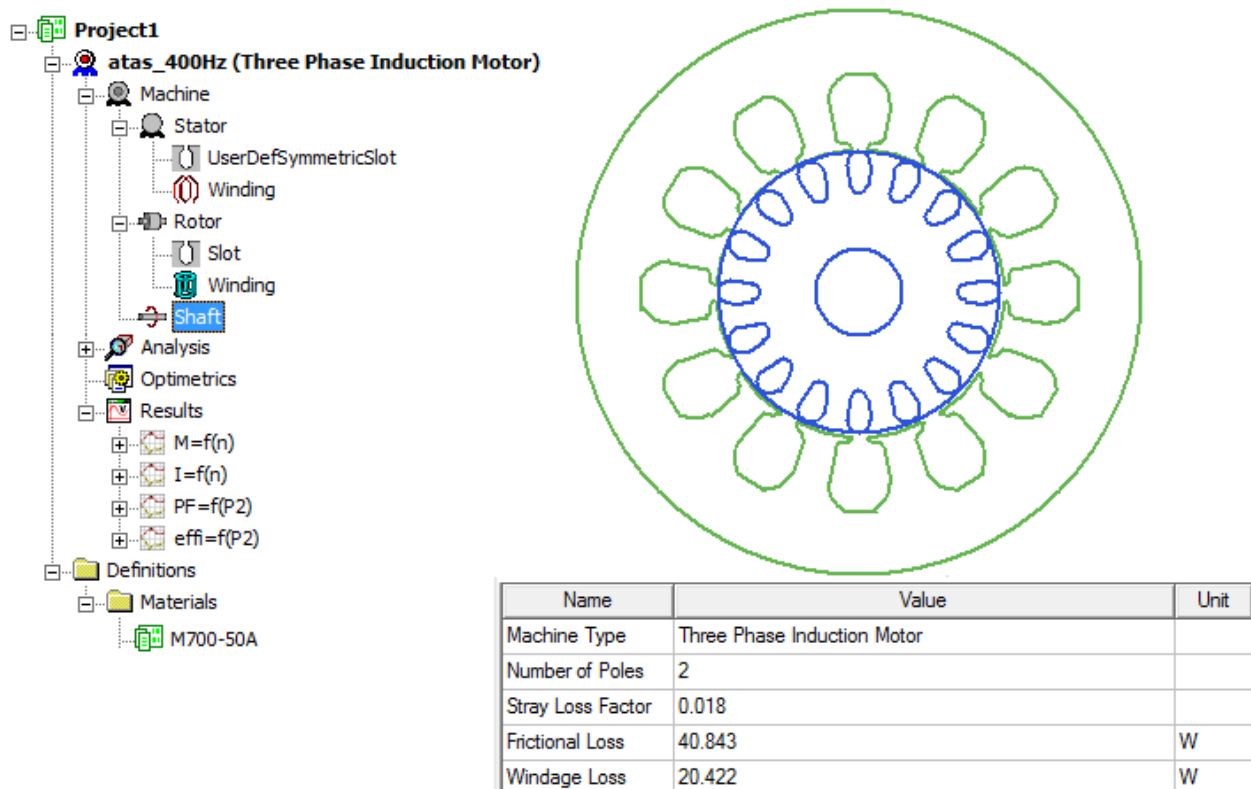
$$M_{jm} = \frac{P_2}{\frac{\omega}{p}(1-s)} = \frac{750}{\frac{2\pi \cdot 400}{1}(1-0,0125)} = 0,30 \text{ Nm} \quad (4.89)$$

5. ANALYTICKÝ VÝPOČET V PROGRAMU RMXprt

ANSYS RMXprt je program pro návrh a optimalizaci elektrických točivých strojů. Program využívá analytických vztahů při výpočtech. Výpočet je proveden na základě konstrukčních parametrů a požadovaných vlastností stroje. Výstupem jsou pak základní data pro vyhodnocení stroje, např. hodnoty magnetických indukcí, ztrát, proudů, odporů, atd.

5.1 Vytvoření modelu

V prostředí RMXprt byl vytvořen model motoru podle výkresové dokumentace. Nejprve byl vybrán třífázový asynchronní motor a byly zadány synchronní otáčky, počet pólů a také mechanické ztráty, které jsou rozděleny na třecí (tvoří $\frac{2}{3}$ mechanických ztrát) a ventilační ztráty (tvoří $\frac{1}{3}$ mechanický ztrát). Dále pak byly zadány parametry statoru, statorové drážky a vinutí, pak parametry rotoru, rotorové drážky a klece. Důležitým faktorem bylo nadefinování statorových a rotorových plechů. Pro stator i rotor byl vybrán plech M700- 50A. Hodnoty pro tento plech byly zvoleny z katalogu od firmy ThyssenKrupp Steel. Do materiálové knihovny byly následně naimportovány křivky prvotní magnetizace a měrných ztrát v závislosti na magnetické indukci. Na obrázku 5.1 je zobrazen strom projektu, zadané parametry a nakreslený model motoru.



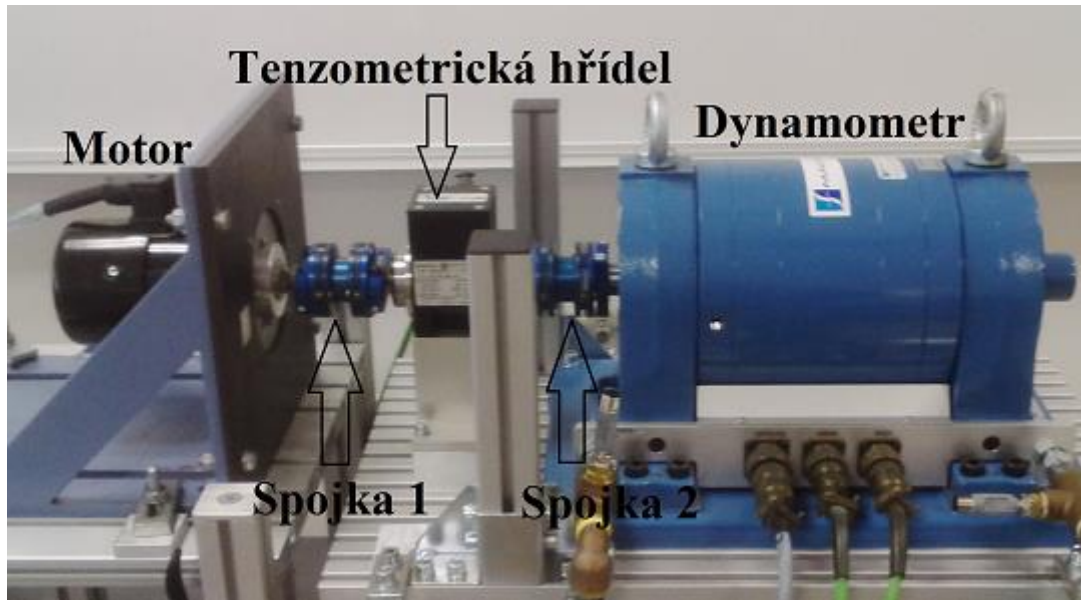
Obrázek 5.1 Strom projektu, zadané parametry a model motoru

Před spuštěním samotné analýzy byly zadány jmenovité hodnoty motoru a analýza byla spuštěna. Jmenovité hodnoty: frekvence $f=400\text{ Hz}$, výkon $P_2=750\text{ W}$, otáčky $n_1=23700\text{ min}^{-1}$, sružené napětí $U_s=230\text{ V}$, teplota $t=80\text{ °C}$ a jednalo se o zapojení do hvězdy Wye. Po ukončení analytického výpočtu byly vytvořeny grafy: moment a proud v závislosti na otáčkách a účinník a účinnost v závislosti na výkonu. Grafy a hodnoty, které vzešly z této analýzy, budou porovnávány a vyhodnoceny v kapitole 7.

6. MĚŘENÍ VYSOKOOTÁČKOVÉHO MOTORU

Měření bylo provedeno na poskytnutém vzorku vysokootáčkového motoru a byly měřeny jednotlivé ztráty. Bylo realizováno měření naprázdno a při zatížení. Motor nemohl být teplotně ustálen, jelikož má malou tepelnou konstantu a při delším chodu se výrazně zahřívá.

Na obrázku 6.1 je zachyceno měřicí pracoviště motoru.



Obrázek 6.1 Měřicí pracoviště motoru

6.1 Měření odporů vinutí

Měření odporů se provádí podle normy [11] před začátkem a po ukončení měření. Vinutí je zapojeno do hvězdy, proto se musí výsledný odpor vydělit dvěma.

	$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$R_3 (\Omega)$	$R_{prům}$
Před zk. naprázdno	1,029	1,043	1,044	1,039
Po zk. naprázdno	1,045	1,06	1,062	1,056

Tabulka 6.1 Naměřené hodnoty odporů

Kde odpor statorového vinutí

$$R_{s1} = \frac{R_{prům}}{2} = \frac{1,039}{2} \doteq 0,52 \Omega \quad (6.1)$$

$$R_{s2} = \frac{R_{prům}}{2} = \frac{1,056}{2} \doteq 0,53 \Omega \quad (6.2)$$

6.2 Zkouška naprázdno

Účelem zkoušky naprázdno je zjistit velikost ztrát v železe a mechanických ztrát. Zkouška naprázdno se provádí při osmi hodnotách napětí včetně jmenovitého. Při hodnotách 110 %, 100%, 95 % a 90 % jmenovitého napětí se určují ztráty v železe a při hodnotách 60 %, 50 %, 40 %, 30 % jmenovitého napětí se určují ztráty mechanické, tzn. tření a ventilační.

(%)	U_s (V)	I_0 (A)	P_0 (W)	$\cos \Phi$ (-)	R_0 (Ω)	ΔP_s (W)	ΔP_c (W)	ΔP_{Fe} (W)
110	253,14	5,54	394,70	0,16	1,039	47,81	346,89	285,7643
100	230,25	4,32	303,60	0,18	1,044	29,22	274,38	213,2594
95	218,64	3,88	271,60	0,18	1,045	23,65	247,95	186,8328
90	207,20	3,52	244,65	0,19	1,047	19,50	225,15	164,0285
60	138,17	2,10	133,10	0,27	1,053	6,93	126,17	65,0489
50	115,30	1,76	117,98	0,34	1,053	4,89	113,08	51,96344
40	92,24	1,44	94,19	0,41	1,055	3,28	90,91	29,78842
30	69,18	1,21	78,81	0,54	1,056	2,32	76,49	15,36668

Tabulka 6.2 Naměřené a vypočítané hodnoty měření naprázdno

Po měření se nejprve vypočítají konstantní ztráty a to odečtením ztrát naprázdno ve vinutí od příkonu naprázdno.

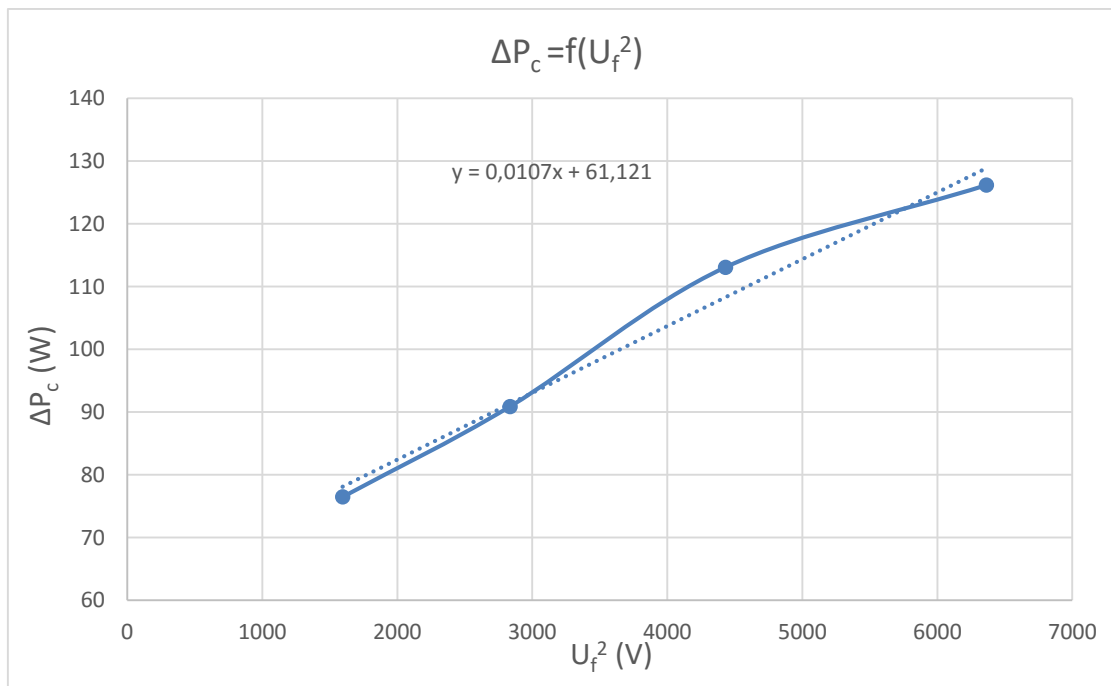
$$\Delta P_c = P_0 - \Delta P_s \quad (6.3)$$

Kde ztráty ve vinutí naprázdno

$$\Delta P_s = 1,5 I_0^2 - R_0 \quad (6.4)$$

Přičemž odpor R_0 je dán interpolací v každém napěťovém bodě z odporů před a po zkoušce (R_{s1} a R_{s2}) a to lineárně s výkonem naprázdno.

Následně je možné vypočítat mechanické ztráty, a to vytvořením křivky konstantních ztrát v závislosti na druhé mocnině napětí. Výsledné ztráty pak jsou dosaženy extrapolací přímky do nuly.



Obrázek 6.2 Konstantní ztráty v závislosti na druhé mocnině fázového napětí

Z grafu je lze vyčíst, že mechanické ztráty jsou $\Delta P_m = 61,121$ W. Nakonec je možné vypočítat ztráty v železe.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_c - \Delta P_m \quad (6.5)$$

6.3 Zkouška při zatížení

Z měření při jmenovitém zatížení lze určit ztráty ve vinutí statoru a kleci rotoru, ztráty v železe a dodatečné ztráty. Motor byl připojen přes spojky na dynamometr, na kterém byl nastaven zátěžný moment. Napájecí napětí ($U_f=132,8 \text{ V}$) a frekvence ($f=400 \text{ Hz}$) byly konstantní, měnil se pouze moment, který byl nastaven od hodnoty $0,1 \text{ Nm}$, přibližně po kroku $0,05 \text{ Nm}$, do přibližné hodnoty $1,5x M_{jm}$ (jmenovitý moment), což je $0,3 \text{ Nm}$. Při prvním měření nebyl motor zatížen, moment, který vzniknul, byl způsoben třením a ventilací spojky 2 a dynamometru. Důležitým faktem je, že tenzometrická hřídel, která má rozsah 10 Nm , je zatížena chybou, která činí $0,1 \%$, což při definovaných otáčkách a maximálním rozsahu činí $\pm 25 \text{ W}$.

$$P_{chyba} = M \omega = M \frac{2 \pi n_1}{60} = 0,01 \cdot \frac{23921}{60} = 25,05 \text{ W} \quad (6.6)$$

I (A)	P ₁ (W)	cos Φ(-)	sin Φ(-)	M (Nm)	n ₁ (min ⁻¹)	P ₂ (W)	η (%)
4,51	612,6	0,34	0,94	0,09	23921	309,34	50,50
4,55	647,4	0,36	0,93	0,11	23914	275,47	42,55
4,75	807,9	0,43	0,90	0,17	23876	425,05	52,61
4,92	939,9	0,48	0,88	0,21	23856	534,61	56,88
5,13	1073,4	0,53	0,85	0,26	23826	656,20	61,13
5,36	1209,8	0,57	0,82	0,31	23800	780,10	64,48
5,61	1347,4	0,61	0,80	0,36	23765	905,87	67,23
5,88	1485,2	0,64	0,77	0,42	23735	1038,95	69,95
6,16	1628,4	0,67	0,74	0,47	23696	1158,83	71,16
U _i (V)	s (-)	ΔP _{Fe} (W)	ΔP _{js} (W)	ΔP _{jr} (W)	ΔP _d (W)		
130,54	0,0033	203,42	37,49	1,22	0,00		
130,44	0,0036	202,98	38,16	1,46	-18,18		
130,01	0,0052	201,01	41,54	2,92	-10,13		
129,64	0,0060	199,39	44,67	4,18	9,53		
129,28	0,0073	197,78	48,59	6,00	17,33		
128,90	0,0083	196,11	53,06	8,01	25,01		
128,53	0,0098	194,51	58,04	10,72	30,74		
128,15	0,0110	192,87	63,67	13,57	28,63		
127,77	0,0127	191,22	69,91	17,32	43,61		

Tabulka 6.3 Naměřené a vypočítané hodnoty při měření při zatížení

Kde výstupní výkon

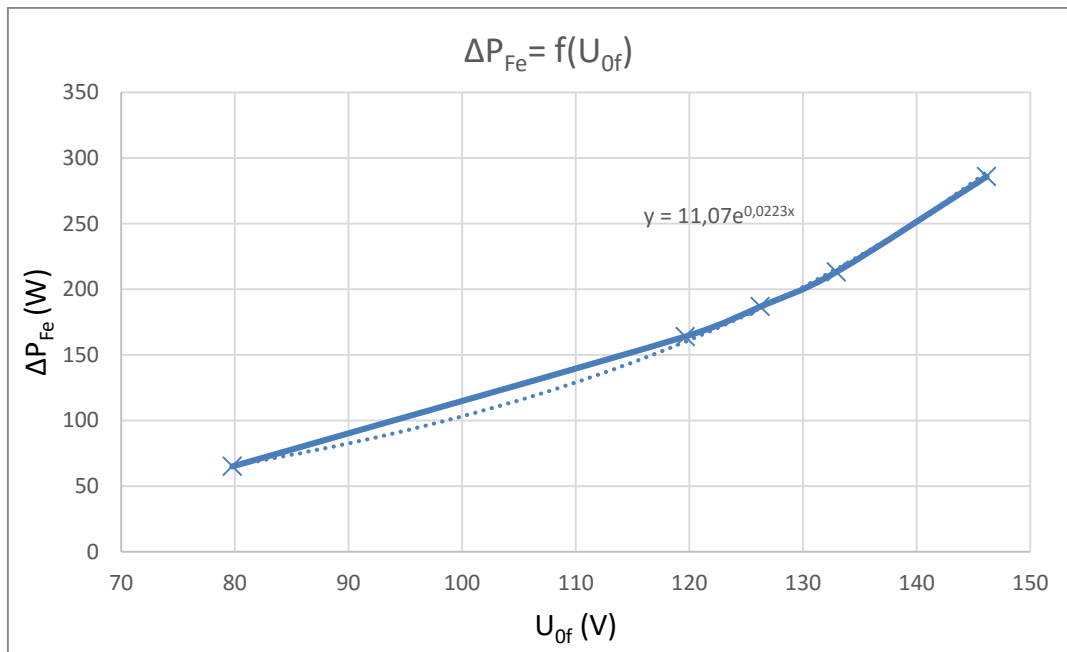
$$P_2 = M \omega = M \frac{2 \pi n_1}{60} \quad (6.7)$$

Ztráty v železe při plném zatížení (obr. 6.3) se interpolují ze ztrát v železe z měření naprázdno nad křivkou napětím U_0 při indukovaném napětí U_i , které je dáno vztahem:

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} I R \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I R \sin \varphi\right)^2} \quad (6.8)$$

Kde

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (6.9)$$



Obrázek 6.3 Ztráty v železe při zatížení v závislosti na napětí naprázdno

Ztráty ve vinutí statoru, kde se odpor R určuje jako u zkoušky naprázdno

$$\Delta P_{js} = 1,5 I^2 - R \quad (6.10)$$

Ztráty ve vinutí rotoru

$$\Delta P_{jr} = (P_1 - \Delta P_{js} - \Delta P_{Fe}) s \quad (6.11)$$

Kde skluz

$$s = \frac{n - n_1}{n} \quad (6.12)$$

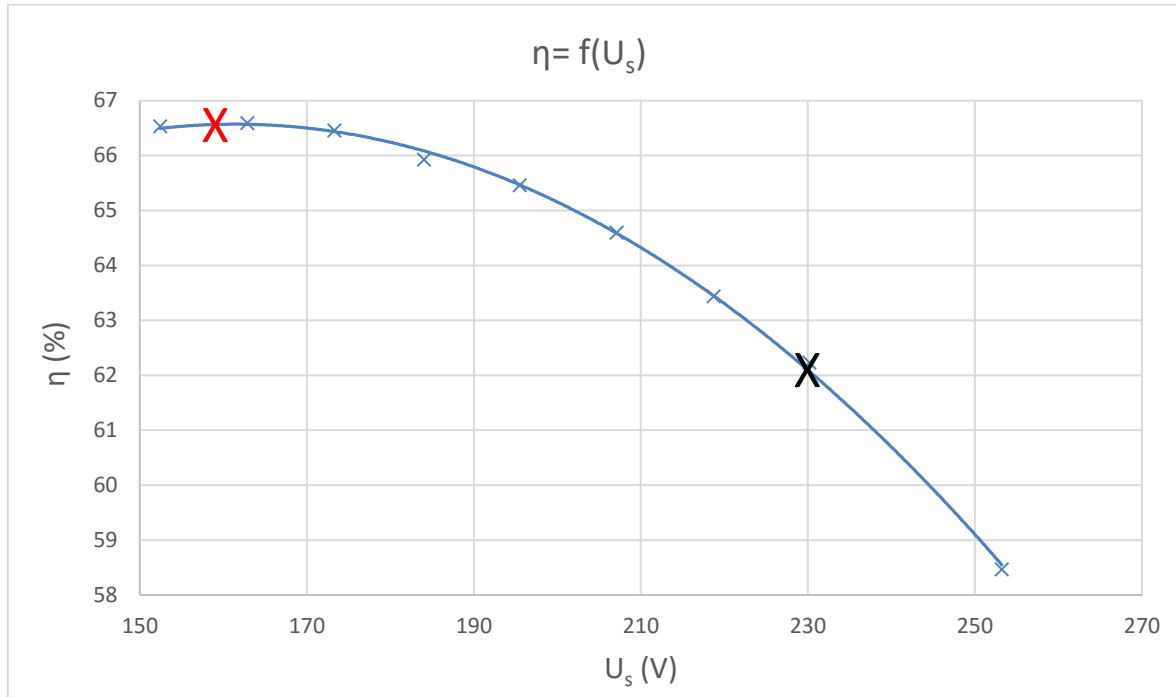
Dodatečné ztráty

$$\Delta P_d = (P_1 - P_2 - \Delta P_{js} - \Delta P_{jr} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_m) \quad (6.13)$$

Dodatečné ztráty, které vznikly v prvním měření bez zatížení, činily 86,39 W. Nejedná se však o dodatečné ztráty, ale o ztráty, které vznikly na spojce 1. Důvodem, proč tyto ztráty dosahují takové hodnoty, je dáno tím, že spojka není dostatečně hladká a při vysokých otáčkách se zvyšuje tření o vzduch a tím pádem i ztráty. Dalším důvodem je už zmíněná chyba tenzometrické hřídele, která také může zkreslovat výsledek měření. Hodnota dodatečných ztrát při prvním měření je tedy nula a to z toho důvodu, že ztráty na spojce 1 byly přičteny k výkonu motoru, jelikož tenzometrická hřídel udává výkon motoru, který je ochuzen o ztráty na spojce 1. Můžeme tedy říci, že je motor zatěžován více, než ukazuje tenzometrická hřídel. Z dalších hodnot dodatečných ztrát byly odečteny ztráty na spojce 1. Záporné hodnoty těchto ztrát dokládají chybu, které se dopouští tenzometrická hřídel. Z měření vyplývá, že dodatečné ztráty rostou se zatížením. Celá kapitola 6 čerpá z literatury [11].

6.4 Měření napět'ové charakteristiky

Na závěr celého měření byla vytvořena napět'ová charakteristika. Měření bylo provedeno při 110 %, 100 %, 95 %, 90 %, 85 %, 80 %, 75 % a 70 % jmenovitého napětí. Při změně napětí se také měnil moment, z něhož se vypočítal výkon a následně účinnost, která je dána podílem výkonu k příkonu.



Obrázek 6.4 Účinnost v závislosti na sdruženém napětí

V grafu jsou zvýrazněny dva body, přičemž bod X znázorňuje oblast, kde se motor pohyboval po dobu měření a bod X znázorňuje oblast, ve které by bylo vhodné se pohybovat. V tomto místě motor dosahuje největší účinnosti. Snížením sycení by bylo možné docílit toho, aby se motor dostal do této oblasti.

7. POROVNÁNÍ MĚŘENÍ A VÝPOČTŮ

Byly porovnávány tři platformy: měření, analytický výpočet a výpočet pomocí RMxpřtu. Hodnoty jednotlivých parametrů jako jsou magnetické indukce v jednotlivých částech stroje, odpory a reaktance náhradního obvodu a jednotlivé ztráty jsou vyobrazeny v tabulkách. Porovnání ztrát bylo provedeno při zvolených otáčkách 23800 min^{-1} . Základní parametry motoru byly porovnány při jmenovitém výkonu 750 W .

	Výpočet	RMxpřt
$B_{zs} \text{ (T)}$	1,50	1,30
$B_{zr} \text{ (T)}$	1,77	1,70
$B_{js} \text{ (T)}$	1,34	1,61
$B_{jr} \text{ (T)}$	0,99	1,03
$B_{\delta} \text{ (T)}$	0,70	0,67

Tabulka 7.1 Hodnoty magnetických indukcí

	Výpočet	RMxpřt
$R_1 \text{ (}\Omega\text{)}$	0,60	0,61
$R_2 \text{ (}\Omega\text{)}$	0,44	0,44
$X_s \text{ (}\Omega\text{)}$	1,77	1,24
$X_r \text{ (}\Omega\text{)}$	1,95	1,95
$X_{12} \text{ (}\Omega\text{)}$	35,77	37,47
$R_{Fe} \text{ (}\Omega\text{)}$	259,02	298,21

Tabulka 7.2 Parametry náhradního obvodu

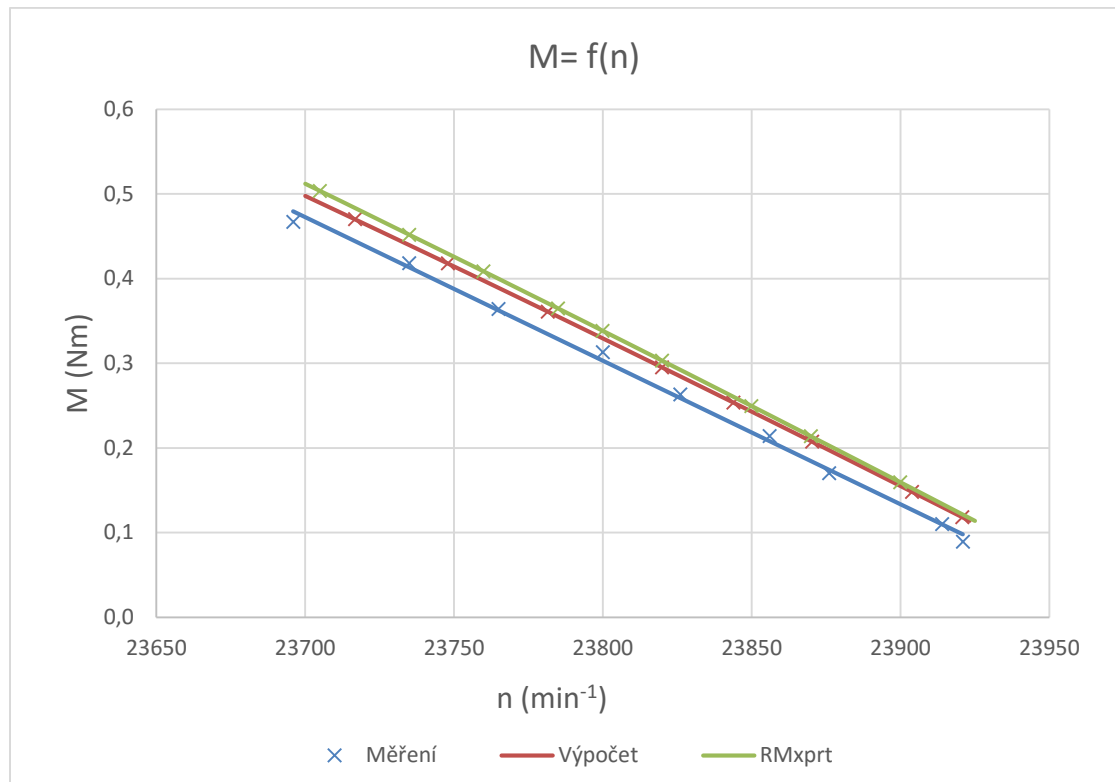
Ztráty	Měření	Výpočet	RMxpřt
$\Delta P_{Fe} \text{ (W)}$	196,11	179,5	160,29
$\Delta P_{js} \text{ (W)}$	53,06	37,45	35,24
$\Delta P_{jr} \text{ (W)}$	8,01	7,35	7,44
$\Delta P_m \text{ (W)}$	61,12	61,12	60,37
$\Delta P_d \text{ (W)}$	25,01	5,52	15,01

Tabulka 7.3 Hodnoty jednotlivých ztrát při zvolených otáčkách

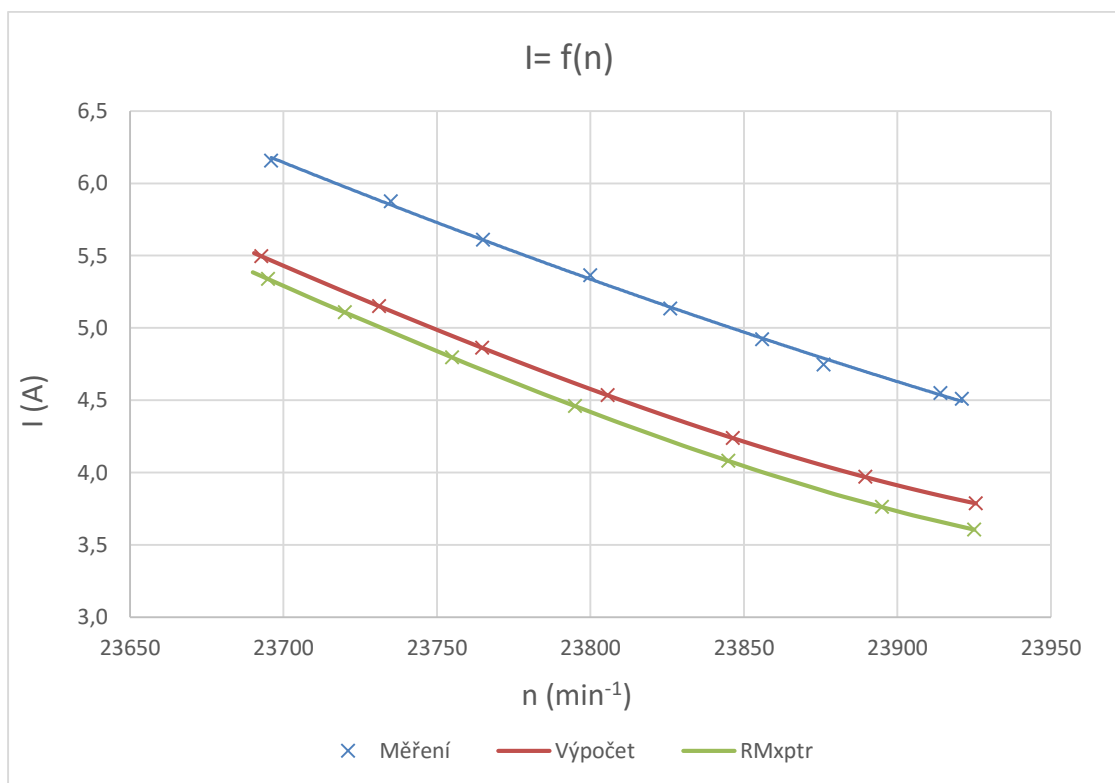
	$U_f \text{ (V)}$	$f \text{ (Hz)}$	$I \text{ (A)}$	$M \text{ (Nm)}$	$n \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$P_1 \text{ (W)}$	$P_2 \text{ (W)}$	$\Delta P \text{ (W)}$	$\eta \text{ (}\%\text{)}$
Měření	132,08	400	5,14	0,251	23824	1074,5	750,02	324,48	69,8
Výpočet	132,8	400	4,45	0,3	23820	1038	749,7	288,2	72,23
RMxpřt	132,8	400	4,31	0,3	23823	1025,83	749,78	276,05	73,09

Tabulka 7.4 Porovnání parametrů při jmenovitém výkonu

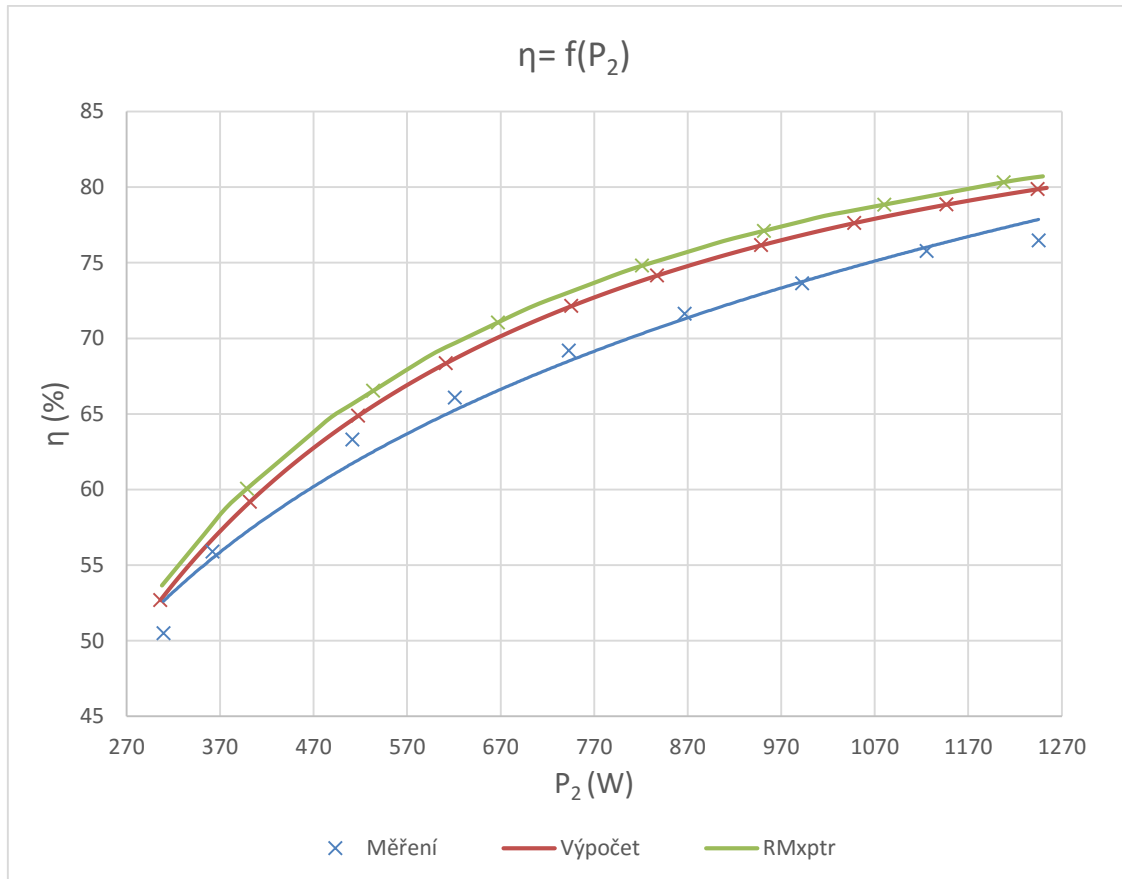
Dále byly vytvořeny charakteristiky: $M = f(n)$, $I = f(n)$, $\eta = f(P_2)$ a $\cos \varphi = f(P_2)$



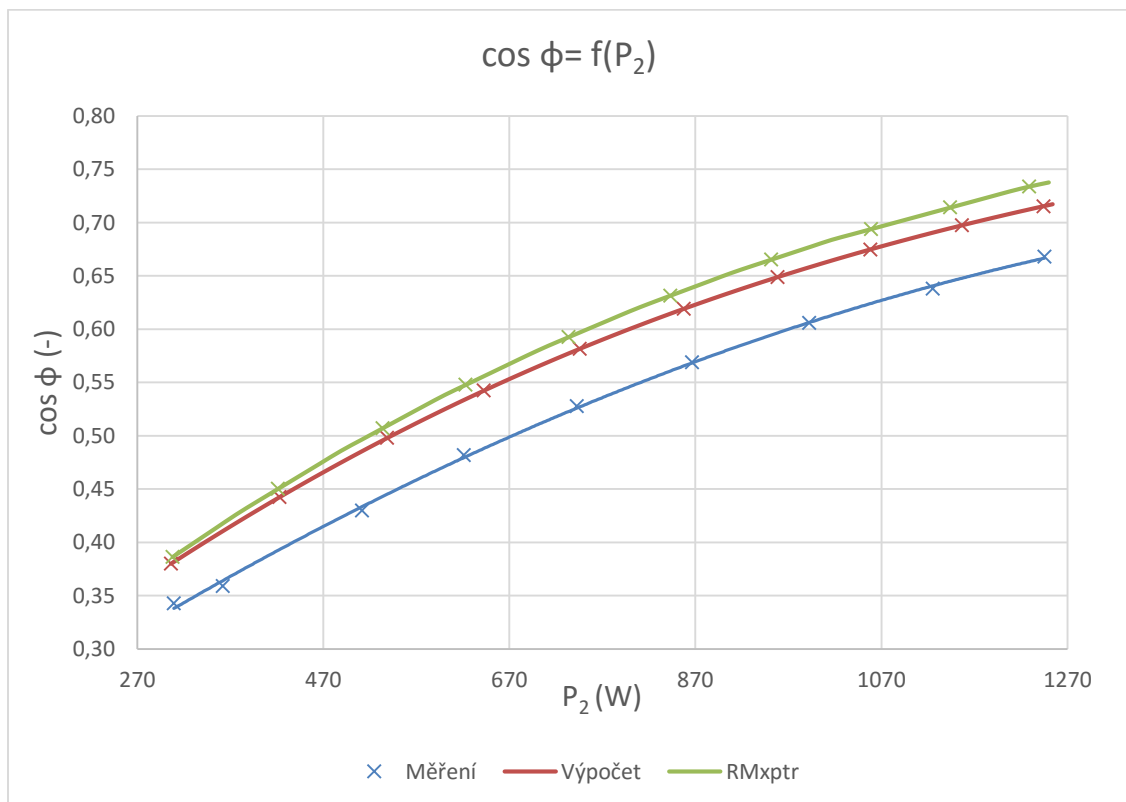
Obrázek 7.1 Moment v závislosti na otáčkách



Obrázek 7.2 Proud v závislosti na otáčkách



Obrázek 7.3 Účinnost v závislosti na výkonu



Obrázek 7.4 Účinník v závislosti na výkonu



8. ZÁVĚR

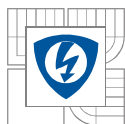
V této bakalářské práci byl v úvodu popsán princip a konstrukce asynchronního stroje. Tyto stroje jsou principiálně i konstrukčně velmi jednoduché. Jsou téměř bezúdržbové a velmi spolehlivé, proto se hojně využívají. Díky frekvenčním měničům jejich význam na trhu ještě vzrostl právě kvůli plynulé regulaci otáček.

U vysokootáčkových motorů je konstrukce statoru velmi podobná, avšak rotor, který je nejvýznamnější částí u těchto motorů, se výrazně liší. Co se týče ztrát, tak velmi významnou roli u těchto motorů hrají mechanické ztráty. Díky velmi vysokým otáčkám mohou mechanické ztráty být až několikanásobně vyšší než u klasických asynchronních motorů. Ztráty v rotoru jak ve vinutí, tak v železe jsou srovnatelné. Ztráty v železe statoru bývají vyšší ve vysokootáčkových motorech, a to hlavně kvůli vířivým ztrátám, které jsou závislé na frekvenci. Ve vinutí statoru jsou ztráty nižší u vysokootáčkových motorů a to díky menšímu odporu ve vinutí.

V další části této práce byl proveden zjednodušený výpočet pomocí výkresové dokumentace. Byl zvolen konkrétní vysokootáčkový motor, který byl vyroben jako klasický asynchronní motor. Má synchronní otáčky $24\,000\text{ min}^{-1}$ a používá se jako hobby vřeteno pro dřevo obrábění. Má však malý výkon, jen 750 W , a proto bylo obtížné odečíst hodnoty z charakteristik, které uvádí literatura pro tento výkon. Zejména šlo o účinnost a účinník motoru, který musel být zvolen na počátku výpočtu. Dále byly vypočítány magnetické indukce v jednotlivých částech motoru, poté magnetické napětí a následně i magnetizační proud. Byl také proveden výpočet odporů a reaktancí pro statorové vinutí a rotorovou klec. Odpory a reaktance rotorové klece pak byly přepočteny na statorové vinutí a byl sestaven náhradní obvod motoru. Vypočteny byly i jednotlivé ztráty, účinnost motoru a také hodnoty jednotlivých momentů.

V programu ANSYS RMXprt byl vytvořen model motoru podle výkresové dokumentace. Po vyplnění všech potřebných parametrů byla spuštěna simulace. Výstupem této simulace byly hodnoty jednotlivých parametrů a charakteristiky v závislosti na otáčkách a výkonu. Poté bylo provedeno měření na poskytnutém vzorku vysokootáčkového motoru. Motor byl měřen naprázdno a při zatížení. Ze zkoušky naprázdno byly určeny ztráty v železe, které pak slouží k vypočítání ztrát v železe při zatížení, a mechanické ztráty. Ze zkoušky při zatížení byly určeny ztráty ve vinutí statoru a kleci rotoru, dále pak již zmiňované ztráty v železe a dodatečné ztráty. Nakonec proběhlo měření napěťové charakteristiky.

Výsledné hodnoty z měření byly porovnány s analytickým výpočtem a výpočtem v programu RMXprt. Nejprve byly porovnány hodnoty magnetických indukcí jednotlivých částí stroje. Odchylky jsou nepatrné, až na indukci v zubu a jhu statoru, kde se RMXprt liší od analytického výpočtu. Odchylka může být způsobena tím, že u klasického výpočtu je počítána magnetická indukce v nejužším místě, kdežto RMXprt počítá a vyhodnocuje nejen v jednom místě. Poté byly porovnány jednotlivé parametry náhradního obvodu a ztráty v motoru. Výraznější odchylka u odporu R_{Fe} je způsobena rozdílnými ztrátami v železe, které jsou odlišné při výpočtu ve srovnání s měřením. Ztráty měřené jsou v porovnání s výpočtem vyšší. Rozdíly jsou dány konstrukcí a výrobou konkrétního motoru. Porovnávány byly i základní parametry motoru při jmenovitém výkonu. Také byly vytvořeny charakteristiky: $M = f(n)$, $I = f(n)$, $\eta = f(P_2)$ a $\cos \varphi = f(P_2)$. Vypočtené a naměřené charakteristiky motoru nevykazují výraznější rozdíly. Nejvýraznější odchylku měření a výpočtu vykazuje charakteristika statorového proudu v závislosti na otáčkách.



LITERATURA

- [1] PETROV G. N.: *Elektrické stroje. 2, Asynchronní stroje, synchronní stroje*. 1. vydání Praha: Academia, 1982
- [2] POLIAK, František, Viliam FEDÁK a Ladislav ZBORAY. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987, 614 s.
- [3] HAPPUNEN, Jussi. *High-speed solid-rotor induction machine electromagnetic calculation and design*. 2004. vyd. Lappeenranta teknillinen yliopisto: Digipaino, 2004. ISBN 951-764-981-9
- [4] KLUSÁČEK, J. *Návrh a analýza vysokorychlostního asynchronního motoru*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74 s.
- [5] Reliance Electric Technologies, LLC, Rotating assembly construction for high speed induction motor, vynálezce Edward J. Tompkin, United States Patent č. 6,177,750 B1, datum přihlášení vynálezu 23. 1. 2001
- [6] ONDRŮŠEK, CSC., Doc. Ing. Čestmír. *Asynchronní stroje*. Brno. [cit. 2015- 22-12] *Elektronické skriptum*. Vysoké učení technické Brno - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [7] KOPYLOV I. P.: *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání Praha: Státní nakladatelství technické literatury; Moskva: Mir, 1988
- [8] Ampérová síla znázorněna pomocí obrázku [online] dostupné z: <http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/wwwboard/viewtopic.php?topic=23974>
- [9] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcová. "Design of Rotating Electrical machines". první. [s.l.] : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B).
- [10] SVOREŇ, J. *Návrh vysokootáčkového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 89 s.
- [11] ČSN EN 60034-2-1 (350000). *Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.