



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

MOŽNOSTI ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI STÁVAJÍCÍHO VYSOKOOTÁČKOVÉHO STROJE

POSSIBILITIES OF IMPROVING EFFICIENCY OF HIGH-SPEED ELECTRICAL MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Nevřzal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Klíma

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Filip Nevrzal

ID: 173716

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Možnosti zvyšování účinnosti stávajícího vysokootáčkového stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s principem funkce asynchronních motorů. Detailně popište rozdělení ztrát.
2. Provedte měření na daném vzorku a podle výkresové dokumentace proveďte analytický výpočet v programu RMxpert.
3. Navrhněte úpravy stávajícího vzorku daného motoru a proveďte výpočet.
4. Výsledky měření a výpočtů porovnejte a vyhodnoťte.

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. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B).

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 31.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Jiří Klíma

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

První část této bakalářské práce stručně popisuje základní konstrukci a princip asynchronního stroje, rozdělení a popis jednotlivých ztrát. V další části je přiblíženo měření daného stroje. Dále je zde popis vytvoření modelu v prostředí RMXprt a následné porovnání simulovaných dat a charakteristik s naměřenými. V poslední části práce jsou navrženy a porovnány úpravy daného stroje simulované v prostředí RMXprt.

Klíčová slova

Asynchronní motor; Jouleovy ztráty; hysterezní ztráty; ztráty vířivými proudy; dodatečné ztráty; účinnost; měření naprázdno; měření při zatížení; ANSYS Maxwell; RMXprt

Abstract

First part of this bachelor's thesis briefly presents basic construction and principle of induction machine, distribution and description of individual losses. In the next part, there is a close look at the measurement of given machine. Next, there is a description of making a model in RMxpert and subsequent comparison of simulated data and characteristics to measured data. Last part describes and compares proposed changes of this motor simulated in RMxpert.

Keywords

Induction motor; hysteresis losses; eddycurrent losses; additional losses; efficiency; no-load measurement; torque measurement; ANSYS Maxwell; RMxpert

Bibliografická citace

NEVRZAL, F. *Možnosti zvyšování účinnosti stávajícího vysokootáčkového stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Klíma.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Možnosti zvyšování účinnosti stávajícího vysokootáčkového stroje 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **31. května 2017**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Klímovi za ochotu, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Také moc děkuji Aničce za kontrolu mé práce.

V Brně dne **31. května 2017**

.....

podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 ASYNCHRONNÍ STROJ	13
2.1 Konstrukce	13
2.2 Princip funkce	13
3 ZTRÁTY	14
3.1 Jouleovy ztráty	14
3.2 Ztráty v železe	14
3.2.1 Hysterezní ztráty	14
3.2.2 Ztráty vířivými proudy	15
3.3 Mechanické ztráty	16
3.4 Dodatečné ztráty	16
4 MĚŘENÍ ZTRÁT	17
4.1 Měření statorového odporu	17
4.2 Měření naprázdno	17
4.3 Měření při zatížení	18
4.4 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě	21
4.5 Další měření	21
4.5.1 200 Hz	22
4.5.2 400 Hz	22
5 SIMULACE V ANSYS MAXWELL	24
5.1 RMxprt	24
5.2 Vytvoření modelu motoru	24
5.3 Výpočet a porovnání magnetických indukcí	26
5.4 Porovnání naměřených a simulovaných ztrát	27
5.5 Porovnání ostatních parametrů	27
5.6 Porovnání grafických závislostí	27
5.6.1 Grafické závislosti pro 50 Hz	28
5.6.2 Grafické závislosti pro 200 Hz	29
5.6.3 Grafické závislosti pro 400 Hz	30
.....	30
5.7 Napěťová charakteristika	32
6 MOŽNOSTI ÚPRAVY STÁVAJÍCÍHO STROJE	33
6.1 Zvýšení počtu závitů	33
6.2 Axiální prodloužení magnetického obvodu	33
6.3 Použití kvalitnějšího plechu	33
7 POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH ÚPRAV	34

7.1 Zvýšení počtu závitů při zachovaném činitele plnění drážky.....	34
7.2 Zvýšení počtu závitů a změna činitele plnění drážky	34
7.3 Prodloužení magnetického obvodu	35
7.4 Použití plechů s nižším ztrátovým číslem.....	36
7.5 Použití tenčích plechů s nižším ztrátovým číslem	37
7.6 Celkové vyhodnocení.....	38
8 ZÁVĚR	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1 Asynchronní motor [3]	13
Obrázek 3-1 Hysterezní smyčka [4]	15
Obrázek 4-1 Určení mechanických ztrát pro 50 Hz	18
Obrázek 4-2 Určení ztrát v železe při plném zatížení pro 50 Hz	19
Obrázek 4-3 Určení přídatných ztrát při zatížení pro 50 Hz	20
Obrázek 4-4 Propojení motoru s dynamometrem	23
Obrázek 4-5 Měřený motor na pracovišti	23
Obrázek 4-6 Měřený motor	23
Obrázek 5-1 Model motoru v RMxprt	24
Obrázek 5-2 BP křivka plechu M700-50A	25
Obrázek 5-3 BH křivka plechu M700-50A	25
Obrázek 5-4 Porovnání momentu v závislosti na otáčkách pro 50 Hz	28
Obrázek 5-5 Porovnání proudu v závislosti na otáčkách pro 50 Hz	28
Obrázek 5-6 Porovnání účinníku v závislosti na výkonu pro 50 Hz	28
Obrázek 5-7 Porovnání účinnosti v závislosti na výkonu pro 50 Hz	29
Obrázek 5-8 Porovnání momentu v závislosti na otáčkách pro 200 Hz	29
Obrázek 5-9 Porovnání proudu v závislosti na otáčkách pro 200 Hz	29
Obrázek 5-10 Porovnání účinníku v závislosti na výkonu pro 200 Hz	30
Obrázek 5-11 Porovnání účinnosti v závislosti na výkonu pro 200 Hz	30
Obrázek 5-12 Porovnání momentu v závislosti na otáčkách pro 400 Hz	30
Obrázek 5-13 Porovnání proudu v závislosti na otáčkách pro 400 Hz	31
Obrázek 5-14 Porovnání účinníku v závislosti na výkonu pro 400 Hz	31
Obrázek 5-15 Porovnání účinnosti v závislosti na výkonu pro 400 Hz	31
Obrázek 5-16 Napěťová charakteristika	32
Obrázek 7-1 Porovnání účinnosti při změně závitů a zachování činitele plnění	34
Obrázek 7-2 Porovnání účinnosti při změně závitů i činitele plnění	35
Obrázek 7-3 Porovnání účinnosti při prodloužení magnetického obvodu	36
Obrázek 7-4 Porovnání účinnosti při použití plechů M530-50A	37
Obrázek 7-5 Porovnání účinnosti při použití plechů M330-35A	38
Obrázek 7-6 Porovnání dopadu všech změn na účinnost	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Parametry motoru pro tato měření.....	17
Tab. 4-2 Naměřené a vypočtené hodnoty z měření naprázdno pro 50 Hz.....	18
Tab. 4-3 Naměřené hodnoty z měření při zatížení pro 50 Hz.....	20
Tab. 4-4 Vypočtené hodnoty z měření při zatížení pro 50 Hz.....	21
Tab. 4-5 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě pro 50 Hz.....	21
Tab. 4-6 Vypočtené hodnoty z měření při zatížení pro 200 Hz.....	22
Tab. 4-7 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě pro 200 Hz.....	22
Tab. 4-8 Vypočtené hodnoty z měření při zatížení pro 400 Hz.....	22
Tab. 4-9 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě pro 400 Hz.....	22
Tab. 5-1 Porovnání magnetických indukcí	26
Tab. 5-2 Porovnání ztrát	27
Tab. 5-3 Porovnání parametrů	27
Tab. 7-1 Porovnání parametrů při změně závitů a zachování činitele plnění.....	34
Tab. 7-2 Porovnání parametrů při změně závitů i činitele plnění.....	35
Tab. 7-3 Porovnání parametrů při prodloužení magnetického obvodu	35
Tab. 7-4 Porovnání parametrů při použití plechů M530-50A	36
Tab. 7-5 Porovnání parametrů při použití plechů M330-35A	37

1 ÚVOD

Tato práce je zaměřena na zvýšení účinnosti asynchronního motoru. Čtenář se seznámí se základním principem asynchronního motoru, s rozdělením ztrát a s některými možnostmi zvýšení účinnosti tohoto stroje.

V úvodní kapitole je rozebrána konstrukce a princip funkce asynchronního motoru. V další kapitole jsou pak rozebrány jednotlivé ztráty, jejich rozdělení, popis a obecné vzorce pro jejich výpočet.

Dále je zde rozebráno měření na daném stroji. Je zde uveden postup měření, tabulky naměřených hodnot pro měření naprázdno, tabulky naměřených hodnot z měření při zatížení a z nich dále vypočtené hodnoty.

Pro tuto práci byla vytvořena simulace v prostředí Rmxprt programu ANSYS Maxwell. Data z této simulace jsou zde porovnána s naměřenými hodnotami v grafické podobě i v číselném porovnání.

Jsou zde porovnány vypočítané hodnoty magnetické indukce vzduchové mezery, zubů statoru i rotoru a také jha statoru i rotoru a ztrát s hodnotami z analytického výpočtu v prostředí Rmxprt.

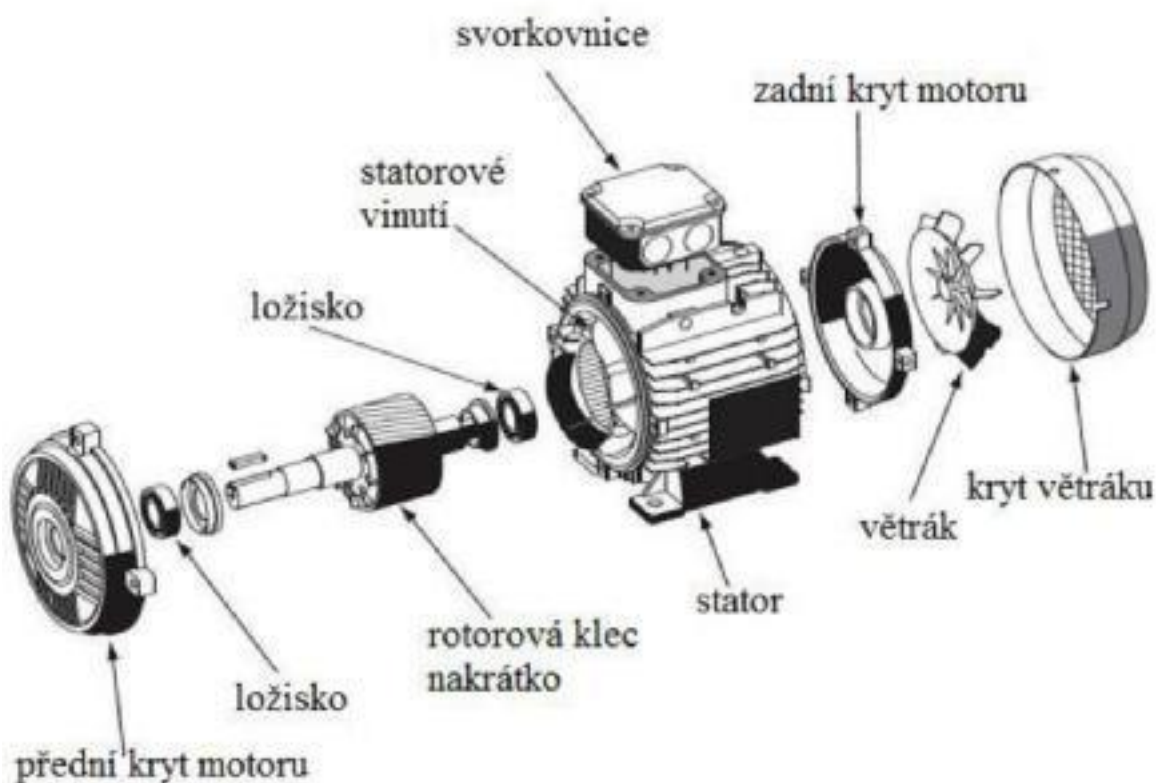
V práci je řešeno měření při frekvenci 50 Hz, 200 Hz a 400 Hz. Pro 400 Hz jsou zde navrženy úpravy motoru bez nutnosti jakkoliv měnit geometrii plechů. Tyto úpravy byly zadány do Rmxprt a jejich dopad je v jedné z kapitol porovnán.

2 ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní stroje patří mezi nejpoužívanější střídavé stroje. Většinou se používá asynchronní motor, nežli generátor [3].

2.1 Konstrukce

Stator je tvořen z plechů s vyraženými drážkami pro vinutí. Rotor je na hřídeli, na které jsou rotorové plechy s drážkami na vinutí tvořené z tyčí spojených na konci kruhy a tím jsou tedy spojeny nakrátko. Motor se dále skládá z ložiskových štítů pro hřídel, svorkovnice a větrák na chlazení [3].



Obrázek 2-1 Asynchronní motor [3]

2.2 Princip funkce

Ve statorovém vinutí vzniká po připojení na síť točivé magnetické pole, které protíná rotorovou klec nakrátko. V ní se naindukuje napětí a začne protékat proud. Vytvoří se rotorové magnetické pole, které je strháváno točivým magnetickým polem statoru a tím se rotor roztočí. Otáčky motoru jsou nižší než rychlost otáčení točivého magnetického pole. Tento rozdíl se nazývá skluz.

Pokud máme na statoru vinutí s $2p = 2$ póly, vzniklé točivé pole se otáčí synchronní rychlostí [6]:

$$n_s = \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{60f}{p} \quad [\text{ot/min}] \quad (2.1)$$

3 ZTRÁTY

Pro výpočet účinnosti daného stroje jsou vždy potřeba znát ztráty. Níže je uvedeno jejich rozdělení, obecné vzorce pro výpočet a popis jednotlivých druhů ztrát.

3.1 Jouleovy ztráty

Tyto ztráty vznikají při průchodu proudu vinutím. Při uvažování teploty okolí 20°C uvažujeme zjednodušený vztah pro výpočet Jouleových ztrát a to [6]:

$$\Delta P_j = RI^2 \quad [\text{W}] \quad (3.1)$$

Při uvažování oteplení vodiče při průchodu proudem je vztah pro výpočet [6]:

$$\Delta P_j = (1 + \alpha \Delta \vartheta) RI^2 \quad [\text{W}] \quad (3.2)$$

3.2 Ztráty v železe

Protože je frekvence přemagnetování rotoru f_2 při jmenovitém chodu velmi nízká, nepočítají se ztráty v železe rotoru, jelikož jsou zanedbatelné. Používá se tedy vztah [1]:

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) \quad [\text{W}] \quad (3.3)$$

Kde $\Delta p_{1,0}$ jsou měrné ztráty v železe [W/kg]

f_1 je frekvence statoru [Hz]

β je konstanta závislá na použité oceli [-]

k_{dj} a k_{dz} jsou činitele říkající, že magnetický tok není v magnetickém obvodu rovnoměrně rozložen [-]

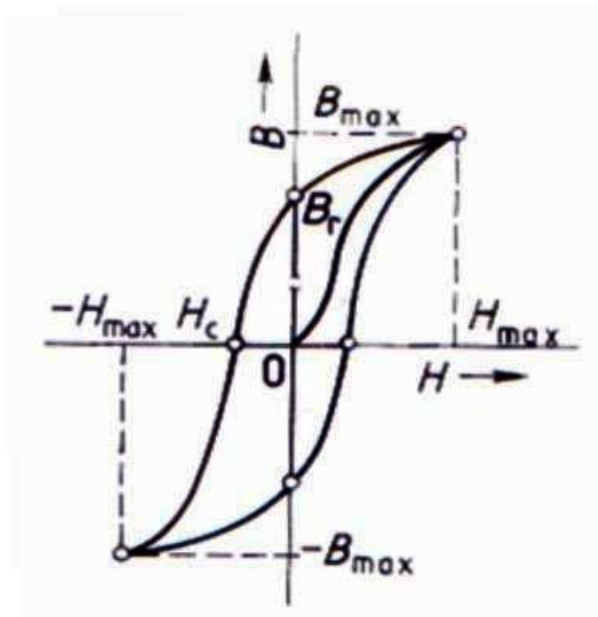
B_{j1} je indukce ve jhu [T]

B_{z1av} je střední indukce v zubech rotoru [T]

m_{j1} a m_{z1} jsou hmotnosti železa jha a zubů statoru [kg]

3.2.1 Hysterezní ztráty

Hysterezní ztráty závisí na frekvenci, kvalitě použitého materiálu a na jeho objemu. Ztráty vznikají tím, že se materiál přemagnetovává podle měnícího se magnetického pole.



Obrázek 3-1 Hysterezní smyčka [4]

Plocha pod křivkou udává energii potřebnou pro přemagnetování daného materiálu. Tato energie se při přemagnetování nevratně mění na teplo a tím vznikají hysterezní ztráty.

Jak je patrné z obrázku, při vystavení vnějšímu magnetickému poli, se materiál magnetizuje do maximální hodnoty B_{max} . Při následném snížení intenzity magnetického pole na nulovou hodnotu, se indukce zastaví na hodnotě B_r neboli remanentní indukci. Pokud následně zvyšujeme intenzitu vnějšího magnetického pole na opačnou polaritu, klesá hodnota magnetické indukce. Při dosažení velikosti intenzity mag. pole H_c klesne indukce na nulu. Tento děj nazýváme demagnetizace. Pokud pokračujeme ve zvyšování intenzity vnějšího mag. pole, roste magnetická indukce materiálu nyní v opačné polaritě než původně [5].

Vzorec pro výpočet hysterezních ztrát [6]:

$$\Delta P_h = fV \oint H dB \quad [W] \quad (3.4)$$

3.2.2 Ztráty vířivými proudy

Měnicí se magnetický tok indukuje v kovovém jádře napětí, a jelikož se jedná o uzavřenou smyčku, začnou jí protékat proudy, které nazýváme vířivé. Tyto proudy se snaží zabránit změně vyvolané měnicím se magnetickým polem. Pokud by jádro bylo tvořeno z jediného kusu materiálu, vířivé proudy by omezovali magnetický tok jádrem (nejvíce uprostřed). Procházející proud ohřívá materiál a vznikají tak ztráty.

Proto se místo jednoho kusu materiálu používá jádro skládané z tenkých plechů, aby se tomuto jevu zabránilo.

Ztráty vířivými proudy závisí na frekvenci, tloušťce použitých plechů a na kvalitě a indukci použitého materiálu.

Pro výpočet ztrát vířivými proudy můžeme použít vztah [6]:

$$\Delta P_w = \frac{4}{3\rho} V (K_e f B_m b_p)^2 \quad [W] \quad (3.5)$$

Z uvedeného vztahu je vidět, že ztráty vířivými proudy jsou závislé na kvadrátu frekvence a také magnetické indukce. Je tedy zřejmé, že se zvyšující se napájecí frekvencí značně rostou ztráty.

3.3 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty se dělí na ztráty třecí a ventilační.

Třecí ztráty závisí na rychlosti otáčení hřídele, druhu ložisek a zátěži na ložiscích. Vzorec pro výpočet třecích ztrát v ložiscích je [8]:

$$P_{t,loziska} = 0,5\omega \cdot \mu \cdot F \cdot D \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

Kde ω je úhlová frekvence hřídele
 μ je třecí koeficient (nejčastěji 0,08 – 0,20)
 F je zátěž na ložiscích
 D je vnitřní průměr ložisek

Ventilační ztráty se zvyšují se zvětšujícími se otáčkami stroje. Jsou to ztráty, které vznikají třením mezi rotujícími částmi a plynem který je obklopuje (vzduch). Skládají se ze ztrát ve vzduchové mezeře a ztrát na koncích rotoru. Tyto ztráty ve vzduchové mezeře se vypočítají ze vztahu [8]:

$$P_{v1} = \frac{1}{32} k C_M \cdot \pi \rho \omega^3 \cdot D_r^4 \cdot l_r \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

Kde
 k je koeficient drsnosti ($k=1$ je hladký povrch, obvykle se $k = 1 - 1,4$)
 C_M je momentový koeficient
 ρ je hustota chladiva
 ω je úhlová rychlost
 D_r je průměr rotoru
 l_r je délka rotoru

Momentový koeficient C_M se zjistí měřením a závisí na Couette Reynoldsově čísle:

$$Re_{\delta} = \frac{\rho \omega D_r \delta}{2\mu} \quad [-] \quad (3.8)$$

Kde
 δ je délka vzduchové mezery
 μ je dynamická viskozita chladiva

Ztráty na koncích rotoru pak ze vztahu [8]:

$$P_{v2} = \frac{1}{64} C_M \cdot \rho \omega^3 (D_r^5 \cdot D_{ri}^5) \quad [\text{W}] \quad (3.9)$$

Kde D_{ri} je průměr hřídele

3.4 Dodatečné ztráty

Tyto ztráty se dají jen těžko změřit. Dají se rozdělit na povrchové a pulsní. Zjistíme je odečtením výkonu, ztrát ve statorovém a rotorovém vinutí, mechanických ztrát a ztrát v železe. Se zatěžováním motoru rostou [3].

4 MĚŘENÍ ZTRÁT

Měření probíhalo nejprve naprázdno, kdy se nastavovalo napětí a frekvence v rozmezí 50 – 400 Hz a byly zaznamenávány hodnoty. Poté bylo provedeno měření při zatížení dynamometrem s nastavovaným momentem od 0 do 0,5 Nm. Nakonec byly při jmenovitém momentu 0,3 Nm měřeny hodnoty proudu a otáček.

Napájení bylo zajištěno třífázovým zdrojem regulovatelného napětí, který byl připojen na motor. Veličiny se měřily analyzátozem Yokogawa a následně byly zpracovány a ukládány na PC u pracoviště.

Měřený motor má parametry dané v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Parametry motoru pro tato měření

U	[V]	230
N	[-]	56
f	[Hz]	400
n	[ot/min]	23700
2p	[-]	2
P ₂	[W]	750

4.1 Měření statorového odporu

Před každým měřením byly změřeny hodnoty statorového odporu. Další hodnoty byly měřeny vždy po každé části měření v několika časech a výsledná hodnota odporu byla určena interpolací ze závislosti statorového odporu na příkonu.

4.2 Měření naprázdno

Při tomto měření běžel motor nezatížen a vznikaly zde pouze mechanické ztráty. Nastavovala se frekvence v hodnotách 50 Hz, 200 Hz a 400 Hz. Pro každou hodnotu frekvence byly naměřeny hodnoty proudu, napětí, příkonu, účinníku a momentu pro hladiny napájecího napětí od 110% do 30%.

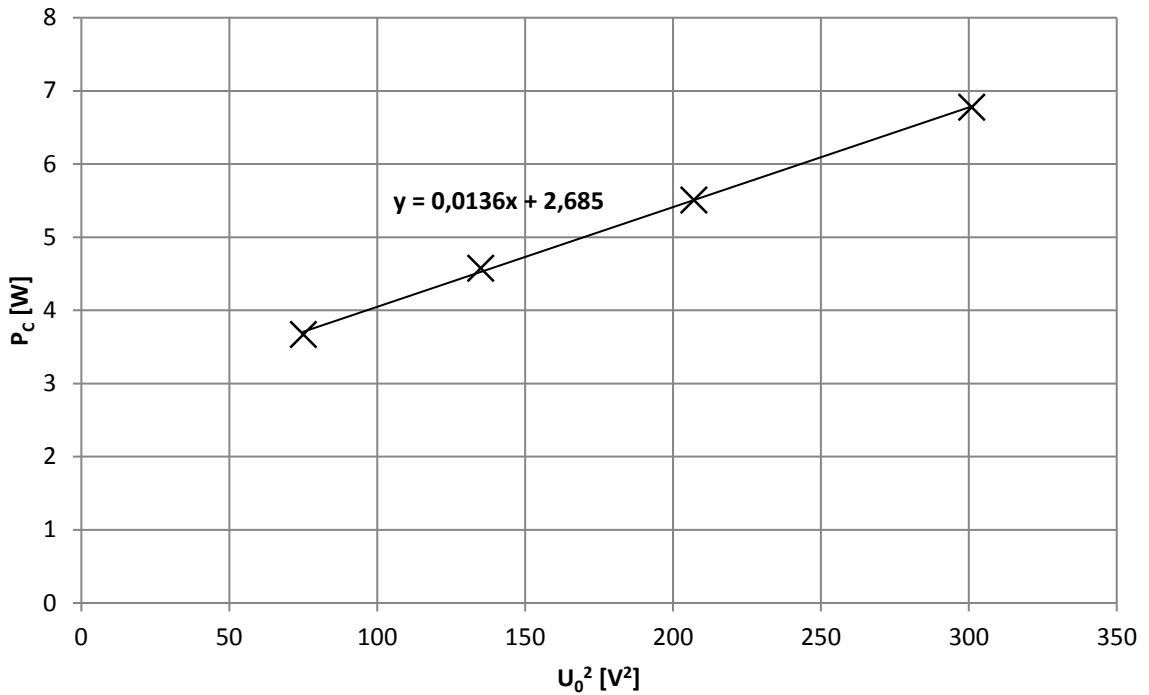
Z interpolovaných hodnot odporu a z naměřených hodnot proudu byly vypočítány ztráty statorového vinutí naprázdno (ztráty v rotorovém vinutí se blíží 0 kvůli velice nízkému proudu). [2]:

$$P_s = 1,5I_0^2R \quad [\text{W}] \quad (4.1)$$

Konstantní ztráty získáme odečtením ztrát ve vinutí naprázdno od příkonu naprázdno [2]:

$$P_C = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe} \quad [\text{W}] \quad (4.2)$$

Pro zjištění mechanických ztrát byla vytvořena závislost konstantních ztrát P_C na druhé mocnině napětí. Extrapolací přímky do nulového napětí zjistíme ztráty třecí a ventilační. Tyto ztráty se pak v poměru rozdělí na ztráty třením (1/3) a ztráty ventilační (2/3).



Obrázek 4-1 Určení mechanických ztrát pro 50 Hz

Následně pak odečtením mechanických ztrát od konstantních ztrát dostaneme ztráty v železe [2]:

$$P_{fe} = P_c - P_{fw} \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

Tab. 4-2 Naměřené a vypočtené hodnoty z měření naprázdno pro 50 Hz

U	I	P ₀	P _s	P _c	P _{fw}	P _{fe}
[V]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
31,72	4,93	54,77	35,33	19,43	2,685	16,74
28,78	3,99	37,96	22,96	14,99	2,685	12,31
27,38	3,65	32,69	19,18	13,50	2,685	10,82
25,14	3,17	25,98	14,50	11,47	2,685	8,79
17,35	1,99	12,47	5,69	6,77	2,685	4,09
14,39	1,61	9,24	3,73	5,50	2,685	2,82
11,62	1,29	6,95	2,37	4,57	2,685	1,89
8,65	0,97	5,02	1,35	3,67	2,685	0,98

4.3 Měření při zatížení

Při tomto měření je motor zatěžován pomocí dynamometru v rozmezí 0-0,5 Nm s krokem 0,05 Nm. Pro každou hodnotu frekvence byly naměřeny hodnoty proudu, napětí, příkonu, účinníku, momentu a otáček pro stejné hladiny napětí jako při měření naprázdno.

Ztráty ve statorovém vinutí se vypočítají (stejně jako u měření naprázdno) podle vzorce [2]:

$$P_s = 1,5I^2R \quad [\text{W}] \quad (4.4)$$

Ztráty v rotorovém vinutí dostaneme odečtením statorových ztrát a ztrát v železe od příkonu změřeném při zatížení a následným vynásobením skluzem [2]:

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f} \quad [-] \quad (4.5)$$

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe})s \quad [\text{W}] \quad (4.6)$$

Zbytkové ztráty pak zjistíme odečtením ztrát ve vinutí, výkonu, ztrát v železe a ztrát mechanických od příkonu [2]:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \quad [\text{W}] \quad (4.7)$$

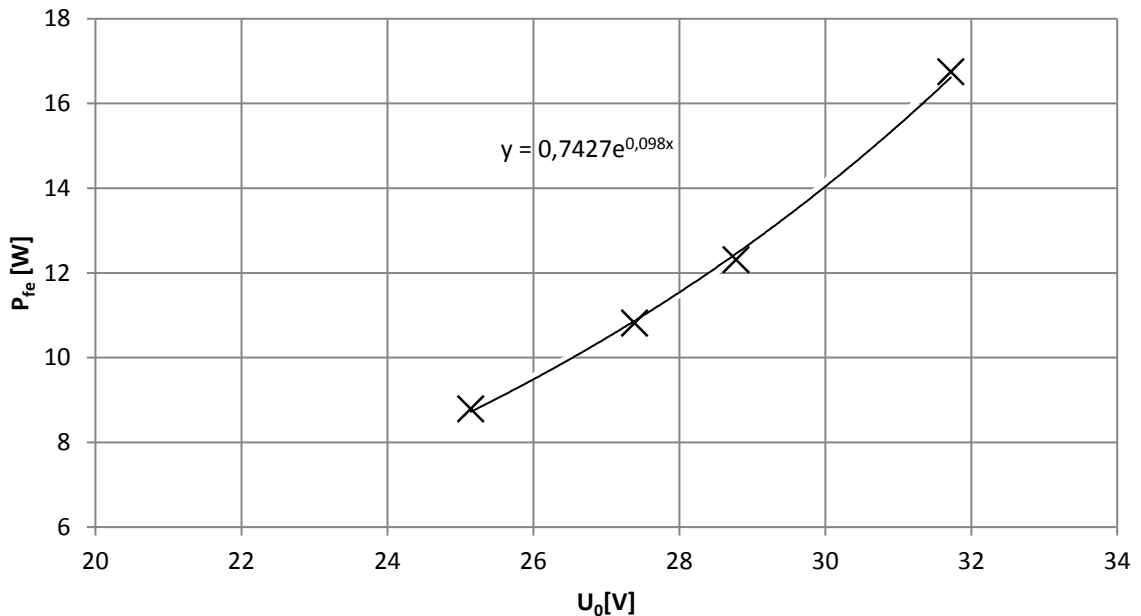
kde

$$P_2 = 2\pi \cdot M \cdot n \quad [\text{W}] \quad (4.8)$$

Jelikož ve spojce při vyšších frekvencích vznikaly již poměrně velké dodatečné ztráty, je toto zohledněno tím, že jsou dodatečné ztráty při nejmenším momentu motoru přičteny k výkonu stroje.

Dále určíme ztráty v železe při plném zatížení tím, že si vyneseme závislost nekorigovaných ztrát v železe na napětí a interpolujeme na hodnotu vnitřního napětí U_1 [2]:

$$U_1 = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} I \cdot R \cdot \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I \cdot R \cdot \sin\varphi\right)^2} \quad [\text{V}] \quad (4.9)$$



Obrázek 4-2 Určení ztrát v železe při plném zatížení pro 50 Hz

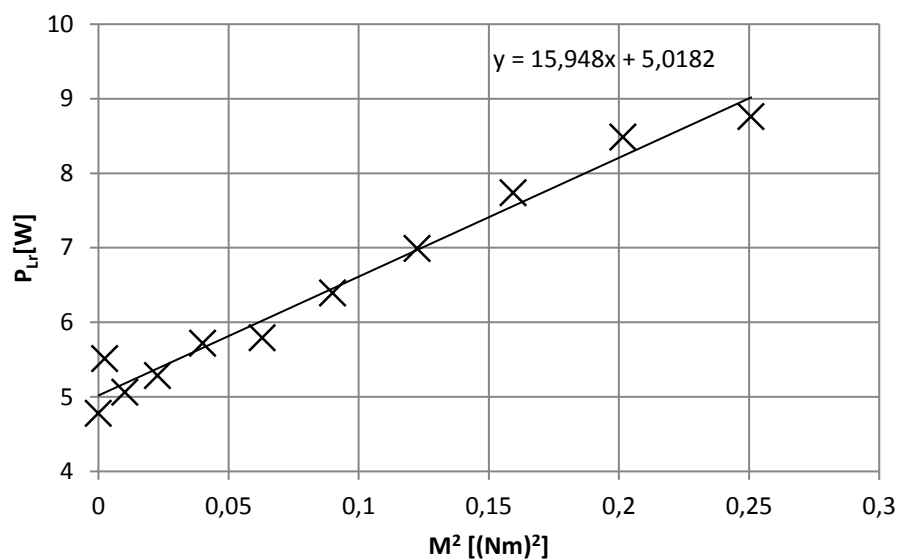
Následně určíme přídavné ztráty při zatížení tak, že závislost zbytkových ztrát na druhé mocnině momentu proložíme přímkou s rovnicí ve tvaru [2]:

$$P_{Lr} = AM^2 + B \quad [\text{W}] \quad (4.10)$$

$$P_{LL} = AM^2 \quad [\text{W}] \quad (4.11)$$

Tab. 4-3 Naměřené hodnoty z měření při zatížení pro 50 Hz

U	I	P ₁	cosφ	M	n
[V]	[A]	[W]	[-]	[Nm]	[ot/min]
28,77	3,96	42,74	0,216	0,003	2987,8
28,77	3,96	57,94	0,292	0,049	2968,4
28,75	3,99	73,72	0,370	0,100	2948,4
28,74	4,06	90,30	0,445	0,150	2925,2
28,73	4,17	107,46	0,517	0,200	2901,4
28,71	4,32	125,16	0,581	0,250	2875,8
28,70	4,51	143,52	0,639	0,300	2849,2
28,69	4,75	162,96	0,690	0,350	2819,8
28,67	5,01	182,98	0,734	0,399	2787,6
28,65	5,33	204,22	0,771	0,449	2752,8
28,63	5,68	226,62	0,803	0,500	2715,2



Obrázek 4-3 Určení přídavných ztrát při zatížení pro 50 Hz

Poté už je možné vypočítat celkové ztráty a s jejich pomocí určit účinnost [2]:

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_s + P_r + P_{LL} \quad [\text{W}] \quad (4.12)$$

kde

$$P_{fw} = P_{fw0}(1 - s)^{2,5} \quad [\text{W}] \quad (4.13)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.14)$$

Tab. 4-4 Vypočtené hodnoty z měření při zatížení pro 50 Hz

U_f	P_s	P_r	P_2	P_{Lr}	P_{LL}	P_{fw}	P_T	η
[V]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
28,245	22,472	0,034	5,720	4,781	0,0001	2,658	36,993	13,383
27,984	22,603	0,251	20,137	5,515	0,039	2,615	37,037	34,756
27,693	23,024	0,679	35,842	5,065	0,161	2,571	37,641	48,619
27,395	23,929	1,383	50,914	5,286	0,362	2,521	39,078	56,383
27,086	25,312	2,353	65,609	5,724	0,639	2,470	41,332	61,054
26,756	27,301	3,628	80,311	5,795	1,003	2,416	44,570	64,166
26,425	29,813	5,218	94,292	6,397	1,435	2,360	48,723	65,699
26,072	33,146	7,223	108,133	6,995	1,954	2,300	54,182	66,355
25,694	37,137	9,673	121,315	7,739	2,541	2,235	60,799	66,299
25,298	42,124	12,627	134,216	8,489	3,215	2,166	68,993	65,721
24,879	48,136	16,137	147,176	8,762	4,000	2,092	78,870	64,944

4.4 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě

Z měření při zatížení je v Tab. 4-5 uvedeno rozdělení ztrát pro jmenovitý moment 0,3Nm, který se vypočítá ze štítkových hodnot pomocí vztahu [3]:

$$M = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60}} \quad [\text{Nm}] \quad (4.15)$$

Kvůli ztrátám na spojce se s již výše zmíněným přepočítáním výkonu motoru musel také přepočítat odpovídající moment.

Tab. 4-5 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě pro 50 Hz

M	P_s	P_r	P_2	P_{Lr}	P_{LL}	P_{fw}	P_T	η
[Nm]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
0,316	29,81	5,218	94,29	1,616	1,435	2,360	48,72	65,7

4.5 Další měření

Výše jsou uvedena data z měření a postupy výpočtů ztrát pro 50 Hz. Pro frekvence 200 Hz a 400 Hz jsou postupy stejné a tak jsou zde dále uvedeny jen výsledná data z těchto měření a porovnání pro jmenovitý moment při každé frekvenci.

4.5.1 200 Hz

Tab. 4-6 Vypočtené hodnoty z měření při zatížení pro 200 Hz

U_f	P_s	P_r	P_2	P_{Lr}	P_{LL}	P_{fw}	P_T	η
[V]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
114,317	27,501	0,293	87,540	0,000	0,151	11,961	114,583	43,324
114,299	27,429	0,343	89,775	2,160	0,164	11,950	114,530	43,496
113,987	28,815	0,859	155,943	2,916	0,747	11,899	116,378	56,781
113,670	30,667	1,638	220,840	1,097	1,736	11,841	119,351	64,999
113,355	32,891	2,673	282,006	5,274	3,050	11,784	123,286	69,156
113,038	35,630	3,891	342,480	8,120	4,716	11,732	128,278	72,180
112,717	38,891	5,430	404,641	8,842	6,816	11,673	134,536	74,715
112,379	42,648	7,225	463,833	12,866	9,186	11,615	141,793	76,071
112,054	47,009	9,295	526,477	13,252	12,090	11,556	150,488	77,581
111,706	51,792	11,729	586,557	16,350	15,269	11,493	160,205	78,375
111,350	57,305	14,532	646,296	19,660	18,818	11,427	171,380	78,899

Tab. 4-7 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě pro 200 Hz

M	P_s	P_r	P_2	P_{Lr}	P_{LL}	P_{fw}	P_T	η
[Nm]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
0,326	38,89	5,430	404,64	8,842	6,816	11,67	134,54	74,72

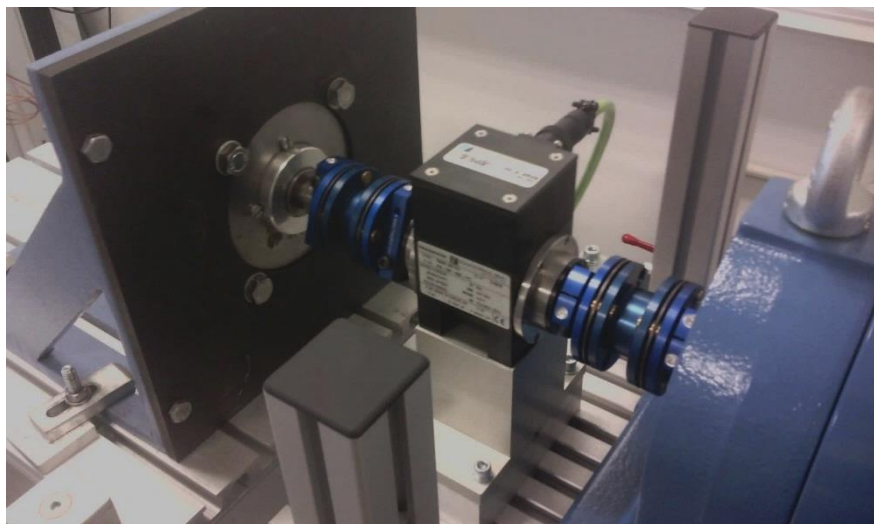
4.5.2 400 Hz

Tab. 4-8 Vypočtené hodnoty z měření při zatížení pro 400 Hz

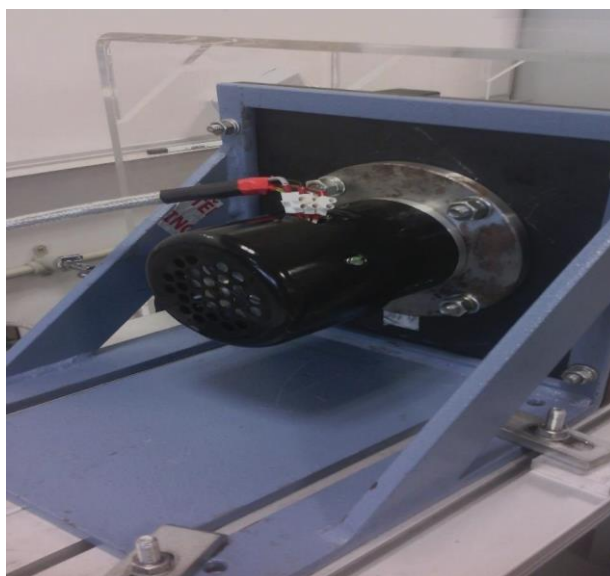
U_f	P_s	P_r	P_2	P_{Lr}	P_{LL}	P_{fw}	P_T	η
[V]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
228,755	34,320	1,565	365,482	5,562	1,949	54,765	308,720	53,881
228,766	34,326	1,583	368,974	0,000	2,006	54,757	308,820	54,558
228,754	34,273	1,628	367,956	5,336	1,989	54,748	308,756	54,065
228,415	36,938	2,682	496,779	6,901	4,655	54,612	314,158	61,041
228,063	40,186	3,963	625,878	10,111	8,454	54,485	321,481	65,896
227,720	43,817	5,633	745,629	19,889	13,000	54,332	330,326	68,799
227,362	47,981	7,651	869,054	25,348	18,721	54,171	341,181	71,353
227,009	52,779	9,926	998,228	28,390	25,833	54,021	354,347	73,595
226,647	58,156	12,460	1116,674	39,180	33,381	53,873	368,771	74,812
226,285	64,148	15,482	1244,138	41,205	42,611	53,705	385,964	76,315

Tab. 4-9 Rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě pro 400 Hz

M	P_s	P_r	P_2	P_{Lr}	P_{LL}	P_{fw}	P_T	η
[Nm]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
0,299	43,82	5,633	745,6	19,89	13,00	54,33	330,3	68,8



Obrázek 4-4 Propojení motoru s dynamometrem



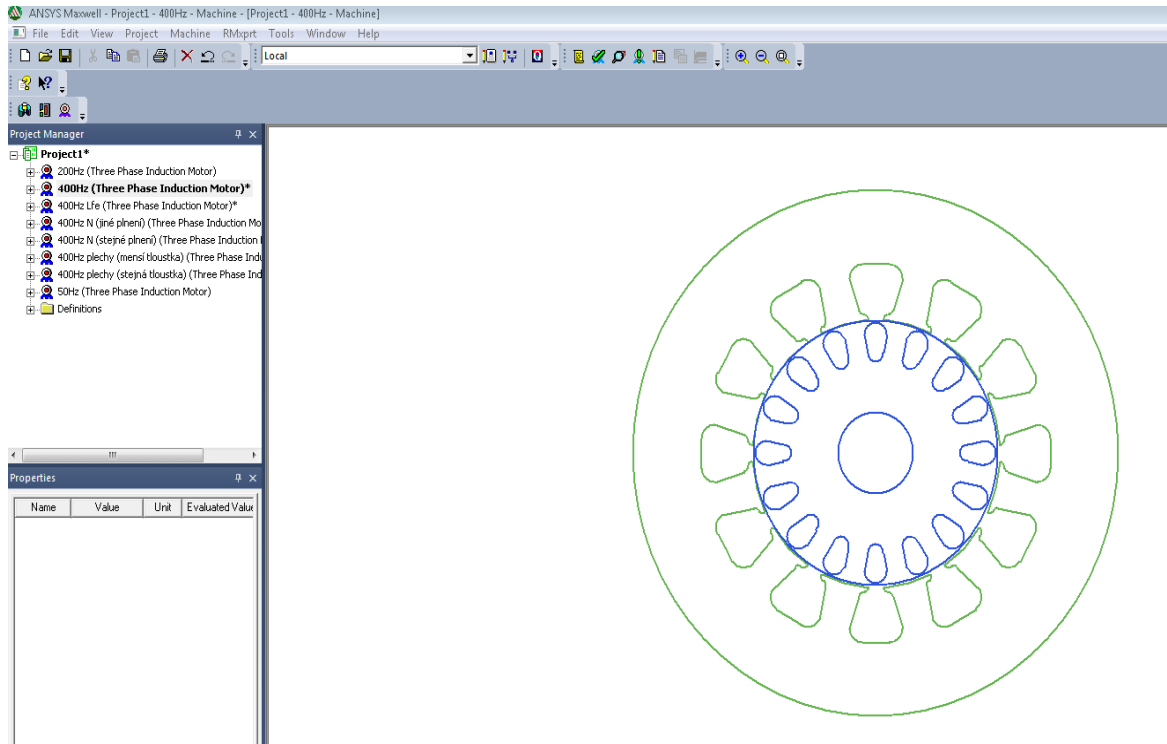
Obrázek 4-5 Měřený motor na pracovišti



Obrázek 4-6 Měřený motor

5 SIMULACE V ANSYS MAXWELL

Pro porovnání naměřených ztrát s analytickým výpočtem, byl vymodelován podle výkresové dokumentace zadaný motor v programu ANSYS Maxwell v prostředí RMXprt.



Obrázek 5-1 Model motoru v RMXprt

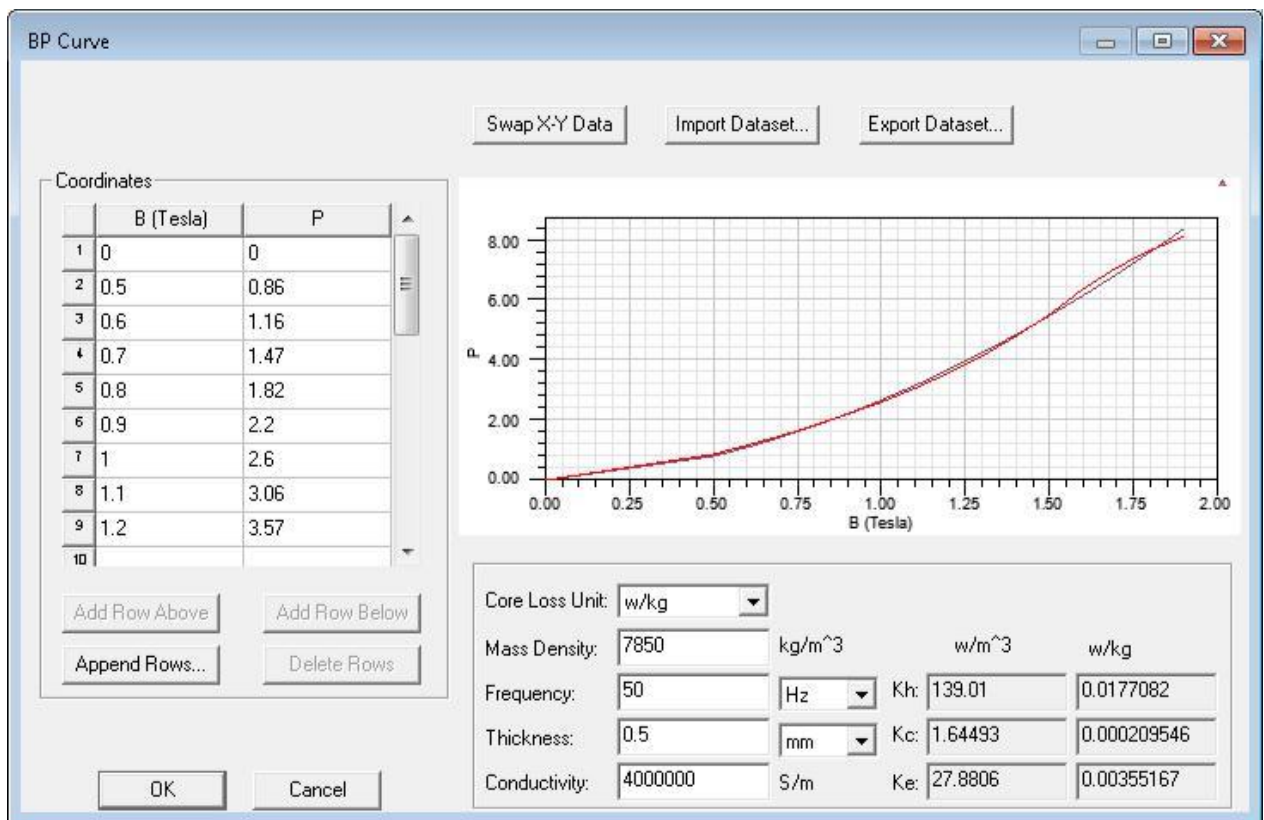
5.1 RMXprt

RMXprt je zkratka pro Rotation Machine Expert. Jedná se o program pro navrhování a modelování točivých elektrických strojů a jejich analýza. Výstupem této analýzy jsou pak charakteristiky (např. momentová) a jiné vypočítané veličiny (ztráty, účinnost, indukce...). Tyto údaje se pak mohou porovnat s údaji zpracovanými z měření.

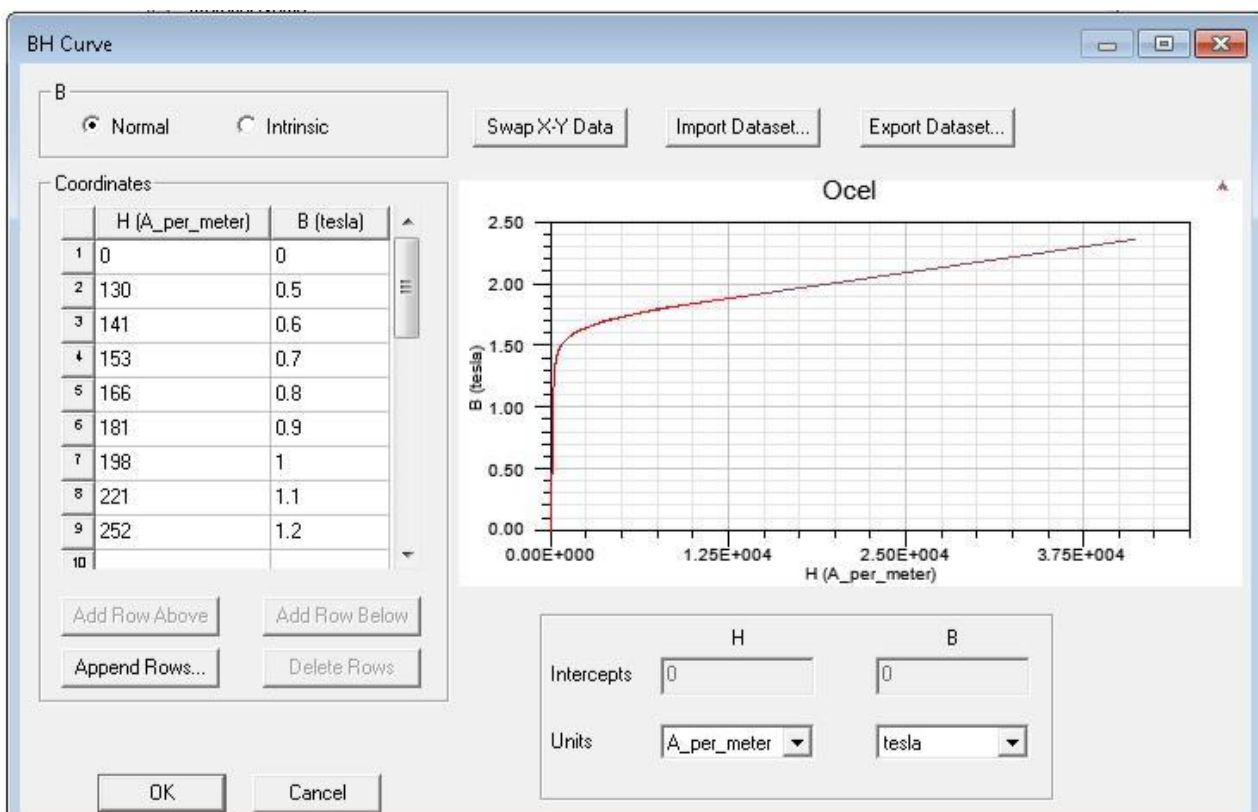
5.2 Vytvoření modelu motoru

Materiály plechů byly vytvořeny podle data sheetu plechu. Ostatní parametry byly zadány z výkresové dokumentace a některé z naměřených hodnot (ventilační ztráty a ztráty třením). Dále byly nastaveny podmínky zkoušky takové, aby odpovídaly měření.

Plechů byly tvořeny nastavením BP a BH křivky z údajů v data sheetech plechů.



Obrázek 5-2 BP křivka plechu M700-50A



Obrázek 5-3 BH křivka plechu M700-50A

Po vymodelování a nastavení parametrů zkoušky byla provedena analýza, ze které byly výsledky magnetických indukcí, ztrát a jiných parametrů porovnány s předem vypočtenými hodnotami z technické dokumentace a měření a také grafické závislosti, které budou také níže porovnány se závislostmi naměřenými.

5.3 Výpočet a porovnání magnetických indukcí

Data z analýzy v prostředí RMxprt byla přepsána a porovnána v Tab. 5-1. Jelikož zuby statoru nejsou rovnoběžné, byl proveden výpočet pro nejmenší, největší a střední průřez. V Tab. 5-1 je pak uvedena hodnota pro střední průřez.

Pro výpočet magnetické indukce byly použity vztahy [1],[9]:

$$\Phi_m = \frac{k_E \cdot U_f}{4.44 \cdot f \cdot k_w \cdot N} = \frac{0,972 \cdot \frac{230}{\sqrt{3}}}{4.44 \cdot 400 \cdot 0,9659 \cdot 56} = 1,344 \text{ mWb} \quad (5.1)$$

Kde

$$k_E \text{ je určeno z [1]} \\ k_w = k_{krok} \cdot k_{rozloha} \quad [-] \quad (5.2)$$

$$k_{krok} = 1 \text{ u jednovrstvého vinutí} \\ k_{rozloha} = \frac{0,5}{q \cdot \sin \frac{30^\circ}{q}} = \frac{0,5}{2 \cdot \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0,9659 \quad (5.3)$$

$$B_{\delta max} = \frac{\Phi_m \cdot p}{d_{vrtani} \cdot L_{fe}} = \frac{1,344 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{0,0385 \cdot 0,05} = 0,698 \text{ T} \quad (5.4)$$

$$B_{zubs} = \frac{\Phi_{mzub}}{S_{zubs}} = \frac{L_{fe} \cdot t_{zub} \cdot B_{\delta max}}{k_{fe} \cdot L_{fe} \cdot b_{zubs}} = \frac{(0,05 + 2 \cdot 0,0025) \cdot 0,01 \cdot 0,698}{0,9576 \cdot 0,05 \cdot 0,00529} = 1,53 \text{ T} \quad (5.5)$$

Kde

$$k_{fe} = 0,0425 \cdot \delta_{lam} + 0,6032 \cdot \arctan(108,16 \cdot \delta_{lam}) = \\ = 0,0425 \cdot 0,5 + 0,6032 \cdot \arctan(108,16 \cdot 0,5) = 0,9576 \quad (5.6)$$

$$B_{jhos} = \frac{\Phi_m}{2 \cdot S_{jhos}} = \frac{\Phi_m}{2 \cdot L_{fe} \cdot h_{jhos} \cdot k_{fe}} = \frac{1,344 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,05 \cdot 0,01025 \cdot 0,9576} = 1,37 \text{ T} \quad (5.7)$$

Pro zub a jho rotoru platí stejné vzorce s rozměry odpovídajícími rotoru.

Tab. 5-1 Porovnání magnetických indukcí

	Část	Výpočet	RMxprt	Výpočet	RMxprt	Výpočet	RMxprt
f [Hz]	-	50		200		400	
B [T]	Vz. mezera	0,70	0,64	0,70	0,67	0,70	0,67
	Jho statoru	1,37	1,23	1,37	1,30	1,37	1,32
	Jho rotoru	1,00	0,98	1,00	1,04	1,00	1,05
	Zub statoru	1,53	1,27	1,53	1,32	1,53	1,32
	Zub rotoru	1,59	1,65	1,59	1,72	1,59	1,72

5.4 Porovnání naměřených a simulovaných ztrát

V této části jsou porovnány naměřené ztráty při jednotlivých frekvencích se ztrátami z RMxprt. Při vyšších frekvencích jsou zde již větší rozdíly v naměřených a simulovaných ztrátách a to zejména proto, že reálné plechy nejsou jednoduchá kružnice jako v modelu, jsou spojeny nýty ve kterých vznikají další ztráty vířivými proudy a také RMxprt nezohledňuje úplně přesně ztráty vyšších harmonických.

Dalším problémem je, že hodnoty pro PH křivky z data sheetů nejsou úplně přesné pro každý konkrétně vyrobený plech, reálně se mohou lišit. Také střížná hrana plechů není v RMxprt brána v potaz, tudíž v něm vycházejí menší ztráty v železe.

Celkově je v RMxprt situace více idealizovaná a neberou se v potaz jevy, které mohou další ztráty reálně způsobovat, například zkraty mezi plechy při porušení izolace, izolace plechů od kostry motoru a další.

Tab. 5-2 Porovnání ztrát

	Část	Měření	RMxprt	Měření	RMxprt	Měření	RMxprt
f [Hz]	-	50		200		400	
ΔP [W]	Stator	29,8	18,2	38,9	20,5	48,0	24,2
	Rotor	5,2	5,7	5,4	4,9	7,7	5,5
	V železe	9,9	7,8	71,7	55,2	212,7	130,1
	Celkové	48,7	35,1	134,5	96,0	341,2	221,8

5.5 Porovnání ostatních parametrů

Zde se nachází porovnání ostatních parametrů z měření a ze simulace v RMxprt.

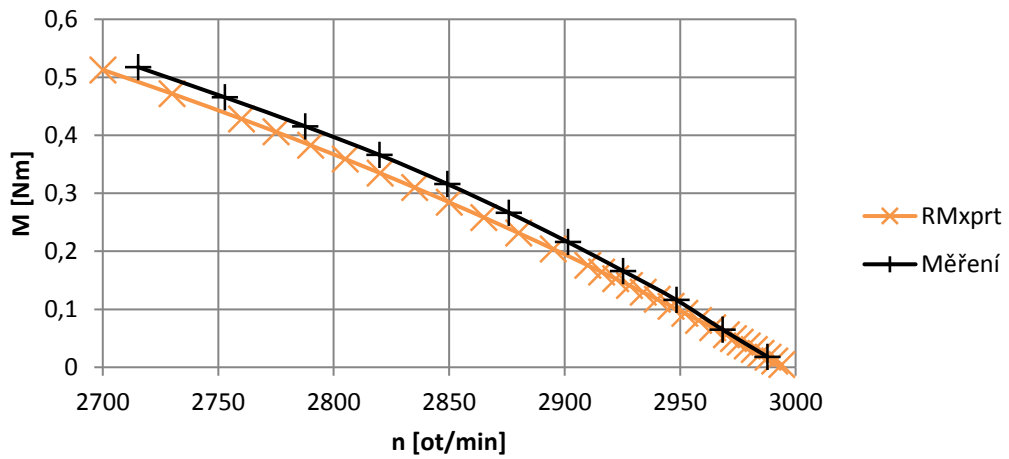
Tab. 5-3 Porovnání parametrů

		Měření	RMxprt	Měření	RMxprt	Měření	RMxprt
f	[Hz]	50		200		400	
n	[ot/min]	2849,2	2831,5	11848,8	11849,3	23836,4	23837,9
I	[A]	4,514	3,612	5,029	3,752	5,177	3,975
cos ϕ	[-]	0,639	0,711	0,540	0,625	0,525	0,609
η	[%]	65,7	72,8	74,7	79,6	68,8	77,2
M	[Nm]	0,316	0,316	0,326	0,302	0,299	0,300
P ₂	[W]	94,3	93,8	404,6	375,1	745,6	749,9
s	[%]	5,027	5,617	1,260	1,256	0,682	0,676
P ₁	[W]	143,5	128,8	541,6	471,1	1083,8	971,7

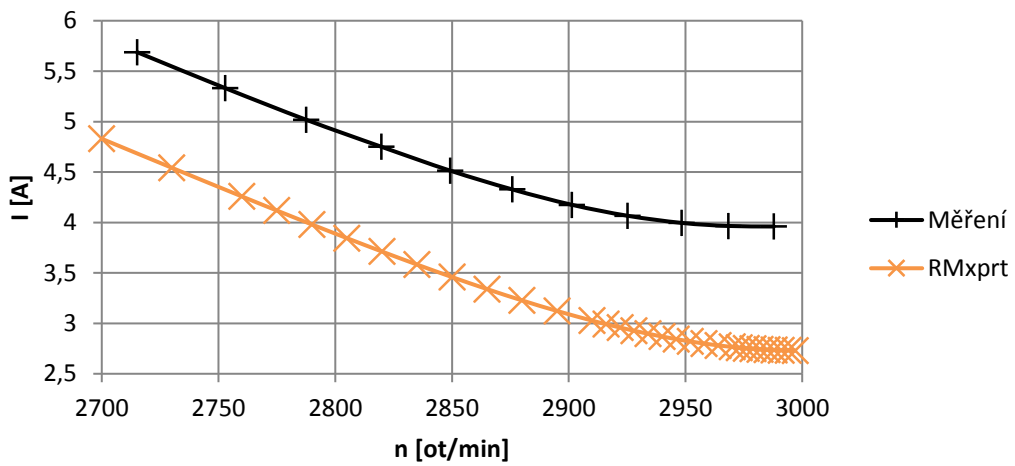
5.6 Porovnání grafických závislostí

Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafické závislosti, které byly porovnány se závislostmi z analytického výpočtu v prostředí RMxprt.

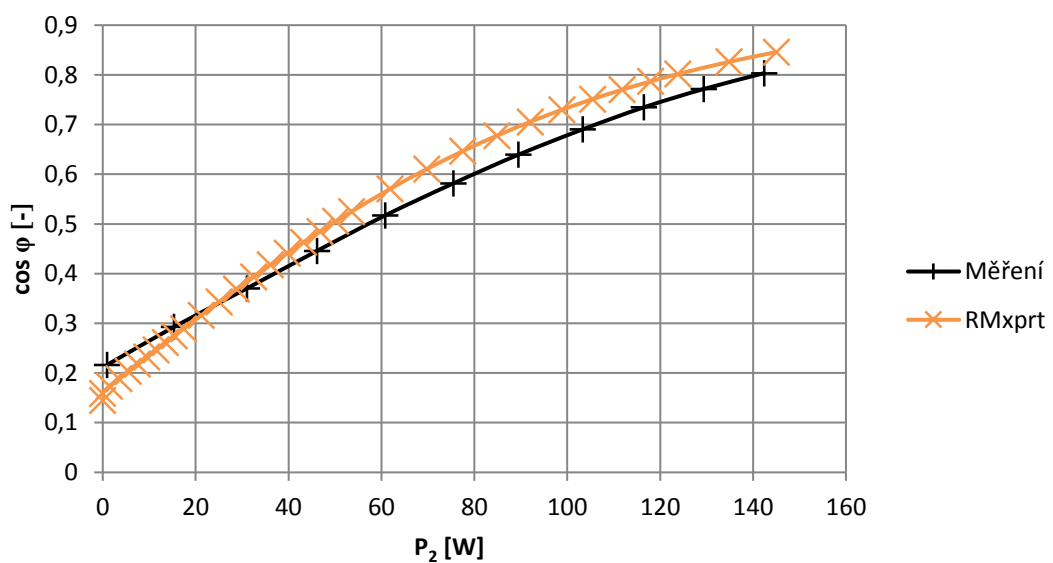
5.6.1 Grafické závislosti pro 50 Hz



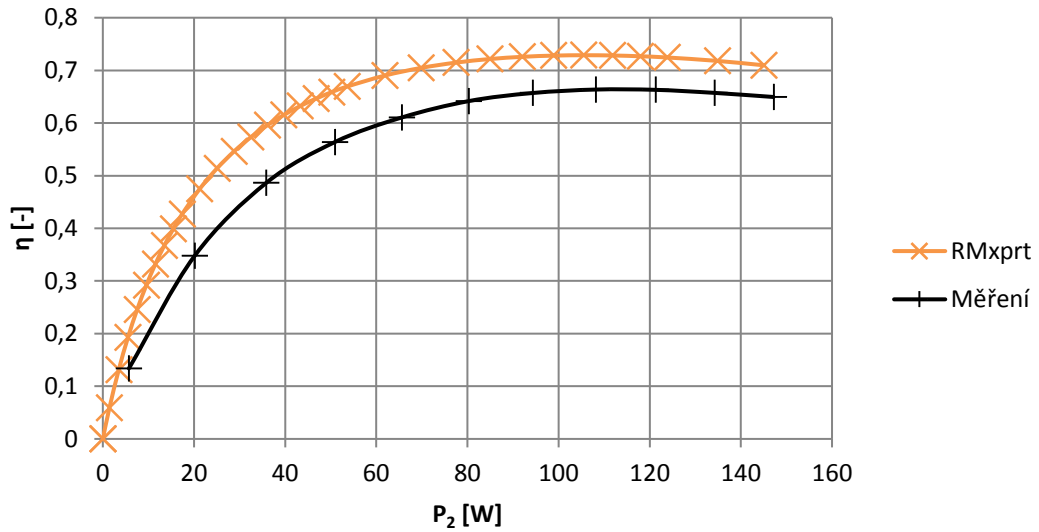
Obrázek 5-4 Porovnání momentu v závislosti na otáčkách pro 50 Hz



Obrázek 5-5 Porovnání proudu v závislosti na otáčkách pro 50 Hz

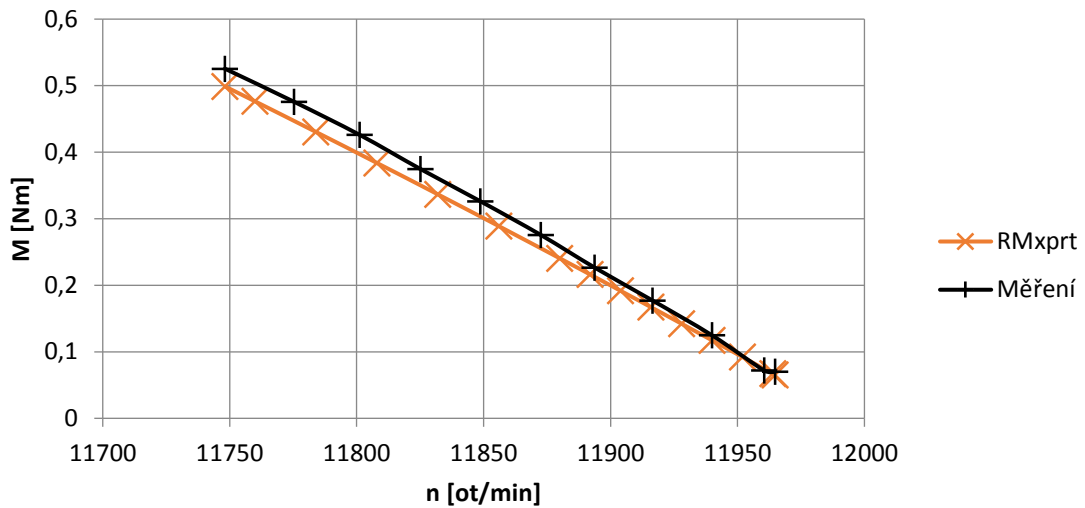


Obrázek 5-6 Porovnání účinníku v závislosti na výkonu pro 50 Hz

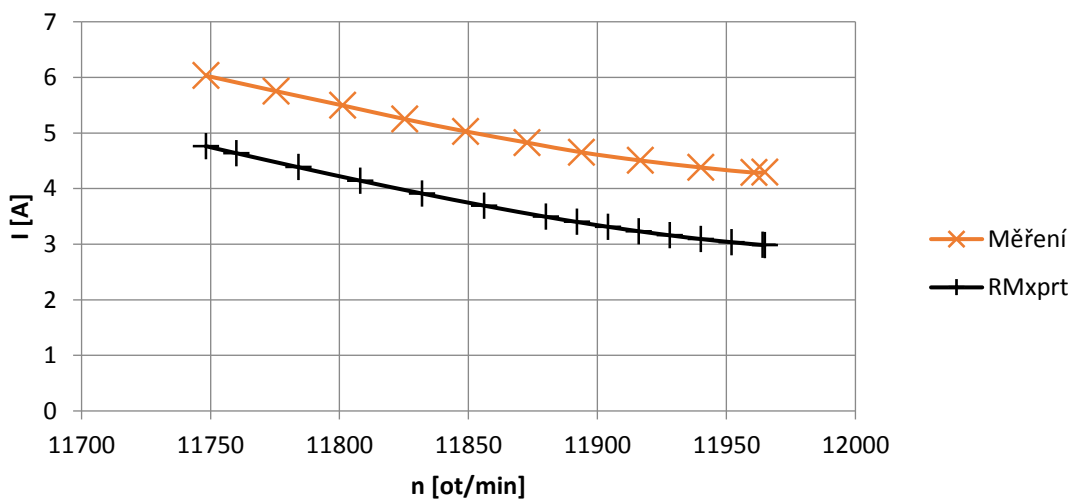


Obrázek 5-7 Porovnání účinnosti v závislosti na výkonu pro 50 Hz

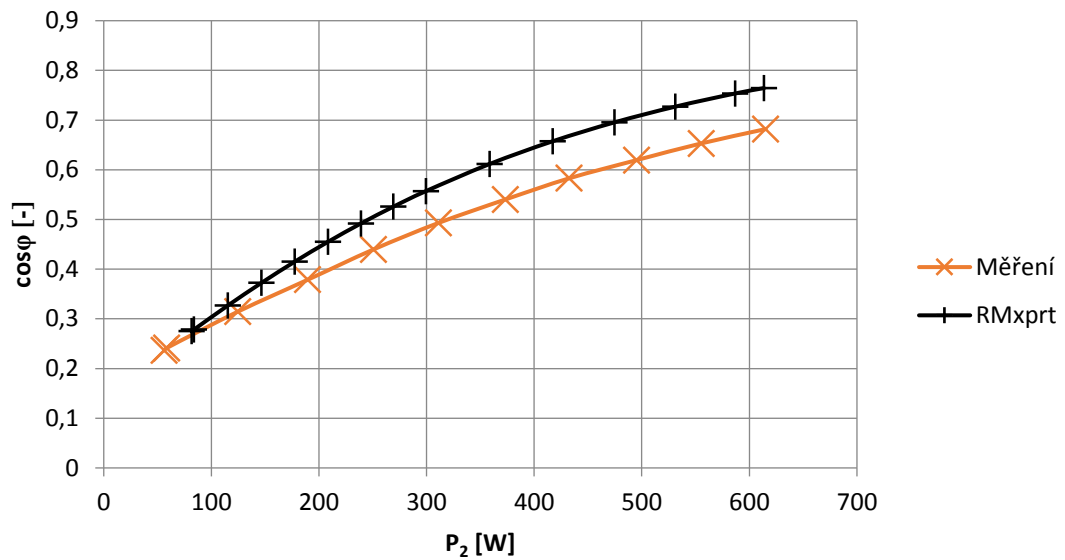
5.6.2 Grafické závislosti pro 200 Hz



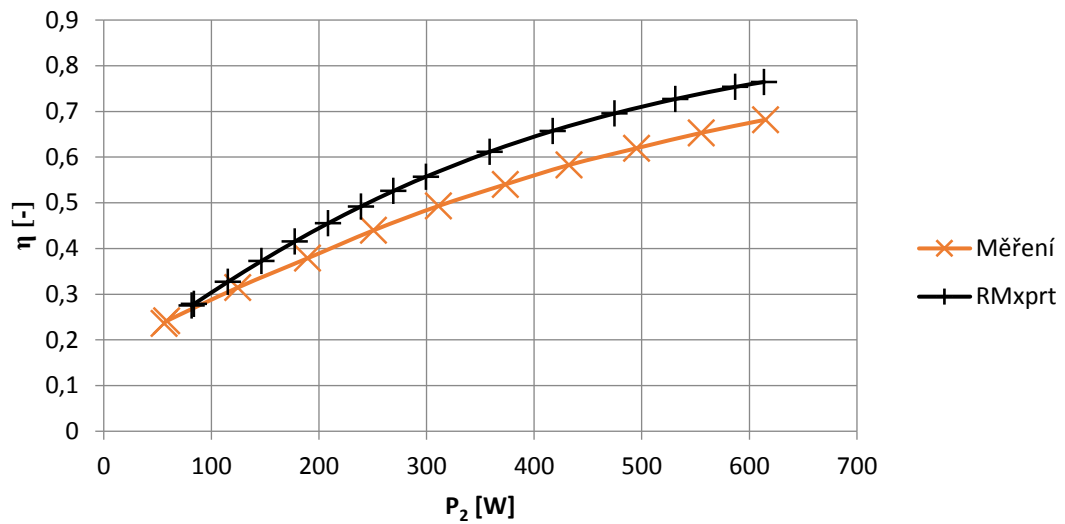
Obrázek 5-8 Porovnání momentu v závislosti na otáčkách pro 200 Hz



Obrázek 5-9 Porovnání proudu v závislosti na otáčkách pro 200 Hz

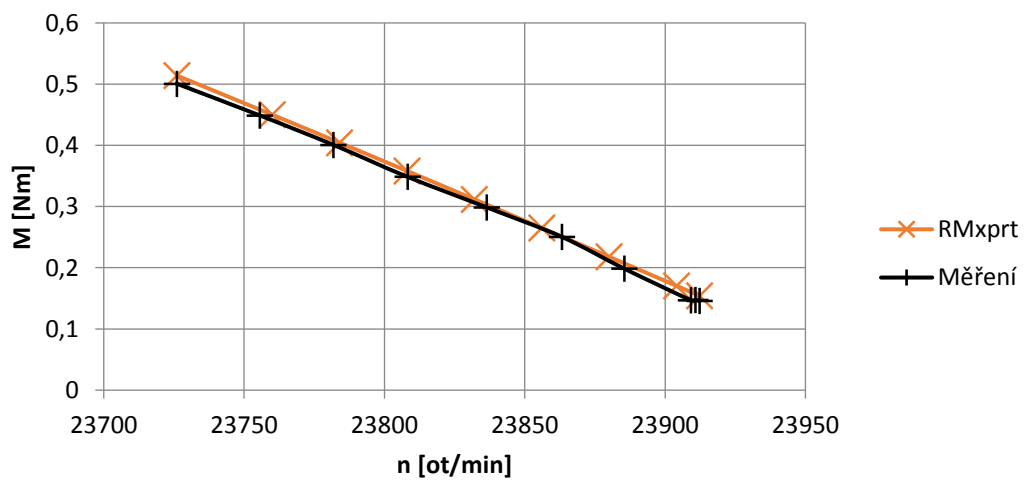


Obrázek 5-10 Porovnání účinníku v závislosti na výkonu pro 200 Hz

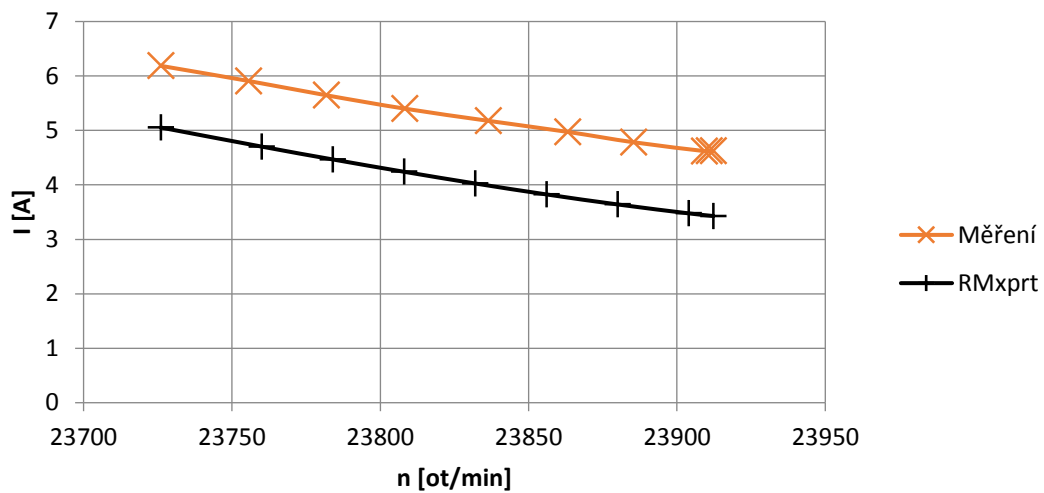


Obrázek 5-11 Porovnání účinnosti v závislosti na výkonu pro 200 Hz

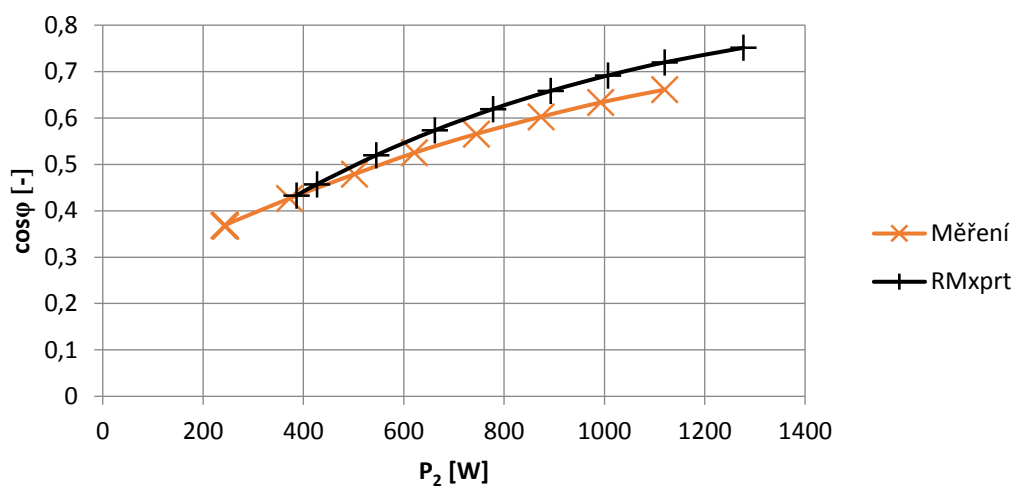
5.6.3 Grafické závislosti pro 400 Hz



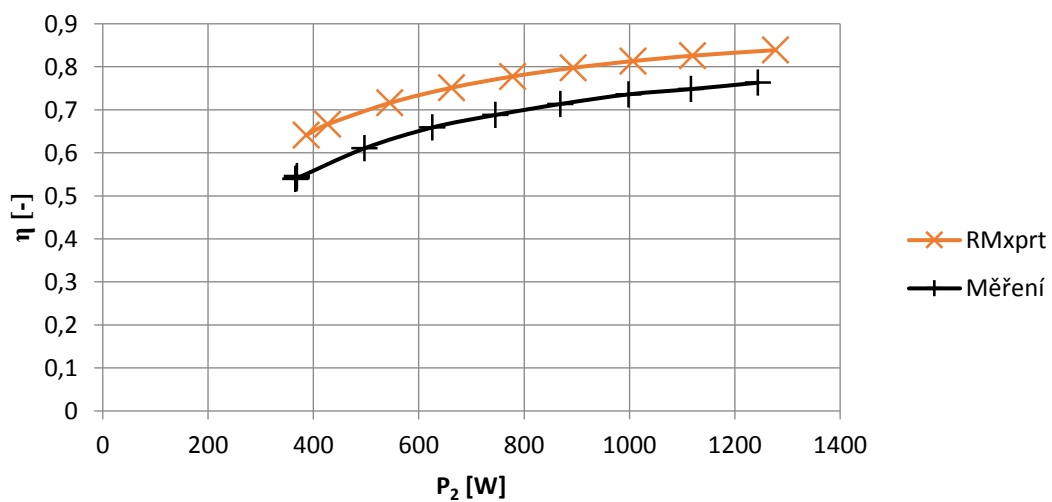
Obrázek 5-12 Porovnání momentu v závislosti na otáčkách pro 400 Hz



Obrázek 5-13 Porovnání proudu v závislosti na otáčkách pro 400 Hz



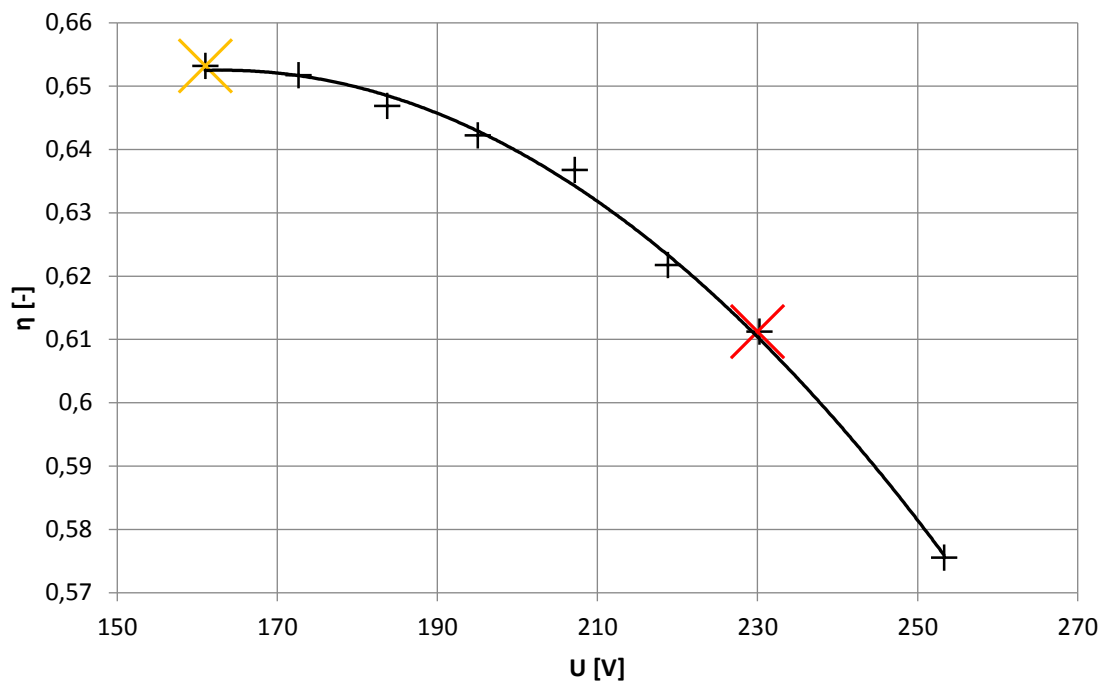
Obrázek 5-14 Porovnání účinnosti v závislosti na výkonu pro 400 Hz



Obrázek 5-15 Porovnání účinnosti v závislosti na výkonu pro 400 Hz

5.7 Napěťová charakteristika

V rámci práce proběhlo měření napěťové charakteristiky. Červený bod na napěťové charakteristice udává hodnotu účinnosti při měření, žlutý pak udává největší účinnost, které lze dosáhnout snížením sycení stroje. V dalších kapitolách je popsáno, jak toho lze dosáhnout.



Obrázek 5-16 Napěťová charakteristika

6 MOŽNOSTI ÚPRAVY STÁVAJÍCÍHO STROJE

Pro dosažení vyšší účinnosti stávajícího motoru se dá učinit několik úprav. Úpravy se snažíme navrhnout takové, které nevyžadují úpravy plechů, které už jsou vyrobené. Proto byly navrženy následující úpravy.

6.1 Zvýšení počtu závitů

Jelikož je měřený motor přesycen, může se zvýšení účinnosti dosáhnout tím, že zvýšíme počet závitů.

Tím se sníží sycení magnetického obvodu a klesnou ztráty v železe a také klesne magnetizační proud, čímž klesnou celkové ztráty.

6.2 Axiální prodloužení magnetického obvodu

Pokud by byl pouze prodloužen magnetický obvod, ale počet závitů by zůstal stejný, tak se při jmenovitém zatížení stroje nedosáhne takové účinnosti, jaké je možné dosáhnout se současnou změnou počtu závitů. Proto se při prodlužování magnetického obvodu zároveň snižuje počet závitů. Tím se mění většina parametrů stroje (sycení, odebíraný proud, indukce ve vzduchové mezeře...), což má za následek změnu většiny ztrát.

Tímto postupem ale většinou vzroste cena stroje [7].

6.3 Použití kvalitnějšího plechu

Při použití kvalitnějších plechů se sníží měrné ztráty. Tím se sníží ztráty v železe u daného stroje. Nevýhodou však je, že většinou se snižujícími se měrnými ztrátami materiálu se zhoršují magnetické vlastnosti daného materiálu. Další nevýhodou je cena, která je vyšší než u aktuálně použitých plechů [7].

7 POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH ÚPRAV

V této části práce jsou rozebrány jednotlivé úpravy a jejich dopad na účinnost, ztráty a jiné parametry stroje. Úpravy byly simulovány v prostředí RMxprt.

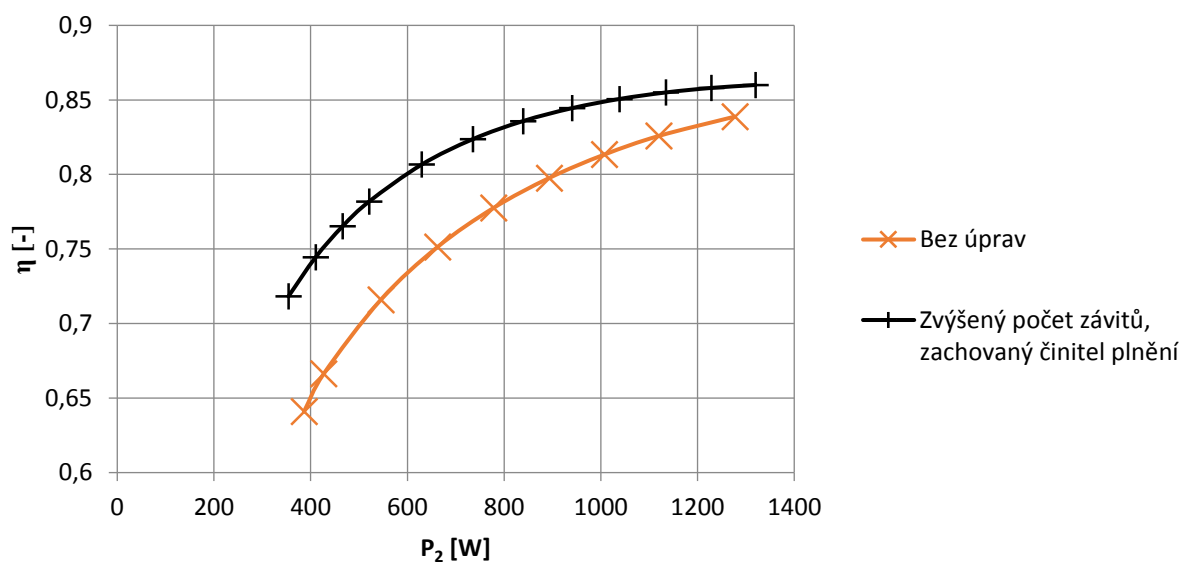
7.1 Zvýšení počtu závitů při zachovaném činiteli plnění drážky

Jednou z možností úprav je změna počtu závitů. Jak je vidět na Obrázku 5-16, měřený motor je přesycen z důvodu nízkého počtu závitů. Nový počet závitů lze získat dosažením hodnoty napětí z napěťové charakteristiky s nejvyšší účinností do rovnice pro magnetický tok (5.1) a následným dopočítáním počtu závitů pro tento nový, snížený tok.

Pokud chceme zachovat činitel plnění drážky konstantní, musíme zmenšit průměr vodiče použitého na vinutí.

Tab. 7-1 Porovnání parametrů při změně závitů a zachování činitele plnění

Parametr	Část	Bez úprav	S úpravou	Parametr	Bez úprav	S úpravou	
B [T]	Vz. mezera	0,67	0,48	n	[ot/min]	23837,9	23657,4
	Jho statoru	1,32	0,90	I_m	[A]	3,041	1,300
	Jho rotoru	1,05	0,72	I	[A]	3,975	2,751
	Zub statoru	1,32	0,94	$\cos\varphi$	[-]	0,609	0,822
	Zub rotoru	1,72	1,23	η	[%]	77,2	82,6
ΔP [W]	Stator	24,2	23,88	M	[Nm]	0,300	0,303
	Rotor	5,5	11,63	P_2	[W]	749,9	750,0
	V železe	130,1	61,92	s	[%]	0,676	1,427
	Celkové	221,8	158,38	P_1	[W]	971,7	908,4
				X_L	[Ω]	42,1	97,4



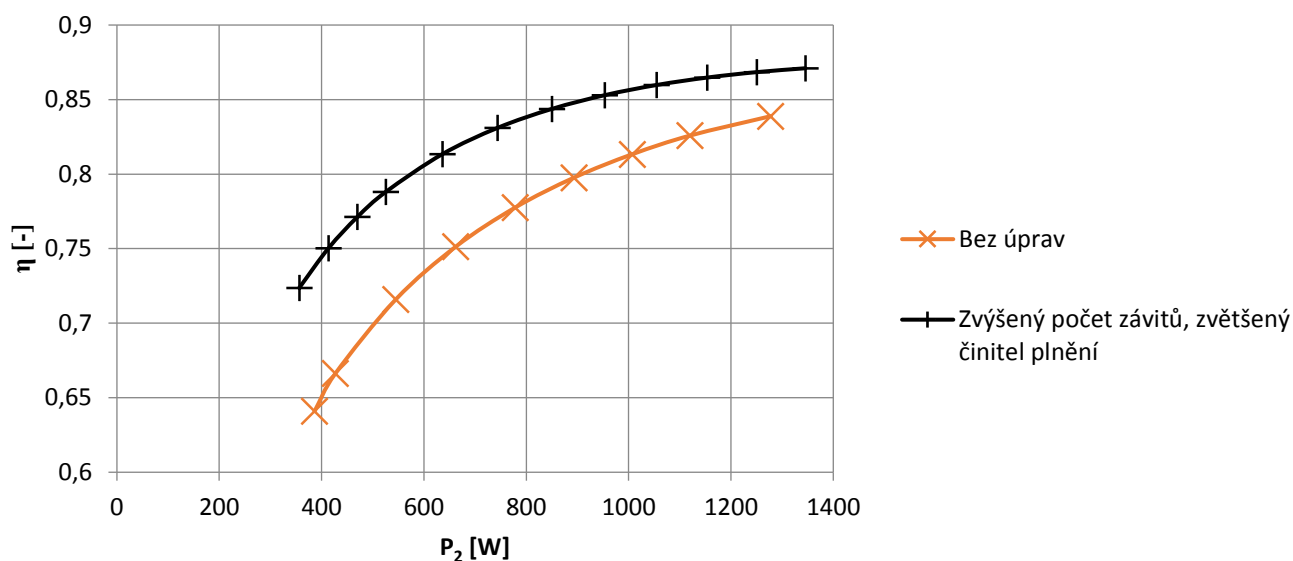
Obrázek 7-1 Porovnání účinnosti při změně závitů a zachování činitele plnění

7.2 Zvýšení počtu závitů a změna činitele plnění drážky

Tato úprava spočívá na stejném principu jako předchozí, jediný rozdíl je v tom, že nezachováváme konstantní činitel plnění, to znamená že ponecháme původní průměr vodiče použitého na vinutí.

Tab. 7-2 Porovnání parametrů při změně závitů i činitele plnění

Parametr	Část	Bez úprav	S úpravou	Parametr		Bez úprav	S úpravou
B [T]	Vz. mezera	0,67	0,48	n	[ot/min]	23837,9	23661,4
	Jho statoru	1,32	0,90	I _μ	[A]	3,041	1,307
	Jho rotoru	1,05	0,72	I	[A]	3,975	2,744
	Zub statoru	1,32	0,95	cosφ	[-]	0,609	0,818
	Zub rotoru	1,72	1,23	η	[%]	77,2	83,2
ΔP [W]	Stator	24,2	16,50	M	[Nm]	0,300	0,303
	Rotor	5,5	11,50	P ₂	[W]	749,9	750,2
	V železe	130,1	62,64	s	[%]	0,676	1,411
	Celkové	221,8	151,61	P ₁	[W]	971,7	901,8
				X _L	[Ω]	42,1	97,4



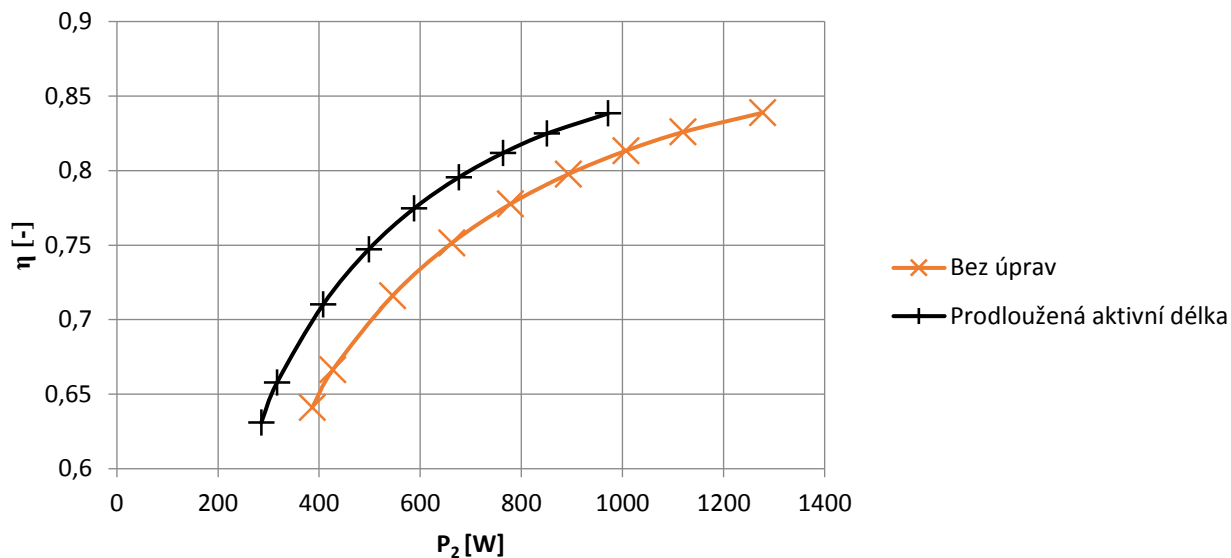
Obrázek 7-2 Porovnání účinnosti při změně závitů i činitele plnění

7.3 Prodloužení magnetického obvodu

Další možná úprava je prodloužení magnetického obvodu motoru. Magnetický obvod byl prodloužen ve stejném poměru, jako byl poměr starého a ideálního magnetického toku v minulém případě. V tomto případě zůstal magnetický tok zachován stejný.

Tab. 7-3 Porovnání parametrů při prodloužení magnetického obvodu

Parametr	Část	Bez úprav	S úpravou	Parametr		Bez úprav	S úpravou
B [T]	Vz. mezera	0,67	0,48	n	[ot/min]	23837,9	23787,8
	Jho statoru	1,32	0,91	I _μ	[A]	3,041	1,885
	Jho rotoru	1,05	0,73	I	[A]	3,975	3,103
	Zub statoru	1,32	0,95	cosφ	[-]	0,609	0,744
	Zub rotoru	1,72	1,24	η	[%]	77,2	80,9
ΔP [W]	Stator	24,2	17,22	M	[Nm]	0,300	0,301
	Rotor	5,5	7,17	P ₂	[W]	749,9	750,1
	V železe	130,1	90,56	s	[%]	0,676	0,884
	Celkové	221,8	176,59	P ₁	[W]	971,7	926,7
				X _L	[Ω]	42,1	68,0



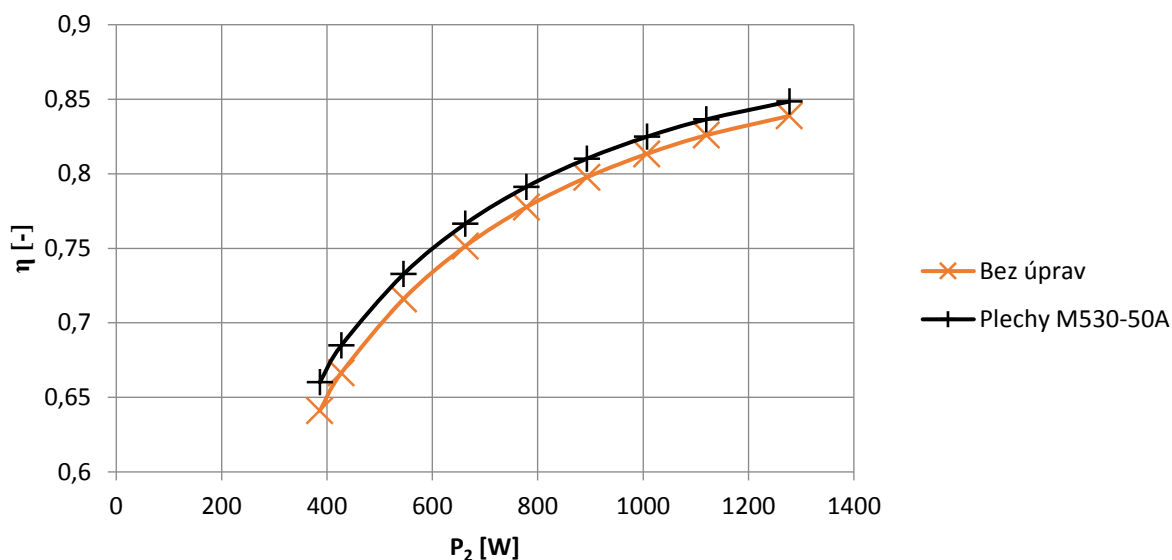
Obrázek 7-3 Porovnání účinnosti při prodloužení magnetického obvodu

7.4 Použití plechů s nižším ztrátovým číslem

Snížení ztrát a tedy zvýšení účinnosti lze také dosáhnout použitím plechů s nižším ztrátovým číslem. Jak je vidět v Tab. 7-4, ztráty v železe částečně poklesnou, ostatní parametry zůstávají víceméně stejné. Pokud bychom chtěli zvýšit účinnost ještě více, museli bychom použít plech s ještě nižším ztrátovým číslem (např. M310-50A).

Tab. 7-4 Porovnání parametrů při použití plechů M530-50A

Parametr	Část	Bez úprav		S úpravou		Parametr		Bez úprav		S úpravou	
B [T]	Vz. mezera	0,67	0,67	n	[ot/min]	23837,9	23837,9				
	Jho statoru	1,32	1,32	I_μ	[A]	3,041	3,076				
	Jho rotoru	1,05	1,05	I	[A]	3,975	3,975				
	Zub statoru	1,32	1,32	$\cos\varphi$	[-]	0,609	0,598				
	Zub rotoru	1,72	1,71	η	[%]	77,2	78,6				
ΔP [W]	Stator	24,2	24,23	M	[Nm]	0,300	0,300				
	Rotor	5,5	5,47	P_2	[W]	749,9	750,1				
	V železe	130,1	112,88	s	[%]	0,676	0,676				
	Celkové	221,8	204,48	P_1	[W]	971,7	954,6				
				X_L	[Ω]	42,1	41,6				



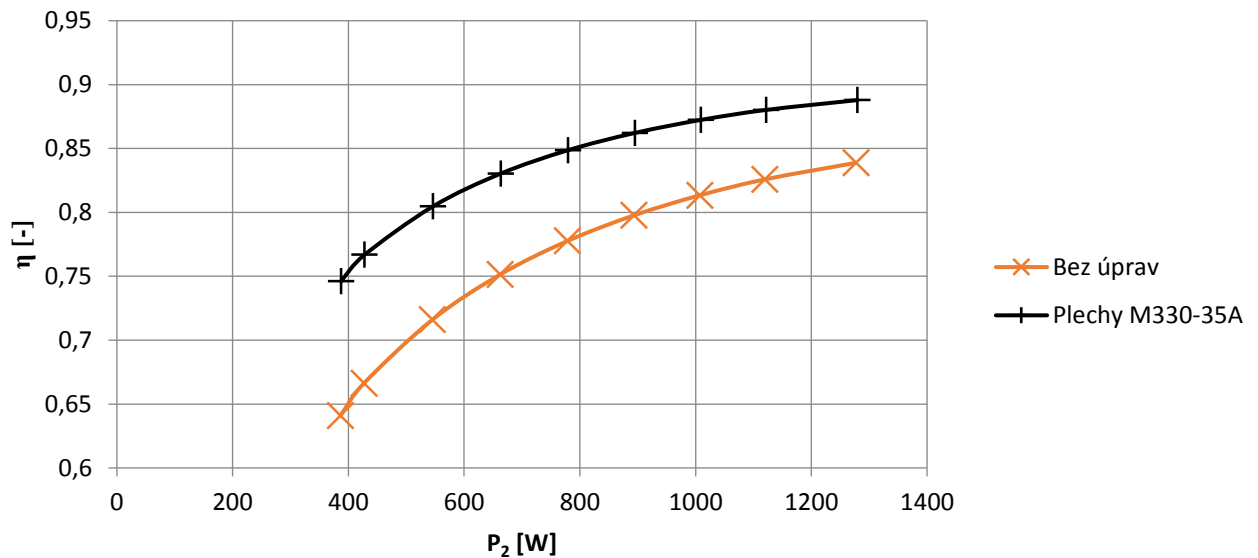
Obrázek 7-4 Porovnání účinnosti při použití plechů M530-50A

7.5 Použití tenčích plechů s nižším ztrátovým číslem

Jelikož tento motor pracuje na frekvenci 400 Hz, vznikají na původních pleších s tloušťkou 0,5 mm značně velké ztráty v železe. Použitím tenčích plechů s nižším ztrátovým číslem tyto ztráty značně sníží.

Tab. 7-5 Porovnání parametrů při použití plechů M330-35A

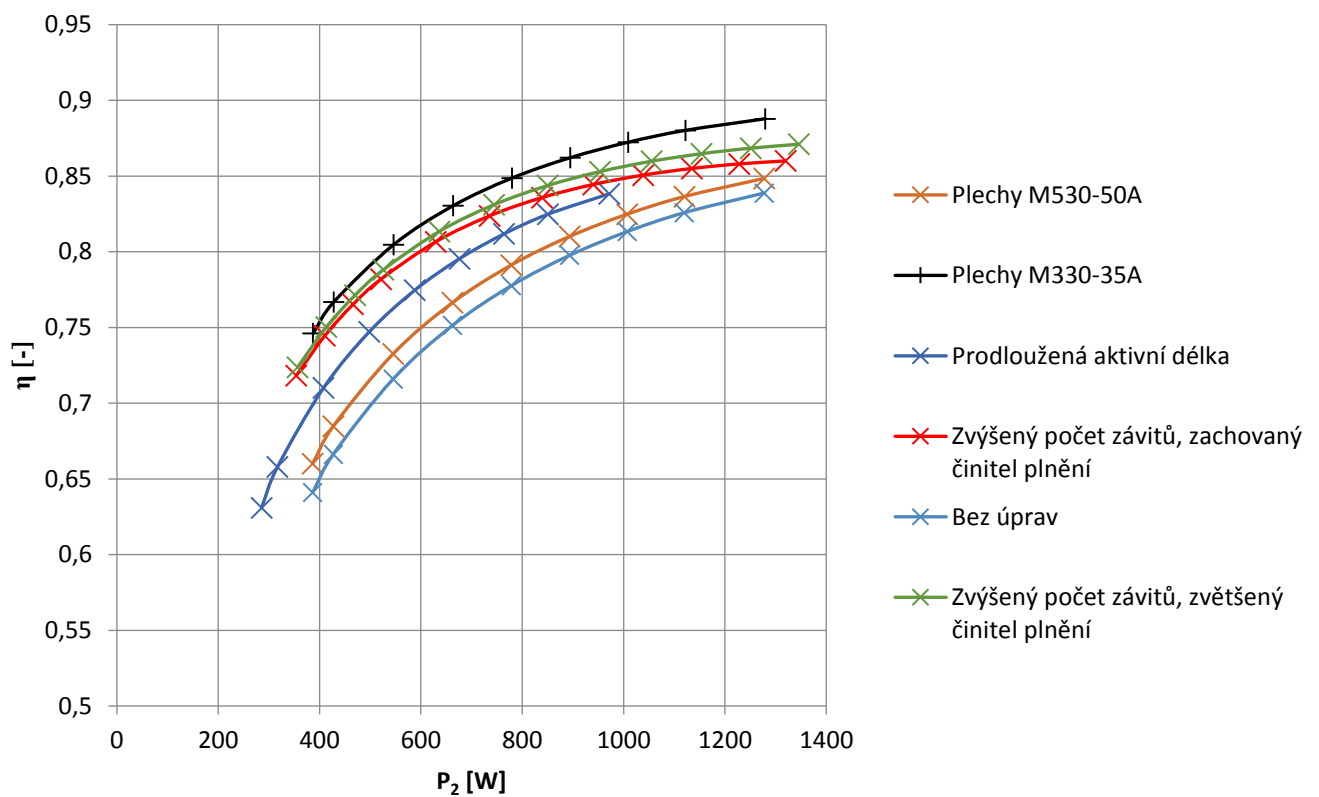
Parametr	Část	S		Parametr		S	
		Bez úprav	úpravou	Bez úprav	úpravou		
B [T]	Vz. mezera	0,67	0,67	n	[ot/min]	23837,9	23838,2
	Jho statoru	1,32	1,34	I_μ	[A]	3,041	3,019
	Jho rotoru	1,05	1,07	I	[A]	3,975	3,830
	Zub statoru	1,32	1,33	cosφ	[-]	0,609	0,577
	Zub rotoru	1,72	1,73	η	[%]	77,2	84,5
ΔP [W]	Stator	24,2	22,49	M	[Nm]	0,300	0,300
	Rotor	5,5	5,46	P_2	[W]	749,9	750,0
	V železe	130,1	48,23	s	[%]	0,676	0,674
	Celkové	221,8	138,09	P_1	[W]	971,7	888,1
				X_L	[Ω]	42,1	42,4



Obrázek 7-5 Porovnání účinnosti při použití plechů M330-35A

7.6 Celkové vyhodnocení

Jak je vidět na Obrázku 7-6, všechny provedené změny více či méně zvyšují účinnost daného stroje. Nejmenší rozdíl je při použití plechů M530-50A, protože zde není až tak markantní rozdíl v měrných ztrátách. Největšího zvýšení účinnosti dosáhneme použitím plechů M330-35A a to hlavně kvůli vyšší pracovní frekvenci stroje, která v užších pleších nevytváří tak velké ztráty v železe.



Obrázek 7-6 Porovnání dopadu všech změn na účinnost

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámení se s principem asynchronních motorů a rozdělením ztrát a dále měření daného stroje, zpracování dat, simulace v RMXprt a následné porovnání a také návrh a simulace úprav tohoto motoru a porovnání důsledků těchto změn na účinnost a jiné parametry stroje.

V kapitole 2 je popsána konstrukce asynchronního motoru s názorným obrázkem a také je zde stručně popsán princip jeho funkce.

Kapitola 3 obsahuje rozdělení jednotlivých druhů ztrát, jejich popis a vysvětlení a obecné vztahy pro teoretický výpočet těchto ztrát.

Dále bylo provedeno měření na daném motoru a to měření naprázdno, měření při zatížení a měření napěťové charakteristiky. Data z měření naprázdno a měření při zatížení byla zpracována a podle normy byly vypočítány jednotlivé ztráty. Tyto ztráty byly dále zpracovány do tabulek a v této kapitole vypsány. V kapitole 4 se také nachází rozdělení ztrát ve jmenovitém bodě 0,3 Nm.

Byl vytvořen model motoru v programu ANSYS Maxwell v prostředí RMXprt, kam byly vloženy parametry a rozměry z výkresové dokumentace a z dokumentace k plechům použitých na rotor a stator stroje. Byly nastaveny podmínky vztažené k zadaným frekvencím a byla provedena analýza modelu motoru. Data z této analýzy byla v kapitole 5.3 a 5.4 porovnána s hodnotami vypočtenými z parametrů stroje a výkresové dokumentace. V kapitole 5.5 byly poté porovnány grafické závislosti vytvořené z naměřených hodnot z měření naprázdno a z měření při zatížení s grafickými závislostmi exportovanými z prostředí RMXprt.

V RMXprt byly také vytvořeny modely tohoto stroje s použitím úprav pro zvýšení účinnosti. Jednak jsou zde modely se stejnými plechy, ale upravenými parametry jako je počet závitů nebo aktivní délka magnetického obvodu, ale také jsou zde úpravy ve formě použití jiných plechů. Plechy byly nastaveny z data sheetů tak, že v prostředí RMXprt byly z uvedených hodnot nastaveny BH a BP křivky těchto plechů.

V poslední části jsou porovnány dopady vyzkoušených úprav na parametry stroje v simulaci v RMXprt. Jak je vidět, tento měřený motor je přesycen, takže veškeré změny, které zmenšují sycení na přijatelnější hodnotu, pomáhají se zvyšováním účinnosti tohoto stroje. Nejmenší dopad má použití plechů M530-50A, protože rozdíl v měrných ztrátách a v BP křivce oproti původním plechům není moc velký. Pokud by byl použit plech například M310-50A, účinnost by se zvýšila určitě více, protože zde už je rozdíl v měrných ztrátách a BP křivce daleko více znatelný. O něco lepší výsledek je při prodloužení délky magnetického obvodu. Ještě lepší účinnosti se dá dosáhnout při zvýšení počtu závitů. To, jestli v tomto konkrétním případě zachováme konstantní činitel plnění použitím vodiče s menším průměrem, nebo jestli vodič ponecháme a tím zvětšíme činitel plnění drážky, neudělá zásadní rozdíl, zvýšení účinnosti je v obou případech přibližně stejné. Největší dopad na účinnost má pak použití plechů M330-35A. Tyto plechy jsou užší než původní plechy a to hraje důležitou roli právě proto, protože při pracovní frekvenci tohoto motoru, která je 400 Hz, na nich nevznikají ani poloviční ztráty v železe, jako při použití původních plechů M700-50A a to má za následek zvýšení účinnosti stroje.

Výstupem této práce tedy je, že účinnost tohoto stroje se dá v určitých mezích zlepšit bez zásahu do geometrie plechů nebo jiných výrazných změn. Použití plechů M330-35A by znatelně zvýšilo účinnost stroje, ale pravděpodobně by tato úprava byla nákladná, jelikož se jedná o plech o dost kvalitnější než jsou plechy použité.

POUŽITÁ 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] ČSN EN 60034-2-1 ed.2. *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.
- [3] NOVOTNÝ, Jiří. *ANALÝZA MOŽNOSTÍ ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ* [online]. Brno, 2014 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85149. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika*. Praha: Informatorium, 1995. ISBN 80-85427-72-9.
- [5] Magnetizační křivka. In: *ELUC* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/459>
- [6] BRÁZDA, M. *Výpočet asynchronního motoru*. 1. vyd. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973, 222 s.
- [7] MACH, Martin. *ANALÝZA ZTRÁT ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ MALÉHO VÝKONU* [online]. Brno, 2015 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111124. Dizertační. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcová. *Design of Rotating Electrical machines*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B).
- [9] Činitel plnění [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <https://www.emetor.com/blog/post/rule-thumb-calculating-stacking-factor/>.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	[T]	Magnetická indukce
b	[m]	Rozměry vinutí
b _{zub}	[m]	Šířka zubu
cosφ	[-]	Účinník
D	[m]	Průměr rotoru/statoru
f	[Hz]	Frekvence
H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
I	[A]	Proud
I ₀	[A]	Proud naprázdno
k _E	[-]	Poměr indukovaného napětí statoru k jmenovitému
k _{krok}	[-]	Činitel kroku
k _{rozloha}	[-]	Činitel rozlohy
k _w	[-]	Činitel vinutí
k _{fe}	[-]	Činitel plnění železa
K _e	[-]	Činitel tvaru křivky dB/dt
L _{fe}	[m]	Aktivní délka statorového svazku
M	[Nm]	Moment
n	[ot/min]	Otáčky
N	[-]	Počet závitů
n _s	[ot/min]	Synchronní otáčky
p	[-]	Počet pólových dvojic
P ₀	[W]	Příkon naprázdno
P ₁	[W]	Příkon
P ₂	[W]	Výkon
P _j	[W]	Jouleovy ztráty
P _h	[W]	Hysterezní ztráty
P _w	[W]	Ztráty vířivými proudy
P _{mech}	[W]	Mechanické ztráty
P _s	[W]	Ztráty ve vinutí statoru
P _r	[W]	Ztráty ve vinutí rotoru
P _C	[W]	Konstantní ztráty
P _{fw}	[W]	Ztráty třecí a ventilační

P_{v1}	[W]	Ventilační ztráty
P_t	[W]	Třecí ztráty
P_{v2}	[W]	Ztráty na koncích rotoru
P_{fe}	[W]	Ztráty v železe
P_{Lr}	[W]	Zbytkové ztráty
P_{LL}	[W]	Přídavné ztráty
P_T	[W]	Celkové ztráty
R	[Ω]	Odpor
Re_{δ}	[-]	Couette-Reynoldsovo číslo
s	[-]	Skluz
t_{zub}	[m]	Drážková rozteč
U	[V]	Napětí
U_0	[V]	Napětí naprázdno
U_I	[V]	Vnitřní napětí
V	[m ³]	Objem
α	[W/m ² K]	Součinitel přestupu tepla
$\Delta\vartheta$	[K]	Rozdíl teplot
η	[%]	Účinnost
Φ_m	[Wb]	Magnetický tok
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost