



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

**VLIV DÉLKY MAGNETICKÉHO OBVODU NA VLASTNOSTI
ASYNCHRONNÍHO MOTORU**

IMPACT OF CORE LENGTH ON INDUCTION MACHINE CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bohumil Kalvoda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bohumil Kalvoda

ID: 195666

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Vliv délky magnetického obvodu na vlastnosti asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte vliv délky magnetického obvodu na vlastnost asynchronního motoru.
2. Určete vhodný počet závitů statorového vinutí pro různé délky magnetického obvodu.
3. Výpočty ověřte pomocí programu RMXprt.
4. Výsledky porovnejte.

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] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating electrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-89516-6.
- [3] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49-0004-5.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Práce se zabývá analytickým výpočtem asynchronního motoru a porovnáním vypočítaných hodnot s hodnotami, které vypočítal program RMxpřt. Výpočty jsou prováděny v programu Matlab, za účelem změny parametrů pro zvýšení účinnosti motoru.

Klíčová slova

Asynchronní motor, RMxpřt, analytický výpočet, Matlab

Abstract

The Bachelor theses deals with analytical calculation of asynchronous motor along with comparing calculated values with the values acquired by calculating of RMxpřt program. The calculations are carried out by Matlab program, for the purpose of changing the parameters to increase engine efficiency.

Keywords

Induction motor, RMxpřt, analytic calculation, Matlab

Bibliografická citace:

KALVODA, Bohumil. *Vliv délky magnetického obvodu na vlastnosti asynchronního motoru* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125785>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vliv délky magnetického obvodu na vlastnosti asynchronního motoru 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **9.6.2020**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 9.6.2020

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod	15
2. Asynchronní stroj	16
2.1 Konstrukce motoru	16
2.2 Obvodový model stroje.....	17
2.4 Točivé magnetické pole	17
2.6 Ztráty.....	18
3. Praktická část	19
3.1 Vstupní hodnoty.....	19
3.2 Výpočet magnetické indukce.....	19
3.3 Výpočet magnetického napětí.....	22
3.4 Výpočet náhradního obvodu	25
3.4.1 Odpor jedné fáze statoru.	25
3.4.2 Výpočet rotorového odporu	25
3.4.3 Rozptylová reaktance statorového vinutí.....	26
3.4.4 Rozptylová reaktance klece rotoru.....	27
3.4.5 Odpor příčné větve.....	27
3.5 Výpočet ztrát	28
3.5.1 Ztráty v železe.....	28
3.5.2 Dodatečné ztráty v železe	29
3.6 Výpočty charakteristik motoru	31
4. Program Rmxprt a porovnání hodnot.....	33
4.1 RMXprt	33
4.2 Porovnání výsledků.....	34
5. Zvýšení účinnosti motoru.....	39
5.1 Porovnání prodlouženého motoru s původním motorem.....	47
ZÁVĚR	49

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

δ	...	vzduchová mezera	[m]
α_δ	...	činitel pólového krytí	[-]
α_{20}	...	teplotní součinitel	[K ⁻¹]
μ_0	...	permeabilita vakua	[H/m]
$2p$	...	počet pólů	[-]
a	...	počet paralelních větví	[-]
a_1	...	počet cívek jedné fáze statoru	[-]
a_{kn}	...	střední výška kruhu nakrátko	[m]
B	...	magnetická indukce	[T]
b	...	šířka drážky ve spodní části drážky statoru	[m]
B_δ	...	magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
b_{01}	...	šířka drážky zubu statoru	[m]
B_{01}	...	amplituda pulsující indukce nad zuby rotoru	[T]
B_{01}	...	amplituda pulsující indukce nad zuby statoru	[T]
b_{02}	...	šířka otevření drážky	[m]
b_2	...	šířka drážky	[m]
b_{kn}	...	výška kruhu nakrátko	[m]
B_{p1}	...	indukce ve středním průřezu zubu statoru	[T]
B_{p2}	...	indukce ve středním průřezu zubu rotoru	[T]
b_{z1}	...	střední výška zubu statoru	[m]
b_{z2}	...	střední výška zubu rotoru	[m]
D_1	...	vnější průměr motoru	[m]
D_{e1}	...	vnější průřez rotoru	[m]
D_h	...	průřez hřídele	[m]

D_j	...	vnitřní průřez statoru	[m]
D_{kn}	...	střední průměr kruhu nakrátko	[m]
f_1	...	síťová frekvence	[Hz]
F_m	...	celkové magnetické napětí	[A]
H	...	intenzita magnetického pole	[A/m]
h_0	...	výška krku drážky	[m]
h_{02}	...	vzdálenost drážky od vzduchové mezery	[m]
h_{12}	...	výška drážky	[m]
h_2	...	tloušťka izolace	[m]
h_3	...	výška aktivní části drážky statoru	[m]
h_{j1}	...	výška j ha statoru	[m]
h_{j2}	...	výška j ha rotoru	[m]
h_{z1}	...	výška zubu statoru	[m]
h_{z2}	...	výška zubu rotoru	[m]
I	...	proud	[A]
I_μ	...	magnetizační proud	[A]
I_1	...	jmenovitý proud	[A]
$I_{1\check{c}}$	...	činná část jmenovitého proudu	[A]
I_z	...	záběrný proud	[A]
k_{\sim}	...	činitel zvětšení odporu	[-]
k_{01}	...	činitel vlivu opracování hlav zubů	[-]
k_B	...	činitel tvaru pole	[-]
k_c	...	Carterův činitel	[-]
k_d	...	činitel nerovnosti rozložení magnetického toku	[-]
k_E	...	poměr indukovaného napětí ke jmenovitému napětí	[-]
k_{Fe}	...	činitel plnění železa	[-]
k_r	...	činitel rozlohy	[-]
k_v	...	činitel vinutí	[-]
k_v	...	činitel zkrácení kroku	[-]
L	...	délka jednoho závitů cívky	[m]
l_{fe}	...	délka železa motoru	[m]
l_i	...	délka motoru	[m]

l_{j1}	...	délka magnetické indukční čáry jha statoru	[m]
l_{j2}	...	délka magnetické indukční čáry jha rotoru	[m]
l_t	...	délka tyče	[m]
m	...	hmotnost	[kg]
m_1	...	fáze	[-]
M_{max}	...	moment zvratu	[Nm]
M_n	...	jmenovitý moment	[Nm]
M_Z	...	záběrný moment	[Nm]
n	...	otáčky motoru	[min ⁻¹]
η	...	účinnost	[-]
N_1	...	počet závitů v jedné fázi	[-]
P_Z	...	celkové ztráty	[W]
$p_{\delta p1}$	...	hustota povrchových ztrát zubů statoru	[Wm ⁻²]
$p_{\delta p2}$	...	hustota povrchových ztrát zubů rotoru	[Wm ⁻²]
q_1	...	počet drážek na pól a fázi	[-]
Q_1	...	počet drážek statoru	[-]
Q_2	...	počet drážek rotoru	[-]
R'_2	...	přepočítaný odpor kruhu a tyče rotoru	[Ω]
R_{100}	...	odpor fáze statoru při 100 °C	[Ω]
R_{12}	...	ekvivalent oporu příčné větve	[Ω]
R_2	...	odpor kruhu a tyče rotoru	[Ω]
R_{20}	...	odpor fáze statoru při 20 °C	[Ω]
R_{Fe}	...	odpor příčné větve	[Ω]
R_{kn}	...	odpor části kruhu	[Ω]
R_t	...	odpor tyče	[Ω]
S	...	obsah	[m ²]
S_d	...	počet cívek jedné fáze statoru	[-]
S_{kn}	...	průřez kruhu nakrátko	[m ²]
s_{max}	...	maximální skluz	[-]
S_t	...	průřez tyče rotoru	[m ²]
t_p	...	pólová rozteč	[mm]

U	...	magnetické napětí	[A]
U_{δ}	...	magnetické napětí ve vzduchové mezeře	[A]
U_{1N}	...	síťové napětí	[V]
V_d	...	počet závitů v jedné cívce	[-]
X_{μ}	...	reaktance příčné větve	[Ω]
X_1	...	rozptylová reaktance statorového vinutí	[Ω]
X_{12}	...	ekvivalent reaktance příčné větve	[Ω]
X_2	...	rozptylová reaktance klece rotoru	[Ω]
z	...	počet závitů jedné cívky	[-]
Z_c	...	celková impedance	[Ω]
β	...	poměrné zkrácení kroku vinutí	[-]
$\beta_{1(2)}$	...	hodnota odečtená z grafu	[-]
γ	...	poměr otevření drážek a vzduchové mezery	[-]
Δ	...	delta	[-]
ΔP_{p1}	...	pulsní ztráty ve statoru	[W]
ΔP_{p2}	...	pulsní ztráty v rotoru	[W]
$\Delta P_{\delta p1}$	...	povrchové ztráty ve statoru	[W]
$\Delta P_{\delta p2}$	...	povrchové ztráty v rotoru	[W]
Δp	...	měrné ztráty	[W/kg]
ΔP_{FDo}	...	celkové dodatečné ztráty železe statoru	[W]
ΔP_{Fe}	...	celkové ztráty v železe	[W]
ΔP_{Fes}	...	ztráty v železe	[W]
ΔP_{Fs}	...	ztráty v železe statoru	[W]
ΔP_{Fr}	...	ztráty v železe rotoru	[W]
ΔP_k	...	ztráty v kleci	[W]
ΔP_{mech}	...	mechanické ztráty	[W]
ΔP_{vs}	...	ztráty ve vinutí statoru	[W]
ϑ	...	teplota	[$^{\circ}C$]

λ_{ε}	...	činitel magnetické vodivosti čel	[-]
$\lambda_{\varepsilon 2}$	...	činitel magnetické vodivosti kruhu nakrátko	[-]
λ_d	...	činitel magnetické vodivosti drážky statoru	[-]
λ_{d2}	...	činitel magnetické vodivosti drážky rotoru	[-]
λ_{dif}	...	magnetická vodivost diferenciálního rozptylu	[-]
λ_{dif2}	...	magnetická vodivost diferenciálního rozptylu klece	[-]
ξ	...	činitel statorového a rotorového vinutí	[-]
π	...	Ludolfovo číslo	[-]
ρ_t	...	rezistivita tyče rotoru	[Ωm]
ρ_{20m}	...	rezistivita mědi při 20 °C	[$\Omega mm^2 m^{-1}$]
ρ_{Fe}	...	hustota železa	[$kg m^{-3}$]
Φ	...	magnetický tok	[Wb]

Indexy:

j_1	...	index statoru	[-]
j_2	...	index rotoru	[-]
z_1	...	index zubu statoru	[-]
z_2	...	index zubu rotoru	[-]

Seznam obrázků

Obr.1 Popis trojfázového asynchronního motoru v řezu [8].....	16
Obr. 2 Obvodový model asynchronního motoru (upraven) [3]	17
Obr. 3 Točivé magnetické pole [3]	17
Obr. 4 Graf závislosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole pro plech M800-50 [5]	22
Obr. 5 Prostředí RMXprt	33
Obr. 6 Uložení statorového vinutí.....	34
Obr. 7 Momentové charakteristiky motoru.....	37
Obr. 8 Závislost účinnosti na otáčkách	37
Obr. 9 Závislost proudu na otáčkách	38
Obr. 11 Část programu v Matlabu vykreslující matici momentů	39
Obr. 12 Mapa účinností vytvořená analytickým výpočtem	41
Obr. 13 Mapa účinností vytvořená pomocí RMXprt.....	42
Obr. 14 Mapa momentů pomocí RMXprt	43
Obr. 15 Mapa momentů vytvořená analytickým výpočtem.....	44
Obr. 16 Porovnání účinností původního a prodlouženého motoru (280 mm, 17 závitů)	47
Obr. 17 Porovnání momentů původního a prodlouženého motoru (280 mm, 17 závitů)	48

Seznam tabulek

Tab. 1 Tabulka vstupních hodnot.....	19
Tab. 2 Tabulka magnetické indukce	35
Tab. 3 Tabulka ztrát	35
Tab. 4 Tabulka hodnot náhradního schématu	35
Tab. 5 Tabulka hodnot motoru.....	36
Tab. 6 Tabulka magnetického napětí	36
Tab. 7 Porovnání hodnot při délce svazku motoru 350 mm	46
Tab. 8 Porovnání prodlouženého a původního motoru (RMxprt)	47

1. ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá analytickým výpočtem asynchronního motoru.

Práce vychází z technické dokumentace motoru, ze které jsou známy základní parametry motoru. Tyto hodnoty poslouží k výpočtu náhradního schématu motoru, a dále ke snaze zvýšit účinnost motoru. K výpočtu bude použit program Matlab pro rychlý přepočet hodnot.

Analytický výpočet bude následně porovnán a vyhodnocen s hodnotami, které vypočítá program RMXprt.

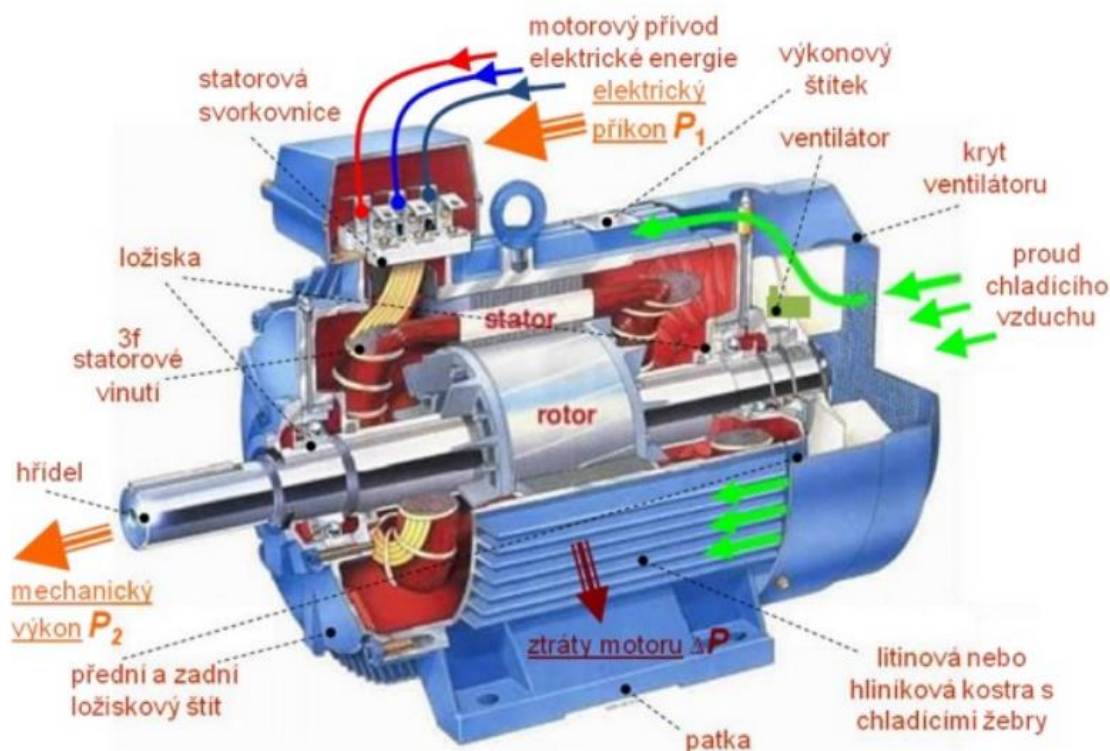
2. ASYNCHRONNÍ STROJ

Jedná se o točivé elektrické zařízení, které slouží k přeměně elektrické a mechanické energie. Motory dělíme na motory, které vytváří mechanickou energii a spotřebují elektrickou energii a na generátory, kde působením mechanické energie je vytvářena elektrická energie. [3]

2.1 Konstrukce motoru

Většina asynchronních motorů je vyráběna s vlastním chlazením. Motory otevřené mají ventilátory uvnitř stroje, které ženu vzduch strojem. Uzavřené motory mají na povrchu stroje žebrování nebo větrací kanály. Plášť motoru je ofukován ventilátorem umístěným na konci motoru. Ventilátor je nasazen na hřídeli a opatřen krytem, díky kterému je hnaný vzduch směřován do žebrování motoru a zvyšuje chladicí účinek. [1]

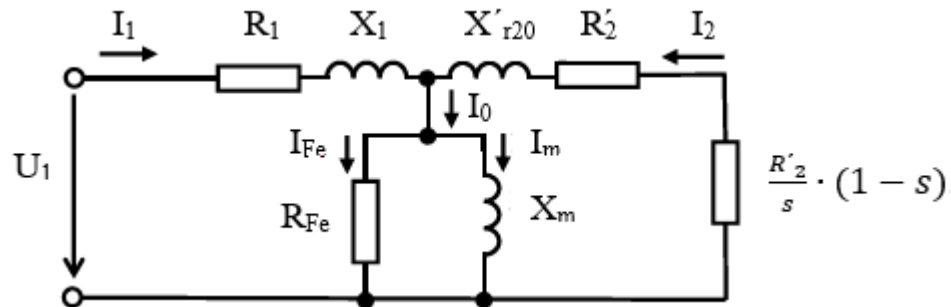
Motor je složen z nepohyblivé části – statoru a pohyblivé části – rotoru. Stator je tvořen ze svařované, hliníkové nebo litinové konstrukce a ložiskových štítů. V kostře statoru jsou zalisované, navzájem odizolované plechy, ve kterých jsou vytvořeny drážky pro statorové vinutí. Mezi rotorem a státorem je vzduchová mezera. Rotor je složen z rotorových plechů nalisovaných na hřídeli a z lité klece. Hřídel se otáčí na ložiscích. Z venku motoru je umístěna svorkovnice. Upevnění motoru zajišťují patky přivařené ze spodní strany motoru. [1] [3]



Obr.1 Popis trojfázového asynchronního motoru v řezu [8]

2.2 Obvodový model stroje

Asynchronní motor můžeme přepočítat do obvodového modelu, který je stejný jak u transformátorů. Rozdílné jsou frekvence na statoru a rotoru.



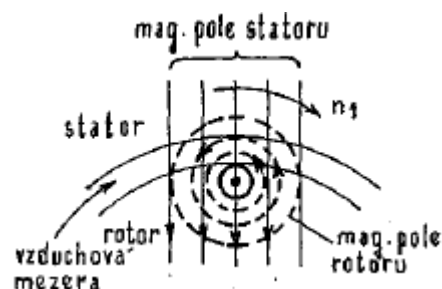
Obr. 2 Obvodový model asynchronního motoru (upraven) [3]

Statorový obvod má kmitočet f_1 a je tvořen odporem fáze R_1 , rozptylovou reaktancí X_1 , magnetizační reaktancí X_m a ztrátami v železe R_{Fe} , respektive ztrátami v magnetickém obvodu. Rotorový obvod má kmitočet f_2 a je proměnný dle zatížení stroje. Dále je tvořen rozptylovou reaktancí X_2 , odporem klece R_2 a odpor reprezentující zátěž na hřídeli $\frac{R'_2}{s} \cdot (1 - s)$. Po přepočítání rotorového obvodu na stejnou frekvenci dostáváme náhradní schéma jedné fáze motoru. Za pomoci výpočtu náhradního schématu lze dopočítat a určit charakteristiku a vlastnosti motoru v provozu. [3]

2.3 Točivé magnetické pole

Za účasti třífázové soustavy a tří cívek, které jsou vzájemně pootočený o 120° , vzniká točivý moment působením magnetických polí mezi cívkami. [4]

Průchodem střídavého napětí v cívkách statoru vzniká magnetický tok. Toto magnetické pole prochází rotorem, ve kterém indukuje napětí ve vinutí rotoru. Pokud je vinutí rotoru uzavřené, protéká jím proud a vytváří magnetické pole v rotoru. Magnetické pole statoru a rotoru na sebe navzájem působí a vytváří točivý moment v rotoru, který působí ve směru magnetického toku statoru. [3]



Obr. 3 Točivé magnetické pole [3]

2.4 Ztráty

Ztráty v motoru jsou rozděleny na ztráty v železe, ztráty mechanické, ztráty ventilační, Joulovy ztráty ve vinutí a ztráty dodatečné.

Ztráty v železe asynchronního motoru se počítají pro statorové plechy, pro ztráty v rotoru a dodatečné ztráty v železe. Největší ztráty vznikají ve statorových plechách vlivem napájecí frekvence. Ztráty v rotoru bereme v úvahu tehdy, pokud motor má dlouhý rozjezd a frekvence rotoru je blízká frekvenci statoru. Tyto ztráty ovlivňuje typ použitých plechů, magnetická indukce a kvalita opracování plechů.

Dodatečné ztráty vznikají při chodu na prázdno. Jedná se o ztráty v železe zubu a o ztráty povrchové, které vznikají v horní vrstvě zubů statoru a rotoru vlivem změny magnetického toku ve vzduchové mezeře.

Mechanické ztráty se dělí na ztráty třením a větráním. Ztráty třením vznikají v ložiscích a u kroužkových motorů na kartáčích. K výpočtu je zapotřebí znát použité ložisko. Ztráty větráním jsou dány výkonem ventilátoru, aby zvládal ochlazovat motor. Ventilátor bývá umístěn na hřídeli motoru a jeho kryt směřuje vyfukovaný vzduch do chladících žeber na vnější straně motoru. Další ztráty vytváří tření rotoru o vzduch.

Ztráty ve vinutí se počítají zvláště pro statorové a pro rotorové vinutí nebo pro klec, u motorů kroužkových vznikají ještě ztráty na kartáčích. [2]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Pro výpočty asynchronního motoru byla dodána technická dokumentace, ze které byly použity hodnoty pro výpočet motoru. Příklady jsou uvedeny v obecném tvaru, bez dosazení a s výsledkem, protože motor se stále vyrábí.

Veškeré vzorce, pokud u nich nebude uveden zdroj, jsou převzaty z [2].

3.1 Vstupní hodnoty

Tab. 1 Tabulka vstupních hodnot

Počet drážek statoru	45
Počet drážek rotoru	38
Vnější průměr motoru	245 mm
Vnitřní průměr statoru	152 mm
Vnější průměr rotoru	151 mm
Jho statoru	16,75 mm
Jho rotoru	35 mm
Počet závitů cívky	18
Počet pólů	12
Délka svazku motoru	0,2 m
Šířka vzduchové mezery	0,5 mm

3.2 Výpočet magnetické indukce

Počet drážek na pól a fázi

$$q_1 = \frac{Q_1}{2P \cdot m_1} = 1,25 \quad (1)$$

Q_1 je počet drážek statoru a počet fází m_1 .

Počet závitů v jedné fázi statorového vinutí

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{a \cdot m_1} = 270 \quad (2)$$

V_d udává počet závitů v jedné cívce, a udává počet paralelních větví.

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2 p} = 0,0398 \text{ m} \quad (3)$$

Pólová rozteč určuje vzdálenost jednotlivých pólů. D_1 je vnější průřez motoru.
Činitel zkrácení kroku

$$k_y = 1$$

Činitel rozlohy statorového vinutí

$$k_r = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} = 0,983 \quad (4)$$

Činitel rozlohy nám určuje rozložení magnetomotorického napětí, které je rozloženo v Q_1 drážkách a vykazuje stupňovitý průběh. Díky odstupňování jsou potlačovány vyšší harmonické kmity.

Činitel vinutí

$$k_v = k_y \cdot k_r = 0,983 \quad (5)$$

Indukované napětí ve vinutí je nižší oproti ideálnímu vinutí s plným krokem a soustřednému vinutí.

Činitel tvaru pole k_B a činitel pólového krytí α_δ

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \quad (6)$$

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,64 \quad (7)$$

Kvůli nasycení zubů statoru a rotoru se zplošťuje tok ve vzduchové mezeře.

Poměr indukovaného napětí ve statoru k jmenovitému napětí je odhadnut z grafu kvůli necelé křivce. Tento motor je odlišný od obvyklého typu motoru, kvůli vysokému počtu pólů k jeho velikosti.

$$k_E = 0,89$$

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_n}{4 \cdot N_1 \cdot k_B \cdot k_v \cdot f_1} = 0,00350 \text{ Wb} \quad (8)$$

Magnetický tok s frekvencí f_1 se indukuje ve statorovém vinutí s N_1 závitů a je sníženo o činitel vinutí k_v . Dále teče statorovými plechy do vzduchové mezeře, kde je zdeformováno nasycením zubů rotoru a statoru o hodnotu k_B a uzavírá se přes rotor a vzduchovou mezeru do statorových plechů.

Magnetická indukce jha statoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j1} \cdot l_{fe} \cdot k_{fe}} = 0,547 \text{ T} \quad (9)$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot l_i \cdot t_p} = 0,687 \text{ T} \quad (10)$$

Magnetická indukce jha rotoru

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_{fe} \cdot k_{fe}} = 0,262 \text{ T} \quad (11)$$

Magnetická indukce v zubech statoru

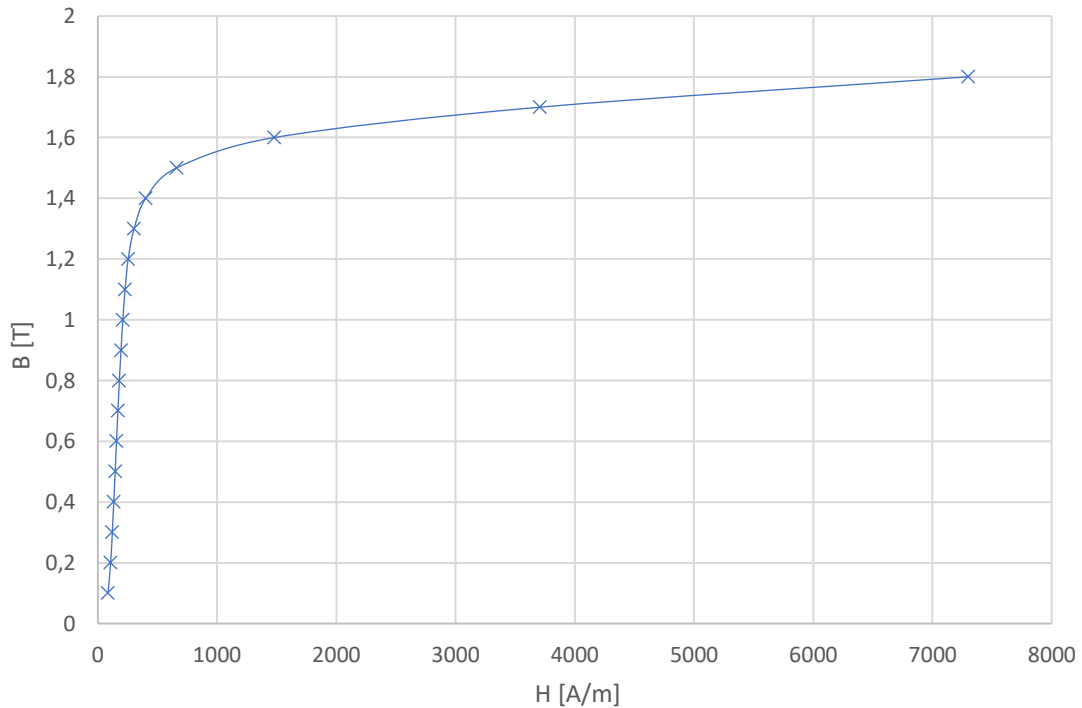
$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1} \cdot l_{fe} \cdot k_{fe}} = 1,477 \text{ T} \quad (12)$$

Magnetická indukce v zubech rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2} \cdot l_{fe} \cdot k_{fe}} = 1,445 \text{ T} \quad (13)$$

3.3 Výpočet magnetického napětí

Statorové a rotorové plechy jsou vyrobeny z plechu M800-50 A. Hodnoty intenzity magnetického pole jsou odečteny z katalogového listu.[5]



Obr. 4 Graf závislosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole pro plech M800-50 [5]

$$H_{j1}=148,83 \text{ A/m}$$

$$H_{j2}=117,27 \text{ A/m}$$

$$H_{z1}=635,13 \text{ A/m}$$

$$H_{z2}=501,74 \text{ A/m}$$

Pro celkové magnetické napětí magnetického obvodu, je zapotřebí vypočítat jeho dílčí části a sečíst je.

Magnetické napětí vzduchové mezery

Před samotným výpočtem napětí vzduchové mezery se musí vypočítat Carterův činitel k_c . Tento činitel určuje, o kolik vzrůstá magnetické napětí v mezeře s různým poměrem šířky zubů a drážek u rotoru a statoru.

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \cdot \delta} = 1,215 \quad (14)$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = 3,755 \quad (15)$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \cdot \delta} = 1,047 \quad (16)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = 1,125 \quad (17)$$

$$k_c = k_{c1} * k_{c2} = 1,272 \quad (18)$$

Vzdálenost dvou středů zubů od sebe je t_d , δ určuje vzdálenost mezi státorem a rotorem a b_{01} , b_{02} určuje šířku drážky zubů u vzduchové mezery.

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot k_c = 695,908A \quad (19)$$

Permeabilita vakua se značí μ_0 .

Magnetické napětí jha statoru

Délka magnetické indukční čáry jha statoru

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_{e1} - h_{j1})}{2p} = 0,0598 \text{ m} \quad (20)$$

$$U_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 8,89A \quad (21)$$

Vnější průřez rotoru je D_{e1} , šířka jha statoru se značí h_{j1} , intenzita magnetického pole jha statoru H_{j1} .

Magnetické napětí zubů statoru

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 37,79A \quad (22)$$

Výška zubu h_{z1} je odečtena z technické dokumentace.

Magnetické napětí zubů rotoru

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 10,64A \quad (23)$$

Magnetické napětí jha rotoru

Střední délka magnetické indukční čáry

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_h - h_{j2})}{2p} = 0,0249 \text{ m} \quad (24)$$

D_h je průřez hřídele, h_{j2} je značena výška jha rotoru.

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 2,92A \quad (25)$$

Celkové magnetické napětí obvodu

$$F_m = U_{j2} \cdot U_{z2} \cdot U_{z1} \cdot U_{j1} \cdot U_{\delta} = 756,15A \quad (26)$$

3.4 Výpočet náhradního obvodu

3.4.1 Odpor jedné fáze statoru.

Z technické dokumentace lze vyčíst veškeré hodnoty k výpočtu odporu.

$$R_{20} = \rho_{20} \cdot \frac{a \cdot z \cdot L}{S_d} = 1,551 \Omega \quad (27)$$

Statorové vinutí je navinuto z mědi, proto je uvažována rezistivita mědi pro 20 °C ρ_{20} . Počet závitů v jedné cívce je značeno z a počet cívek jedné fáze ve statoru a . L udává délku jednoho závitu vinutí cívky a S_d stanovuje průřez navinutého drátu.

Pracovní teplota motoru odpovídá zhruba 100 °C, a proto je nutné provést přepočet na odpovídající teplotu.

$$R_{100} = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_{100} - \vartheta_{20})) = 3,385 \Omega \quad (28)$$

Vzorec pro přepočet odporu se skládá z odporu při dvaceti stupních R_{20} , teplotního součinitele mědi α_{20} a rozdílu teplot.

3.4.2 Výpočet rotorového odporu

Rotorový svazek je tvořen rotorovými plechy s drážkami, ve kterých jsou uloženy hliníkové tyče na konci spojené kruhy nakrátko. Ve výpočtu počítáme jednu tyč a dvě části kruhu nakrátko. Výpočet je rozdělen do dvou částí z důvodů různých proudů v tyči a kruzích. První část počítá odpor tyče a druhá část odpor kruhu nakrátko.

Odpor tyče

$$R_t = \rho_t \cdot \frac{l_t}{S_t} \cdot k_{\sim} = 1,4894 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (29)$$

k_{\sim} je činitel zvětšení odporu, l_t stanovuje délku tyče a S_t její průřez. ρ_t udává rezistivitu materiálu tyče.

Odpor části kruhu nakrátko

$$R_{kn} = \rho_t \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = 1,8781 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (30)$$

D_{kn} udává střední průměr kruhu nakrátko a S_{kn} je průřez kruhu nakrátko.

Fiktivní odpor R_2

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 1,5309 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (31)$$

Přičemž deltu vypočítáme ze vztahu

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 0,952 \quad (32)$$

Přepočítaný odpor na počet závitů ve statoru je roven

$$R'_2 = R_2 \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 3,385 \Omega \quad (33)$$

3.4.3 Rozptylová reaktance statorového vinutí

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_2}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d \cdot \lambda_c \cdot \lambda_{dif}) = 5,0761 \Omega \quad (34)$$

λ_d ve výpočtu zastupuje činitel magnetické vodivosti drážky a určuje se podle tvaru drážky a k tomu určený výpočetní vztah

$$\lambda_d = \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_0}{2 \cdot b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_0}{b_0}\right) \cdot k'_\beta = 2,0642 \quad (35)$$

Magnetická vodivost čel λ_c se vypočítá ze vztahu

$$\lambda_c = 0,34 \cdot \frac{q}{l_2} \cdot (l_c - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = 0,0212 \quad (36)$$

Diferenční rozptyl a jeho magnetická vodivost λ_{dif} se vypočítá ze vzorce

$$\lambda_{dif} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = 1,2199 \quad (37)$$

3.4.4 Rozptylová reaktance klece rotoru

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_2 \cdot (\lambda_{d2} \cdot \lambda_{\varepsilon 2} \cdot \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = 1,9886 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (38)$$

Činitel magnetické vodivosti rotorové drážky se určí podle obrázku a jemu přidělenému vzorci

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{h_{12}}{3 \cdot b_2} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_2^2}{8 \cdot S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{02}}{2 \cdot b_2} \right] \cdot k_d + \frac{h_{02}}{b_{02}} = 0,7704 \quad (39)$$

Činitel magnetické vodivosti $\lambda_{\varepsilon 2}$ – pro kruhy nakrátko, které přiléhají k čelům rotorového svazku určíme ze vztahu:

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_2 \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot a_{kn} + b_{kn}} = 0,0477 \quad (40)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu pro klecové vinutí rotoru

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = 1,699 \quad (41)$$

kde

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_2}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1,039 \quad (42)$$

$$X'_2 = X_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(N_1 \cdot K_{v1})^2}{Q_2} = 4,40 \quad (43)$$

3.4.5 Odpor příčné větve

Pro získání hodnot náhradního schématu příčné větve paralelně řazených R_{Fe} a X_μ se nejprve vypočítají jejich ekvivalenty R_{12} a X_{12} , které jsou sériově řazené. Poté R_{12} a X_{12} bude přepočítáno do prvků náhradního schématu.

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{Fes}}{m \cdot I_\mu^2} = 1,679 \Omega \quad (44)$$

ΔP_{Fes} jsou ztráty v železe statoru a I_μ je magnetizační proud

$$I_{\mu} = \frac{F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = 6,339 \text{ A} \quad (45)$$

$$X_{12} = \frac{U_{1N}}{I_{\mu}} - X_1 = 31,2 \Omega \quad (46)$$

Přepočít na R_{Fe} a X_{μ}

$$X_{\mu} = \frac{X_{12}^2 + R_{12}^2}{X_{12}} = 31,3 \Omega \quad (47)$$

$$R_{Fe} = \frac{X_{12} \cdot X_{\mu}}{X_{12}} = 581,62 \Omega \quad (48)$$

3.5 Výpočet ztrát

3.5.1 Ztráty v železe

Díky výkresové dokumentaci se vypočítá hmotnost jha statoru a rotoru a hmotnost zubů:

$$m_{j1} = \pi \cdot \left(\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_j}{2} \right)^2 \right) \cdot l_i \cdot k_{fe} \cdot \rho_{Fe} = 17,8 \text{ kg} \quad (49)$$

$$m_{j2} = \pi \cdot \left(\left(\frac{D_{j1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_h}{2} \right)^2 \right) \cdot l_i \cdot k_{fe} \cdot \rho_{Fe} = 15,48 \text{ kg} \quad (50)$$

D_j je vnitřní průměr jha statoru, ρ_{Fe} zastupuje hustotou oceli a k_{fe} udává činitel plnění železa.

$$m_{z1} = S_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_i \cdot k_{fe} \cdot \rho_{Fe} = 10,11 \text{ kg} \quad (51)$$

$$m_{z2} = S_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_i \cdot k_{fe} \cdot \rho_{Fe} = 10,11 \text{ kg} \quad (52)$$

S_{z1} udává obsah zubu statoru

Ztráty v železe statoru

$$\Delta P_{Fs} = \Delta p_{j1} \cdot k_{d1} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + \Delta p_{z1} \cdot k_{d1} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} = 202,4 \text{ W} \quad (53)$$

Ztráty v železe rotoru

$$\Delta P_{Fr} = k_{d2} \cdot \left(\frac{f_1 \cdot S}{50} \right)^{1,5} (\Delta p_{j2} \cdot B_{j2}^2 \cdot m_{j2} + \Delta p_{z2} \cdot B_{z2}^2 \cdot m_{z2}) = 1,35 \text{ W} \quad (54)$$

Ztráty v železe rotoru jsou velmi malé při pracovních otáčkách. Ovšem při rozběhu, kdy frekvence rotoru je blízká frekvenci sítě, nelze tyto ztráty zanedbat.

$$\Delta P_{Fes} = \Delta P_{Fs} \cdot \Delta P_{Fr} = 203,79 \text{ W} \quad (55)$$

Δp jsou měrné ztráty v železe, které jsou získané z katalogového listu materiálu plechu. V program Matlab jsou měrné ztráty odečítány za pomoci rovnice charakterizující křivku ztrát. k_{d1} činitel vlivu nerovností rozložení magnetického toku, uvažujeme hodnotu 1,4 a u $k_{d2}=1,6$. m_{j1} a m_{z1} udává hmotnost jha statoru a hmotnost zubů statoru.

3.5.2 Dodatečné ztráty v železe

Dodatečné ztráty uvažujeme při chodu na prázdko a dělí se na povrchové a pulsní. Povrchové ztráty vznikají pulsací indukce ve vzduchové mezeře a jsou počítány pro povrch zubů statoru a rotoru. Ztráty pulsní vznikají v zubech rotoru a statoru od pulsací indukce.

Před samotným určením povrchových a pulsních ztrát musejí být vypočítány amplitudy indukce nad zuby statoru a rotoru B_{01} , B_{02} a poté hustota povrchových ztrát hlav zubů rotoru a statoru $p_{\delta p1}$ a $p_{\delta p2}$.

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_\sigma = 0,298 \text{ T} \quad (56)$$

β_1 a β_2 jsou hodnoty odečteny z grafu závislosti $\beta_0=f(b_0/\delta)$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n}{10^4} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 = 23,219 \text{ Wm}^{-2} \quad (57)$$

Činitel opracování povrchu hlav zubů statoru je k_{01} , n jsou jmenovité otáčky rotoru.

Stejným způsobem jsou vypočteny hodnoty pro rotor.

$$B_2=0,142 \text{ T}$$

$$p_{\delta p2}=4,903 \text{ Wm}^{-2}$$

Povrchové ztráty ve statoru

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\sigma p1} \cdot (t_{d1} \cdot b_{01}) \cdot Q_1 \cdot l_i = 0,94 \text{ W} \quad (58)$$

Povrchové ztráty v rotoru

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\sigma p2} \cdot (t_{d2} \cdot b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_i = 0,41 \text{ W} \quad (59)$$

Pulsní ztráty

Ztráty v zubech statoru

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{p1} \right)^2 \cdot m_{z1} = 0,52 \text{ W} \quad (60)$$

Ztráty v zubech rotoru

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 12,78 \text{ W} \quad (61)$$

Hmotnost zubů rotoru a statoru jsou značeny $m_{z1(2)}$, amplitudě pulsující v zubu statoru je $B_{p1(2)}$.

Celkové dodatečné ztráty v železe

$$\Delta P_{FDo} = \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 17,48 \text{ W} \quad (62)$$

Ztráty v železe asynchronního motoru

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FDo} + \Delta P_{Fes} = 207,2 \text{ W} \quad (63)$$

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{vs} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 338,2 \text{ W} \quad (64)$$

Ztráty v kleci nakrátko

$$\Delta P_k = m_1 \cdot R'_2 \cdot I_2^2 = 128,2 \text{ W} \quad (65)$$

Mechanické ztráty v ložiskách jsou stanoveny na $\Delta P_{mech}=10 \text{ W}$.

Ztráty způsobené třením vzduchu jsou zanedbány díky nízkým otáčkám motoru.

Celkové ztráty

$$P_Z = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{vs} + \Delta P_k + \Delta P_{mech} = 696,8 \text{ W} \quad (66)$$

3.6 Výpočty charakteristik motoru

Vzorce jsou převzaty ze zdroje [3].

Záběrný moment vzniká ve chvíli připojení motoru na síť, když motor má $n=0$ a $s=1$.
Pro záběrný moment je vztah

$$M_z = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p \cdot R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]} = 86,1 \text{ Nm} \quad (67)$$

Jmenovitý moment

$$M = \frac{P_1 - P_z}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = 37,36 \text{ Nm} \quad (68)$$

Maximální skluz

$$s_{max} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = 0,35 \quad (69)$$

U záběrného proudu se neuvažuje příčná větev náhradního schématu a může se psát:

$$I_z = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = 22,45 \text{ A} \quad (70)$$

Účinnost motoru

$$\eta = 1 - \frac{P_z}{P_p} = 0,717 \quad (71)$$

Jmenovitý proud vypočítáme z celkové impedance Z_c a napájecího napětí

$$I_1 = \frac{U_N}{Z_c} = 7,46 \text{ A} \quad (72)$$

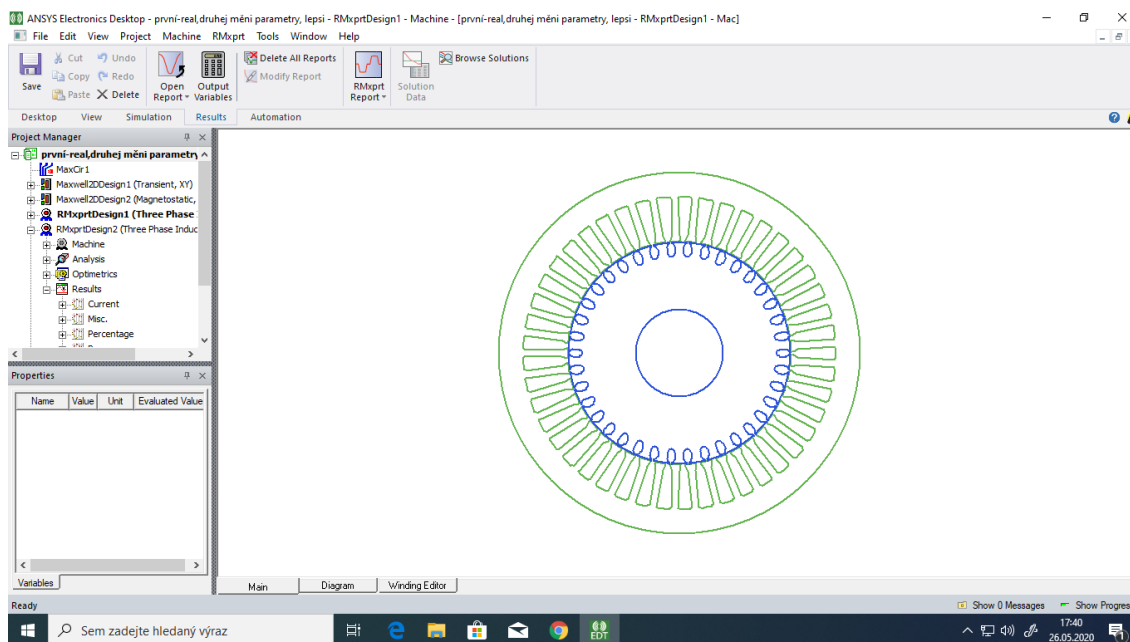
Účinník při jmenovitých otáčkách

$$\cos\varphi = \frac{I_{1c}}{I_1} = 0,49 \quad (73)$$

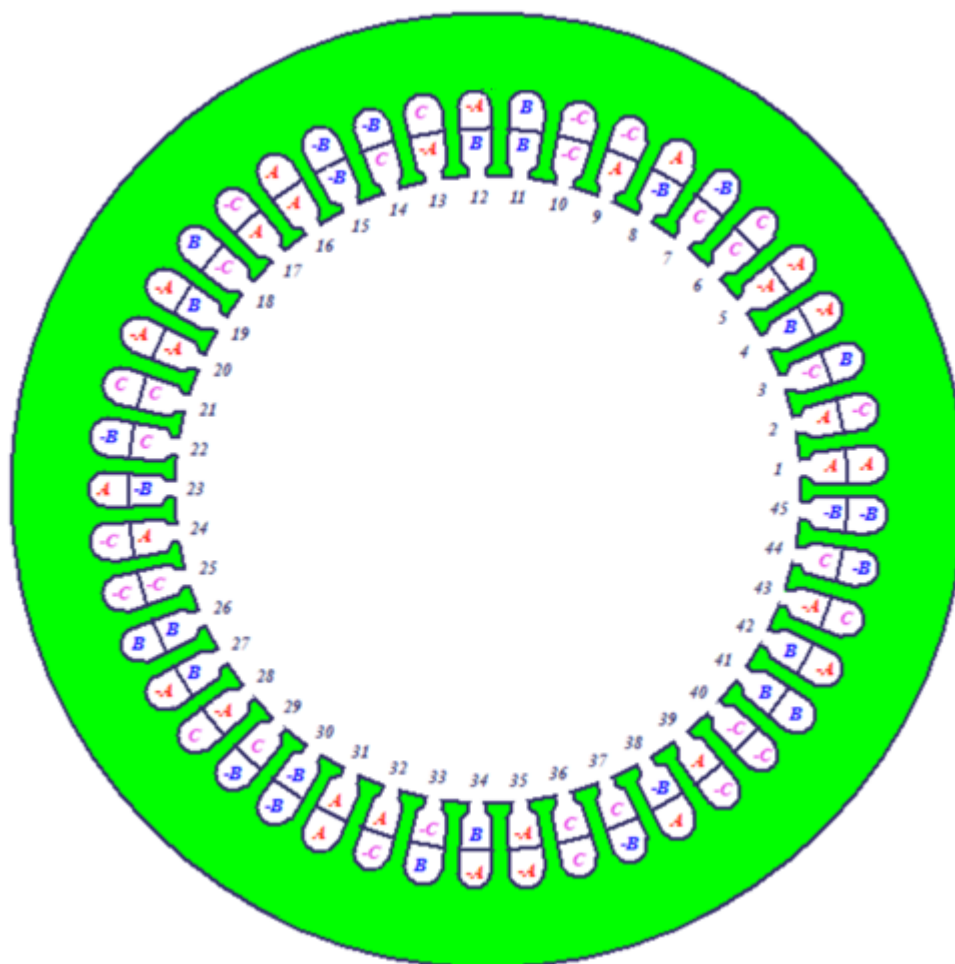
4. PROGRAM RMXprt A POROVNÁNÍ HODNOT

4.1 RMXprt

RMxprt je program pro rychlý návrh a optimalizaci točivých elektrických strojů, který pracuje ve 2D režimu. Ve svých výpočtech program využívá analytických vztahů a náhradních schémat elektrických strojů. Pro rychlý návrh jsou v programu již předdefinované šablony různých typů motorů s výběrem několika druhů drážek a vinutí. Program umožňuje rychlý výpočet velkého množství návrhů se změnami parametrů, které lze měnit pomocí nástroje Optimetrics. Výstupem jsou grafy základních charakteristik (moment, účinnost, výkon) motoru. [9]



Obr. 5 Prostředí RMXprt



Obr. 6 Uložení satorového vinutí

4.2 Porovnání výsledků

Z technické dokumentace byly zadány hodnoty do programu RMxprt a proveden výpočet hodnot. Z technické dokumentace bylo k dispozici schéma vinutí, parametry cívky se dvěma průřezy vinutého drátu, technický výkres řezu satorového a rotorového plechu a půdorys rotorového svazku motoru.

Vypočítané hodnoty, pomocí programu RMxprt a pomocí skriptu analytického výpočtu v Matlabu, jsou vzájemně vyhodnoceny v následujících tabulkách a grafech.

Tab. 2 Tabulka magnetické indukce

Magnetická indukce [T]	Výpočet	RMxpřt	Rozdíl [%]
V zubech statoru – Bz1	1,48	1,50	-1,3
V zubech rotoru – Bz2	1,45	1,46	-1,0
Ve jhu statoru – Bj1	0,55	0,53	3,2
Ve jhu rotoru – Bj2	0,26	0,25	3,5
Ve vzduchové mezeře – B _δ	0,69	0,67	3,4

Magnetická indukce vypočítaných hodnot a hodnot z RMxpřtu jsou skoro shodné, liší se v jednotkách procent.

Tab. 3 Tabulka ztrát

Ztráty [W]	Výpočet	RMxpřt	Rozdíl [%]
Ztráty ve vinutí – ΔP _{vs}	338,22	396,12	-14,6
Ztráty v rotoru – ΔP _k	128,18	111,34	15,1
Ztráty v železe – ΔP _{Fe}	203,79	182,20	11,8
Dodatečné ztráty – ΔP _{FDo}	16,57	17,38	-4,7
Mechanické ztráty – ΔP _{mech}	10,00	10,00	0,0
Celkové ztráty – P _Z	696,76	717,04	-2,8

Mechanické ztráty mají nulový rozdíl, protože tato hodnota byla zadána a nepočítala se. Největší rozdíl je ve ztrátách ve vinutí.

Tab. 4 Tabulka hodnot náhradního schématu

Hodnoty náhradního schématu [Ω]	Výpočet	RMxpřt	Rozdíl [%]
R ₁	2,04	1,98	2,7
X ₁	5,08	5,02	1,2
R' ₂	3,38	3,36	0,8
X' ₂	4,40	4,46	-1,4
R _{fe}	581,62	576,00	1,0
X _μ	31,30	26,57	17,8

Rozdíl u magnetizační reaktance, je způsoben magnetickým napětím vzduchové mezery.

Tab. 5 Tabulka hodnot motoru

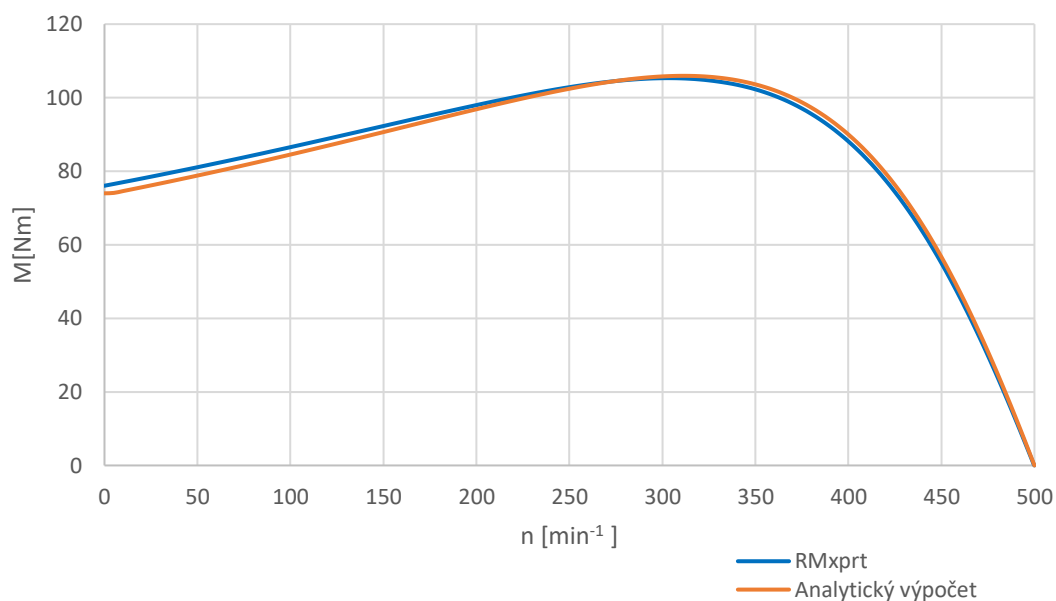
Hodnoty motoru	Výpočet	RMxprt	Rozdíl [%]
S_{\max} [%]	0,35	0,35	0,0
M_{\max} [Nm]	105,94	105,30	0,6
M_z [Nm]	86,12	75,70	13,8
M_n [Nm]	35,68	35,31	6,1
I_z [A]	22,45	23,27	-3,5
I_n [A]	7,44	8,16	-8,8
$\cos\phi$ [-]	0,49	0,43	14,9
η [%]	72,57	70,79	2,5
I_{mag} [A]	6,34	7,04	-9,9

Největší rozdíl je u účinníku a u záběrného momentu. Rozdílný účinník vyplývá z rozdílných hodnot náhradního schématu.

Tab. 6 Tabulka magnetického napětí

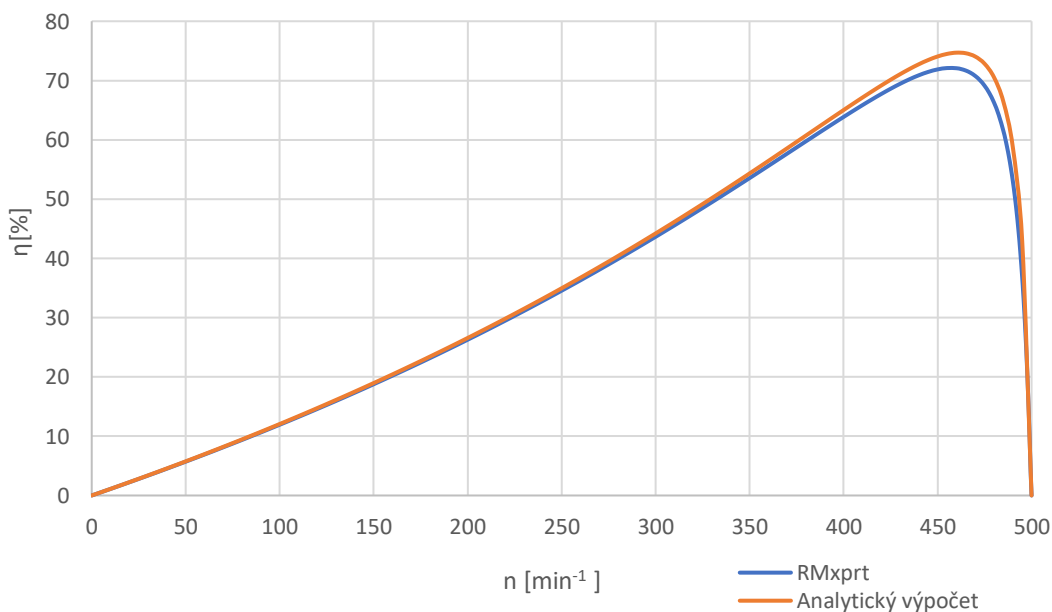
Magnetické napětí	Výpočet	RMxprt	Rozdíl [%]
U_{j1} [A]	8,89	6,28	41,6
U_{j2} [A]	2,92	2,04	43,1
U_{z1} [A]	37,02	54,34	-31,9
U_{z2} [A]	10,04	11,22	-10,5
U_{j1} [A]	695,91	744,84	-6,6
F_m [A]	754,78	818,72	-7,8

Největší rozdíl je ve vzduchové mezeře, tato chyba negativně ovlivňuje další výpočty-magnetizační proud, následně magnetizační reaktanci, a tím výsledné výpočty.



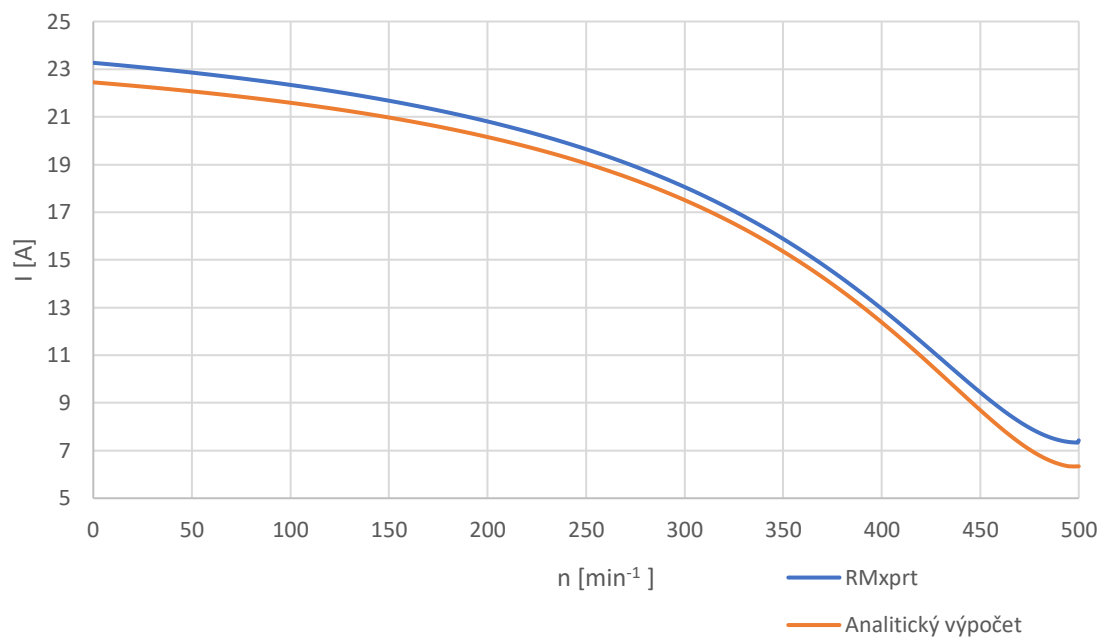
Obr. 7 Momentové charakteristiky motoru

Momentové charakteristiky jsou takřka totožné a prolínají se, rozdíly jsou zde velmi malé, a to při rozběhu motoru. Rozdílné hodnoty záběrného momentu analytického výpočtu z Tab.5 a grafu jsou způsobeny rozdílným výpočtem. V tabulce je hodnota ze vzorce č. 66, graf je vytvořen z vypočítaných hodnot náhradního schématu v závislosti na změně otáčkách motoru.



Obr. 8 Závislost účinnosti na otáčkách

Účinnosti motoru se nejvíce rozcházejí kolem jmenovitého bodu otáček.



Obr. 9 Závislost proudu na otáčkách

Vypočítaný proud pomocí analytického výpočtu je v celém rozsahu otáček nižší než proud z RMxprt.

5. ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI MOTORU

Zvyšování účinnosti motoru lze provést v zásadě dvěma způsoby:

1. Zvýšení účinnosti vytvořením nového stroje. Výhodou je vytvoření stroje s možnou velmi vysokou účinností. Problém nastává pro menší podniky z důvodu velmi vysokých nákladů na vývoj a vytvoření nové nebo předělání stávající výrobní linky, popřípadě nových technologických postupů.
2. Účinnost lze zvýšit i s vynaložením nižších financí. Tato metoda je založena na zachování většiny parametrů stroje. Za pomoci změny délky svazku stroje a změnou závitů ve statoru lze docílit částečného zvýšení účinnosti. Dalšími možnostmi je např.: použití kvalitnějších plechů, zvětšením průřezu vodiče (pokud je možnost zvýšit činitel plnění) nebo změnou ložisek. [6] [7]

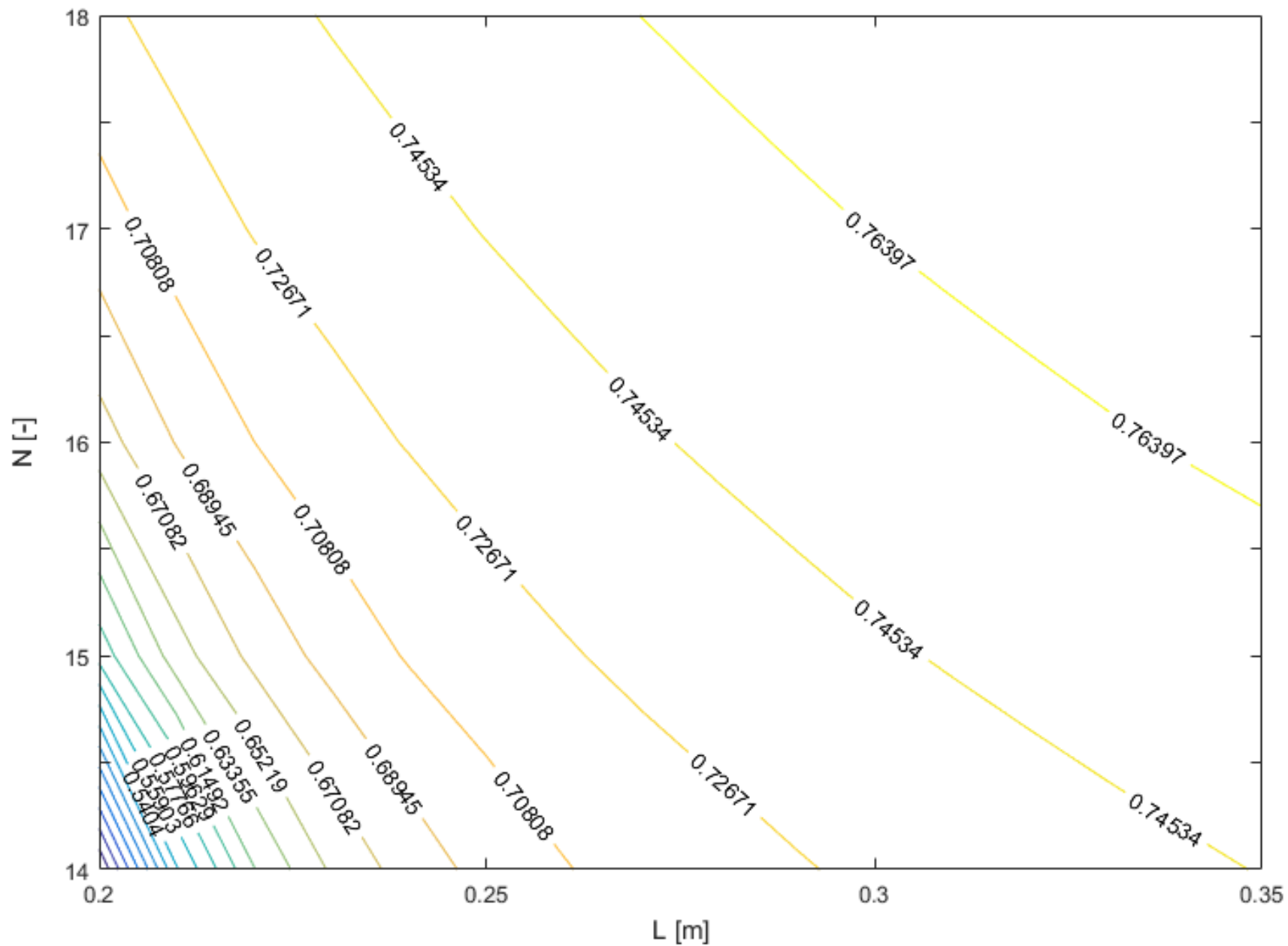
V programu Matlab byl vytvořen program na výpočet náhradního schématu motoru a následně doupřaven pro výpočet matic v závislosti počtu závitů na délce. Matice jsou vypočítány pro moment a účinnost při jmenovitých otáčkách. Z matic jsou vytvořeny grafy, díky kterým si můžeme zvolit požadovaný moment a účinnost stroje.

```
367 -           Mmech=((Ipp1*230*cos*m)-Pcc)/(2*pi*(n/60));
368 -           Ucinost=1-(Pcc/(Ipp1*230*cos*m));
369
370
371
372
373 -           ucinnost(j,1)= Ucinost;%L
374
375 -           Moment(j,1)= Mmech;%L
376 -           l=l+1;
377 -       end
378 -       j=j+1;
379 -       l=1;%L=1
380 -   end
381
382
383   %vykresleni
384 -   Moment = Moment;
385 -   %subplot(2,1,2);
386 -   contour(li_zadani,Vd_zadani,Moment,30,'ShowText','on')
387 -   hold on;
388 -   xlabel('L [mm]')
389 -   ylabel('N [-]')
390 -   %title('Mapa momentu [Nm]')
391 -   hold off;
392
```

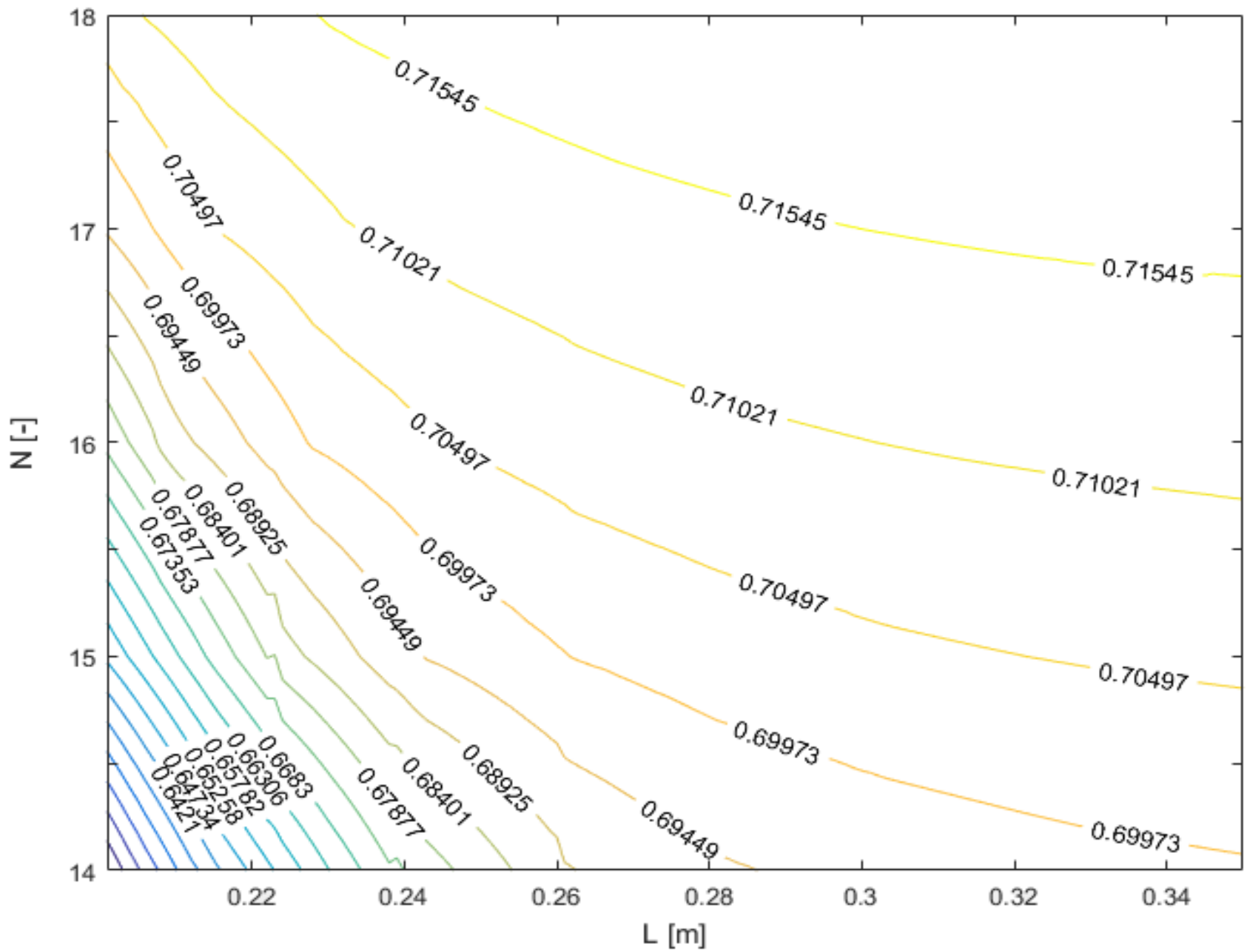
Obr. 10 Část programu v Matlabu vykreslující matici momentů

V RMXprt pomocí funkce Optimetrics byly vytvořeny intervaly pro délku svazku motoru a počet závitů. RMXprt přepočítal pro každý milimetr v intervalu od 200 do 350 mm délky svazku motoru stanovené počty závitů – od 14 do 18 závitů. Tyto hodnoty pro jmenovité otáčky byly exportovány do vytvořeného programu v Matlabu, ve kterém vznikly mapy momentů a účinností v závislosti na délce a počtu závitů.

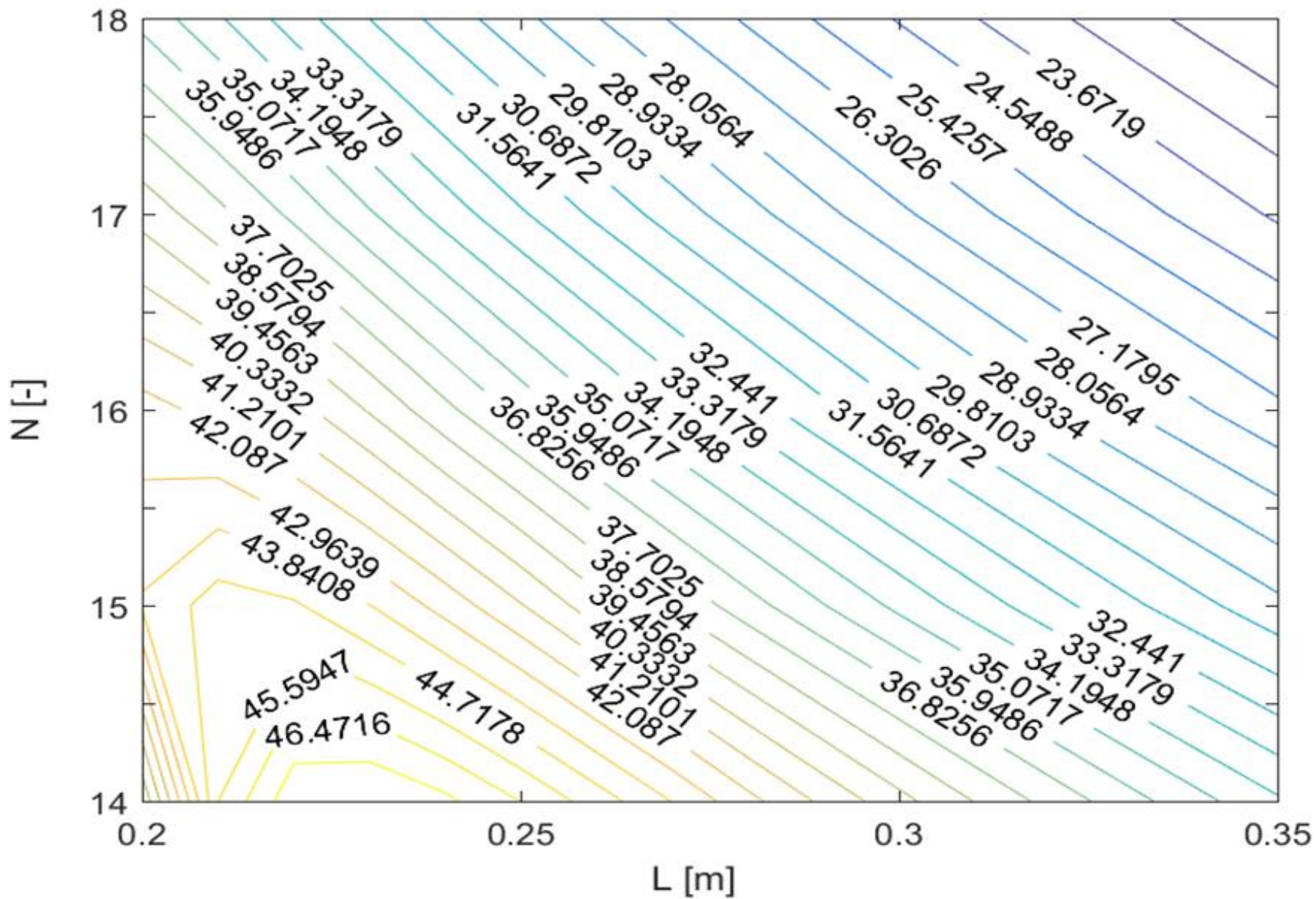
Pouhé prodloužení stroje vytváří vyšší účinnost za cenu velkého poklesu momentu, a pouhé snížení počtu závitů moment zvýší a účinnost sníží. A proto jsou vytvořeny mapy momentů a účinností, ze kterých lze vybrat nejvhodnější kombinaci.



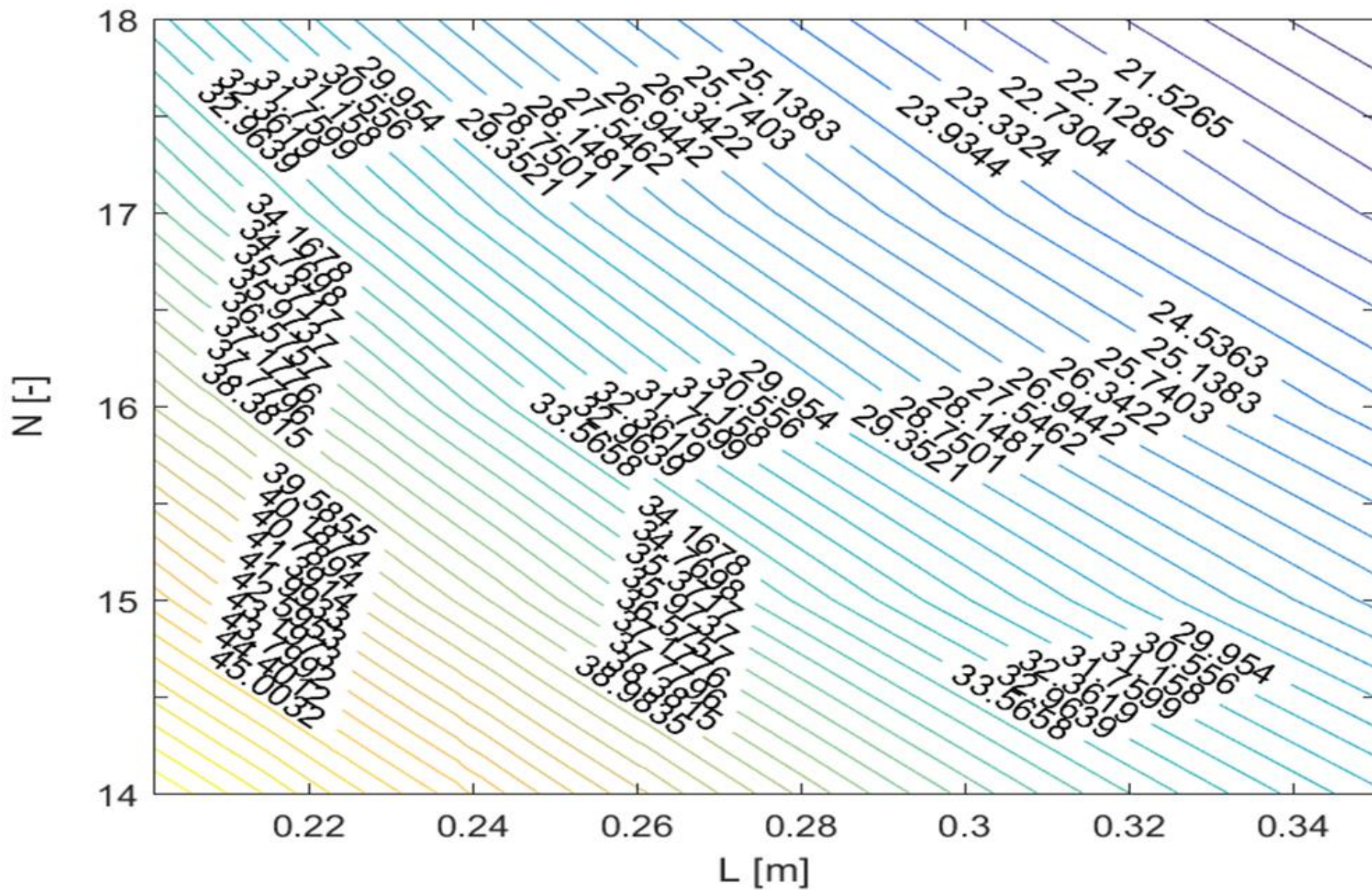
Obr. 11 Mapa účinností vytvořená analytickým výpočtem



Obr. 12 Mapa účinností vytvořená pomocí RMxprt



Obr. 13 Mapa momentů pomocí RMXprt



Obr. 14 Mapa momentů vytvořená analytickým výpočtem

Při porovnání účinností z Obr.12 a 13 je vidět, že hodnoty se začínají výrazně rozcházet s délkou svazku motoru. Analytický výpočet se výrazně liší v příčné větvi náhradního schématu. Tento rozdíl je velmi dobře patrný v Tab.7. Největší měrou podílející se na takové nepřesnosti je magnetické napětí vzduchové mezery (Tab.6), které ovlivní magnetizační proud (Tab.5) a následně magnetizační reaktanci a ztráty v železe. Rozdíl u ztrát v železe R_{fe} je dán k_{dl} -činitelem vlivu nerovnosti magnetického toku, který je doporučen podle literatury [2].

Z mapy účinnosti na Obr.9 je patrné, že při snižování délky a zvyšování počtu závitů rostou křivky takřka exponenciálně. U vyššího počtu závitů a narůstající délky se křivky více narovnávají. Pokud by bylo možné zvýšit činitel plnění drážek a tím přidat jeden či dva závity při daném průřezu vodiče, bylo by možné získat vyšší účinnost při menším prodloužení svazku motoru. Jakékoliv prodloužení motoru vytváří vyšší náklady na materiál celého stroje.

Mapy momentů jsou si velmi podobné ve svých křivkách ovšem RM_{xprt} má hodnoty momentů vyšší, než jaké jsou hodnoty u analytického výpočtu. U obou map platí, že při snižování počtu závitů a zachování délky motoru, moment roste, a naopak při zachování počtu závitů a zvyšování délky svazku motoru moment takřka lineárně klesá.

Tab. 7 Porovnání hodnot při délce svazku motoru 350 mm

Veličiny	Analytický výpočet	RMxpřt	Rozdíl [%]
R_1 [Ω]	3,11	3,06	1,8
X_1 [Ω]	8,85	8,63	2,6
R'_2 [Ω]	5,84	5,83	0,2
X'_2 [Ω]	7,63	7,90	-3,4
R_{fe} [Ω]	2756,80	1000,00	175,7
X_μ [Ω]	56,04	47,50	18,0
S_{max} [%]	0,35	0,35	0,0
M_{max} [Nm]	76,18	61,46	23,9
M_z [Nm]	50,36	43,01	17,1
M_n [Nm]	21,04	20,66	1,8
I_z [A]	13,01	13,31	-2,3
I_n [A]	4,11	4,64	-11,4
$\cos\phi$ [-]	0,46	0,43	5,2
η [%]	78,26	72,27	8,3
I_{mag} [A]	3,55	3,94	-9,8
B_{z1} [T]	0,84	0,86	-2,2
B_{z2} [T]	0,83	0,84	-2,0
B_{j1} [T]	0,31	0,30	2,8
B_{j2} [T]	0,15	0,15	3,2
B [T]	0,39	0,39	1,8
ΔP_{vs}	157,74	197,68	-20,2
ΔP_k	67,52	65,55	3,0
ΔP_{Fe}	42,94	106,83	-59,8
ΔP_{FDo}	9,47	10,70	-11,5
ΔP_{mech}	10,00	10,00	0,0
P_z	287,66	390,76	-26,4

Délka svazku motoru v maximálním rozsahu 350 mm je ekonomicky již velmi nevýhodná a z grafů také vyplývá, že nijak zásadně nezvyšuje účinnost. Tento maximální rozsah byl vytvořen pro kontrolu a porovnání výpočtů z RMxpřtu a analytického výpočtu, při kterém se více projeví chyby v analytickém výpočtu viz. Tab. 7. Chyby se výrazně projeví u příčné větve. Největší problém je v odprou R_{fe} , kde se hodnoty zcela rozcházejí a nepodařilo se tuto hodnotu zlepšit.

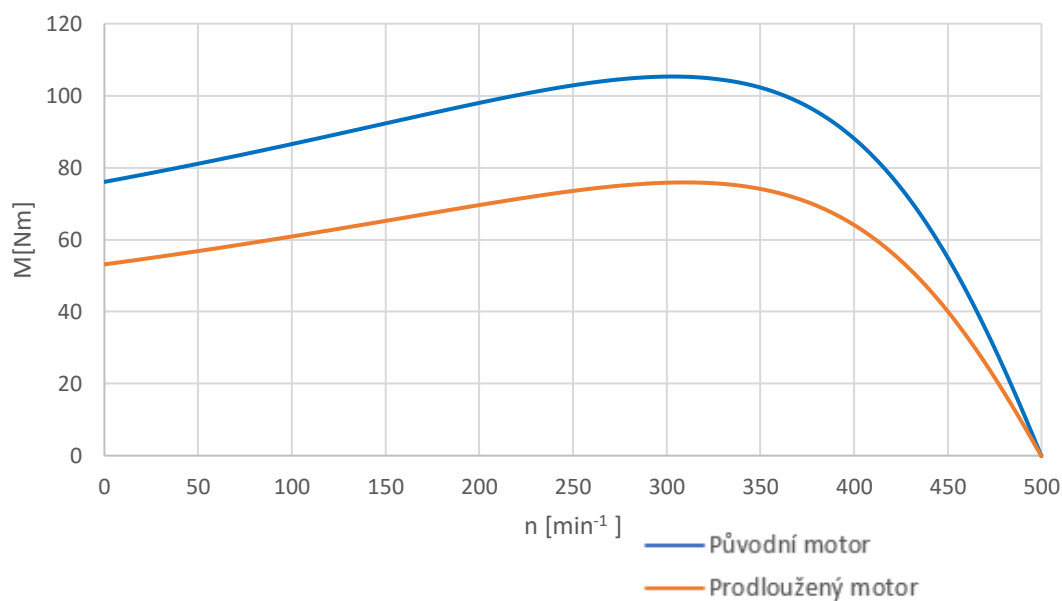
5.1 Porovnání prodlouženého motoru s původním motorem

Kostra motoru umožňuje prodloužit svazek motoru o 5 mm. Toto prodloužení podle mapy účinností RMxprt zvedne účinnost pouze o jednotky desetín procent a sníží moment o necelý 1 Nm. Jedná se o zcela zanedbatelné zvýšení účinnosti.

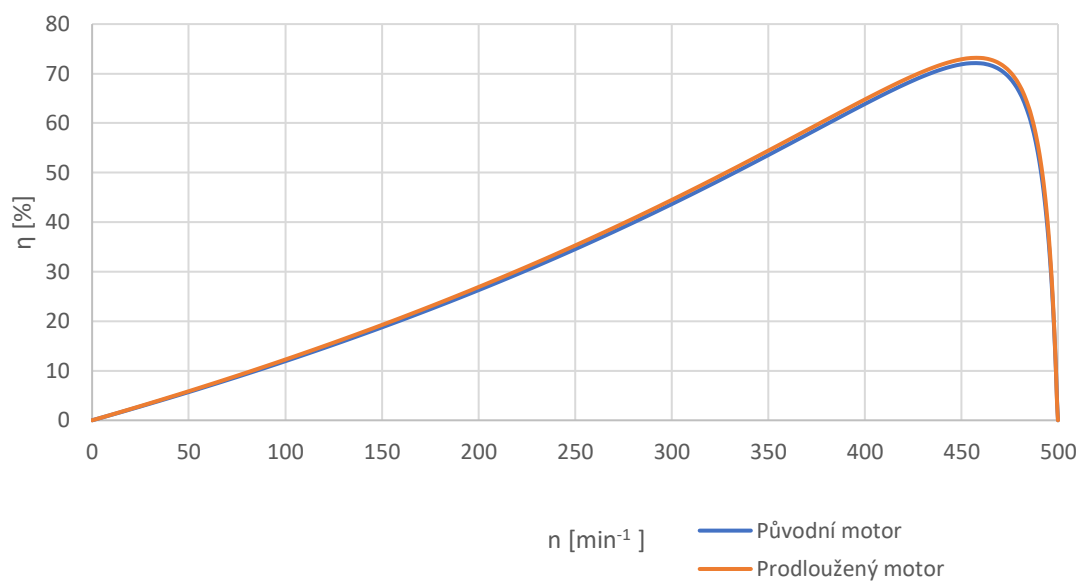
Při prodloužení motoru na 280 mm a snížení počtu závitů na 17 se zvedne účinnost o necelé procento, a zároveň poklesne moment na 28,5 Nm.

Tab. 8 Porovnání prodlouženého a původního motoru (RMxprt)

Motor	Prodloužený	Původní
Délka [mm]	280	200
Počet závitů [-]	17	18
proud [A]	5,8	8,2
Ztráty v mědi [W]	255	396
Ztráty v železe [W]	133	182
Celková ztráty [W]	492	716
Moment [Nm]	25,7	35,2
Účinník [-]	0,43	0,43
Účinnost [%]	71,46	70,78
Výkon [W]	1265	1734



Obr. 15 Porovnání účinností původního a prodlouženého motoru (280 mm, 17 závitů)



Obr. 16 Porovnání momentů původního a prodlouženého motoru (280 mm, 17 závitů)

Tento typ motoru kvůli své konstrukci – vysokému počtu pólů a malému počtu závitů nemá prostor k výraznějšímu zvýšení účinnosti.

ZÁVĚR

První část bakalářské práce se zabývá analytickým výpočtem asynchronního motoru. Z technické dokumentace se zjistily základní parametry stroje. Tyto parametry posloužily k vytvoření programu, který počítá náhradní schéma motoru. K porovnání správnosti výpočtů byl vytvořen totožný motor v programu RMxpřt.

Porovnání hodnot je uvedeno v tabulkách a grafech v kapitole 4. V Tab.4 jsou rozdíly u prvků náhradního schématu v jednotkách procent, až na magnetizační indukčnost, kde je rozdíl 18 %. Tento rozdíl má původ v rozdílném magnetickém napětí vzduchové mezery a způsobuje velký rozdíl u magnetizačního proudu. Magnetizační proud negativně ovlivňuje příčnou větev náhradního schématu, a tím i výsledné charakteristiky motoru.

Charakteristiky porovnávané analytický výpočet s RMxpřtem jsou vyneseny v Obr.7-9, v grafu účinností jsou vidět největší rozdíly okolo jmenovitých otáček. U závislosti proudu na otáčkách je analytický výpočet proudu v celém průběhu nižší než proud vypočítaný RMxpřtem. Momentové charakteristiky jsou skoro totožné.

Druhá část bakalářské práce je zaměřena na zvýšení účinnosti motoru za pomoci prodloužení délky svazku stroje a změnou počtu závitů ve statorovém vinutí. Prodloužení svazku motoru snižuje indukci a snížení počtu závitů působí ve prospěch opětovného navýšení indukce. Z tohoto důvodu jsou vytvořeny mapy účinností a momentů, ve kterých lze vybrat vhodnou kombinaci momentu a požadované účinnosti.

Při porovnání map účinností si lze všimnout vyšších hodnot u analytického výpočtu oproti hodnotám z RMxpřtu. Tyto rozdíly se s prodlužováním motoru zvyšují. Z Tab.8, kde jsou porovnány motory při maximálním prodloužení vyplývá, že velké zastoupení v rozdílech náhradního schématu má příčná větev a rozptylová reaktance X_2' .

U map momentů jsou rozdíly nižší a takřka konstantní, RMxpřt má hodnoty zhruba o 2,5 Nm vyšší oproti analytické mapě. Křivky momentů u obou map si jsou velice podobné.

Z map momentů a účinností vyplývá, že u tohoto typu motoru s vysokým počtem pólů lze zvýšit účinnost jen o jednotky procent, a to za cenu velkého snížení momentu a velkého zvýšení nákladů, jak při tvorbě nové kostry, tak při vyšší spotřebě materiálu. Toto řešení se jeví jako ekonomicky neefektivní.

Literatura

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*: Celost. vysokošk. učebnice. Řada elektrotechnické literatury. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958.
- [2] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. Skriptum pro předmět Elektrické stroje
- [4] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje: 1. Elektrické stroje*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [5] *Typical data for SURA M800-50A* [online]. 2008 [cit.2020-01-06].
Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m800-50a.pdf>
- [6] NOVOTNÝ, Jiří. *Analýza možností zvýšení účinnosti asynchronních motorů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 85 l.: il.
- [7] ANDRIOLLO, Mauro, DE BORTOLI, Marzia a TORTELLA, Andrea. *Procedures for the additional losses assessment and analysis in high-efficiency induction machines*. In: 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP) [online]. IEEE, 2011, s. 389-394 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1109/ICCEP.2011.6036342. ISBN 9781424489299.
- [8] RUSNOK, Stanislav a SOBOTA, Pavel. *Cvičení z Elektrických strojů*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3288-3.
- [9] BOŘIL, Michal. *Zvýšení účinnosti jednofázového asynchronního motoru*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018, 92 listů: ilustrace + 1 CD-ROM.
- [10] ŽALCOVSKÝ, Antonín. *Vliv délky magnetického obvodu na účinnost malého asynchronního motoru*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017, 66 listů: grafy, schémata + 1 CD-ROM.