



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

OPTIMALIZACE TVARU DRÁŽEK ASYNCHRONNÍHO MOTORU

OPTIMIZATION OF A SMALL INDUCTION MACHINE'S SLOTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Šišák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. David Šišák

ID: 154922

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace tvaru drážek asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Podle výkresové dokumentace vytvořte model konkrétního asynchronního motoru v programu pro výpočty metodou konečných prvků.
2. Výsledky simulací porovnejte s měřením skutečného stroje.
3. Na vytvořeném modelu proveďte optimalizaci tvaru drážek.
4. Výsledky porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49-0004-5.
- [2] HAUPT, R. L. a HAUPT, S. E. Practical genetic algorithms. Wiley-Interscience, 1998. ISBN 0-471-45565-2.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

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

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací tvaru statorových a rotorových drážek asynchronního motoru se zaměřením na zvýšení jeho účinnosti. V teoretické části seznamuje s principy jednotlivých optimalizačních algoritmů. Další část je věnována návrhu tvaru drážek a jeho vlivu na parametry stroje. Na modelech motoru byla provedena optimalizace tvaru drážek pomocí genetického algoritmu. Nejprve s využitím analytického výpočtu v programu RMxpert, poté pomocí metody konečných prvků na dvou různých modelech, jejichž rozdílnost má simulovat vliv technologie výroby na účinnost motoru. Dále bylo vykonáno laboratorní měření na skutečném stroji. Výsledky měření, výpočtů a optimalizací jsou v práci porovnány.

Abstract

This master thesis deals with optimization of the shape of the stator and rotor slots of induction motor with focusing on increasing efficiency. The theoretical part introduces the principles of optimization algorithms. Another part is devoted to design the shape of slots and its influence on the shape of slots on machine. On the models of motor was conducted the optimized shape of slots by using a genetic algorithm. Firstly, it was performed by using the analytical calculation in the RMxpert program, then by using the finite element method on two different models, whose difference simulates the influence of the production technology on the efficiency of the motor. Laboratory measurement was made on a real machine as well. The results of the measurement, calculations and optimizations are compared in the work.

Klíčová slova

Asynchronní motor; účinnost; optimalizace tvaru drážek; genetický algoritmus; optimalizační metody; RMxpřt; měření ztrát; metoda konečných prvků

Keywords

Induction motor; efficient; optimization of machine slots; genetic algorithm; optimization methods; RMxpřt; measure losses; finite elements method

Bibliografická citace

ŠIŠÁK, D. *Optimalizace tvaru drážek asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Mach, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optimalizace tvaru drážek asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

ÚVOD	14
1 ASYNCHRONNÍ STROJE.....	15
1.1 PRINCIP TŘÍFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	16
1.2 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	17
1.3 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA ASYNCHRONNÍHO STROJE	18
1.4 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU	19
1.4.1 ZTRÁTY V ŽELEZE.....	20
1.4.2 ZTRÁTY VE VINUTÍ	21
1.5 TVARY DRÁŽEK A NÁVRH ROZMĚRŮ.....	21
1.5.1 STATOROVÉ DRÁŽKY.....	21
1.5.2 ROTOROVÉ DRÁŽKY	24
1.5.3 ČINITEL PLNĚNÍ DRÁŽKY	26
2 OPTIMALIZAČNÍ METODY	27
2.1 ROZDĚLENÍ OPTIMALIZAČNÍCH METOD	28
2.2 EVOLUČNÍ ALGORITMY	29
2.2.1 GENETICKÝ ALGORITMUS.....	31
2.2.2 SIMULOVANÉ ŽÍHÁNÍ	31
2.2.3 HOROLEZECKÝ ALGORITMUS.....	31
2.2.4 ROJOVÁ INTELIGENCE	32
2.2.5 SOMA – SAMO ORGANIZUJÍCÍ SE MIGRAČNÍ ALGORITMUS.....	33
3 SEZNÁMENÍ S POUŽITÝMI PROGRAMY	34
3.1 PROGRAM MAXWELL.....	34
3.1.1 RMXprt	34
3.2 MATLAB	35
4 OPTIMALIZOVANÝ STROJ.....	36
4.1 STATOROVÁ A ROTOROVÁ DRÁŽKA.....	37
5 TVORBA MODELŮ PRO SIMULACI MKP	38
5.1 MODEL 1	38
5.2 MODEL 2	38
5.2.1 VLIV STŘIHU.....	39
6 POSTUP OPTIMALIZACE TVARU DRÁŽEK	41
6.1 OPTIMALIZACE S VYUŽITÍM PROGRAMU RMXprt	43
6.1.1 OPTIMALIZACE STATOROVÉ DRÁŽKY	43
6.1.2 OPTIMALIZACE ROTOROVÉ DRÁŽKY.....	44
6.2 OPTIMALIZACE S VYUŽITÍM MKP	45

7 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE TVARU DRÁŽEK.....	48
7.1 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE ANALYTICKÝM VÝPOČTEM V RMXPRT	48
7.1.1 POROVNÁNÍ STATOROVÉ DRÁŽKY	49
7.1.2 POROVNÁNÍ ROTOROVÉ DRÁŽKY	49
7.1.3 POROVNÁNÍ OPTIMALIZACE OBOU DRÁŽEK.....	50
7.2 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE VÝPOČTEM MKP	51
7.2.1 VÝSLEDKY PRO MODEL 1	51
7.2.2 VÝSLEDKY PRO MODEL 2	52
8 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	56
8.1 ODPOR VINUTÍ	56
8.1.1 STANOVENÍ TEPLoty VINUTÍ STATORU.....	56
8.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PŘI JMENOVITÝCH PARAMETRECH	57
8.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZE ZKOUŠKY NAPRÁZDNO	57
8.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY	59
8.5 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ S VÝPOČTY PŮVODNÍCH MODELŮ	61
9 ZÁVĚR.....	64
LITERATURA	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1: Popis částí asynchronního motoru [17].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1.2: Zapojení svorkovnice 3f asynchronního motoru do Y (vlevo) a D (vpravo).....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1.3: Princip vzniku síly v asynchronním motoru [17].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1.4: Náhradní zapojení jedné fáze asynchronního stroje [15].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1.5: Momentová charakteristika asynchronního stroje [17].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1.6: Schéma přeměny výkonu asynchronního stroje [17].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1.7: Otevřená drážka typu N [18].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1.8: Drážky typu L (vlevo) a S (vpravo) určené pro vsypávané vinutí [18].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 1.9: Drážky dvojité a vírové klece [18].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 1.10: Rotorové drážky typu V, polozavřené a zavřené [18].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2.1: Rastriginova funkce [5]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2.2: Rozdělení optimalizačních algoritmů [7]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2.3: Struktura vícepopulačního evolučního algoritmu [3].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2.4: Princip fungování horolezeckého algoritmu [7].....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 2.5: Princip SOMA- strategie AllToOne [14].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3.1: Ukázka prostředí RMxpert – zadávání rozměru drážky</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.1: Detail statorové drážky</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4.2: Detail rotorové drážky.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.1: Model 1.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5.2: Model 2.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5.3: Porovnání magnetizační křivky uvedené v katalogu [21] s odhadnutou křivkou poškozenou vlivem stříhu [31], [2].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5.4: Porovnání křivky měrných ztrát uvedené v katalogu [21] s odhadnutou křivkou poškozenou vlivem stříhu [31], [2].....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.1: Diagram fungování optimalizace.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6.2: Definovaný tvar drážky v RMxpert</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6.3: Rozdělení statorové drážky na segmenty</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6.4: Rozdělení rotorové drážky na segmenty.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6.5: a) průběžné výsledky rotorové drážky, b) zjednodušení na menší počet segmentů.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6.6: Detail rozložení prvků sítě MKP.....</i>	<i>46</i>

<i>Obr. 6.7: Rozložení magnetické indukce v motoru při neuvažování vlivu ztrát v železe na magnetické pole (ustálený stav, jmenovité zatížení)</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6.8: Rozložení magnetické indukce v motoru při uvažování vlivu ztrát v železe na magnetické pole (ustálený stav, jmenovité zatížení)</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7.1: Porovnání původní a optimalizované statorové drážky, využití RMxpřt.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7.2: Porovnání původní a optimalizované rotorové drážky, využití RMxpřt</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7.3: Porovnání původní a optimalizované drážky statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) pro model 1, využití MKP</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7.4: Porovnání původní a optimalizované drážky statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) pro model 2, využití MKP</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7.5: Porovnání optimalizovaných drážek statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) modelu 1 a modelu 2</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 7.6: Porovnání optimalizovaných drážek statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) pro RMxpřt a modelu 2</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 7.7: Rozložení magnetické indukce v původním modelu 2.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 7.8: Rozložení magnetické indukce v optimalizovaném modelu 2</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 8.1: Závislost konstantních ztrát ΔP_k na druhé mocnině napětí naprázdno U_0 – určení mechanických ztrát.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 8.2: Závislost ztrát v železe ΔP_{Fe} na napětí naprázdno U_0.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 8.3: Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 8.4: Závislost ztrát v železe ΔP_{Fe}, mechanických ztrát ΔP_{mech}, ztrát ve vinutí statoru a rotoru ΔP_{j1}, ΔP_{j2} a ztrát zbytkových ΔP_{Lr} na výkonu motoru P_2.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 8.5: Závislost účinnosti na mechanickém výkonu P_2.....</i>	<i>61</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4.1: Štítkové parametry motoru</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4.2: Materiálové vlastnosti nastavené při analýze v RMxpert.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 7.1: Výsledky optimalizace v RMxpert.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 7.2: Výsledky optimalizace modelu 1 MKP</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 7.3: Výsledky optimalizace modelu 2 MKP</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 8.1: Odpor vinutí za studena a za provozního stavu</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 8.2: Naměřené hodnoty ve jmenovitém bodě motoru</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8.3: Vypočtené hodnoty jednotlivých ztrát ve jmenovitém bodě.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8.4: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8.5: Měření zatěžovací charakteristiky</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 8.6: Vypočet jednotlivých ztrát pro různé zatěžné momenty</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 8.7: Porovnání výsledků ztrát získaných měřením a výpočty.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 8.8: Porovnání dostupných výsledků měření a výpočtů</i>	<i>62</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název	Jednotka
B_j	Magnetická indukce ve jhu	T
B_z	Magnetická indukce v zubu	T
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T
Φ	Magnetický tok	Wb
D	Vnitřní průměr statoru	m
D_2	Vnější průměr rotoru	m
D_e	Vnější průměr statoru	m
M_n	Jmenovitý moment motoru	Nm
M_{max}	Moment zvratu (maximální moment)	Nm
M_z	Záběrný moment	Nm
I_1	Statorový proud	A
I_0	Statorový proud naprázdno	A
I_μ	Magnetizační proud	A
f_1	Frekvence sítě	Hz
f_2	Frekvence proudu v rotoru	Hz
ω	Úhlová rychlost	rad/s
$\cos\varphi$	Účinitk	-
η	Účinnost	%
P_1	Příkon	W
P_2	Mechanický výkon	W
P_{10}	Příkon naprázdno	W
P_δ	Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru	W
P_{mech}	Celkový mechanický výkon	W
ΔP_{j1}	Ztráty ve vinutí statoru	W
ΔP_{j2}	Ztráty ve vinutí rotoru	W
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	W
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty	W
ΔP_d	Dodatečné ztráty	W

ΔP_{Lr}	Zbytkové ztráty	W
ΔP_p	Pulsní ztráty	W
$X_{\sigma 1}$	Rozptylová reaktance statoru	Ω
$X'_{\sigma 2}$	Rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator	Ω
X_μ	Hlavní, magnetizační reaktance	Ω
R_1	Odpor rotorového vinutí	Ω
R'_2	Odpor rotorového vinutí přepočítaný na statorové vinutí	Ω
R_{Fe}	Fiktivní odpor reprezentující ztráty v železe	Ω
Q	Počet drážek	-
ΔT	Změna teploty	$^{\circ}\text{C}$
ρ	Rezistivita	Ωm
$\overline{Z}$	Impedance	Ω
n	Otáčky motoru	min^{-1}
n_1	Synchronní otáčky	min^{-1}
n_{pr}	Počet paralelních vodičů	-
N_{dr}	Počet vodičů v drážce	-
s	Skluz motoru	-
t_d	Drážková rozteč	m
t_p	Pólová rozteč	m
k_{dr}	Činitel plnění drážky	-
δ	Velikost vzduchové mezery	m
q	Počet drážek na pól a fázi	-
p	Počet pólových dvojic	-
l_{Fe}	Délka železa stroje	m
k_{Fe}	Činitel plnění železa	-
S_t	Průřez tyče rotoru	m^2
S_v	Průřez vodiče	m^2
S_d	Plocha drážky	m^2
m	Hmotnost	kg
m_1	Počet fází	-

ÚVOD

Asynchronní motory se staly velmi rozšířenými v průmyslu především díky jejich spolehlivosti, jednoduchosti, minimálním nárokům na údržbu a nízké ceně. Velké rozšíření a s ním spojený značný podíl spotřebované elektrické energie vyvolává zájem o jejich energetickou efektivnost, která se stala předmětem regulace ze strany EU. Ta vydala normu s označením IEC 60034-30, kde jsou stanoveny třídy účinnosti pro dané výkony motorů [1].

Jak je známo, účinnost motoru nám vyjadřuje podíl mechanického výkonu na hřídeli k elektrickému příkonu přivedenému na svorky statorového vinutí. Čím je účinnost větší, tím je menší ztrátová energie přeměňující se v motoru na teplo. Ztráty v asynchronním stroji se dají rozdělit na: Joulovy ztráty ve vinutí statoru, Joulovy ztráty ve vinutí rotoru, ztráty v železe, dále mechanické ztráty (ventilační a třením) a ztráty přídatné [1].

Pro dosažení vyšší účinnosti se motory optimalizují konstrukčně a materiálově. Hlavní způsoby navýšení účinnosti již navržených asynchronních motorů jsou následující: snížení odporu statorového vinutí, snížení odporu rotorové klece, snížení měrných ztrát v magnetickém obvodu, axiální prodloužení magnetického obvodu, optimalizace tvaru drážek [2].

Tato práce má za cíl optimalizovat tvar statorových a rotorových drážek asynchronního motoru s kotvou nakrátko, tak aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti, při současném dodržení předem daných podmínek souvisejících výrobitelností stroje. Tvar drážek ovlivňuje parametry celého stroje, má vliv jak na velikost rozptylové indukčnosti, magnetizační indukčnosti, tak i na velikost Joulových ztrát v kleci, ztrát v železe a průběh momentové charakteristiky [2]. K řešení různých optimalizačních úloh se používají optimalizační algoritmy, jednotlivými druhy a vhodností jejich použití se zabývá kapitola 2. Mezi nejčastěji používaný patří genetický algoritmus, pomocí něhož byla optimalizace prováděna.

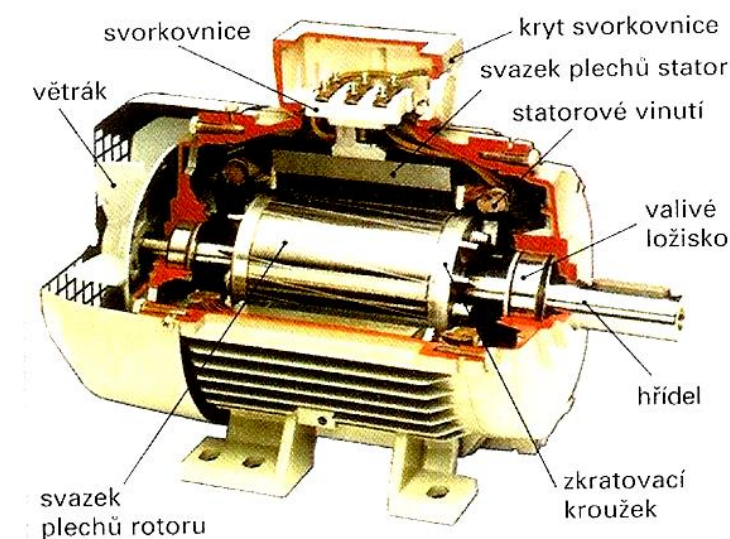
Asynchronní motor o výkonu 600 W byl optimalizován s využitím analytického výpočtu v programu RMXprt a dále pro něj byly připraveny dva modely v programu Maxwell pro optimalizaci s využitím metody konečných prvků. První model má kruhový tvar magnetického obvodu s vlastnostmi udávanými podle katalogu. Ve druhém modelu je počítáno některými vlivy technologie výroby, a to se skutečným tvarem plechu a vlivem stříhu na jeho magnetické vlastnosti.

1 ASYNCHRONNÍ STROJE

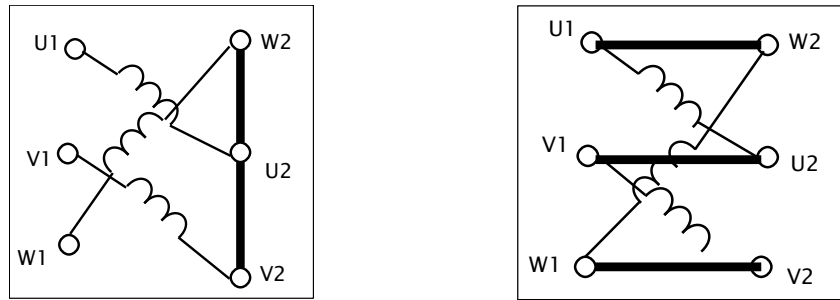
Asynchronní stroje neboli indukční stroje, jsou v současnosti nejpoužívanější točivé elektrické stroje. Pracují na principu přenosu energie prostřednictvím elektromagnetické indukce. Lze je využívat jako motory, kdy mění elektrickou energii na energii mechanickou nebo jako generátory sloužící k přeměně mechanické energie na elektrickou. Používají se převážně jako třífázové motory. Skládají se ze dvou hlavních částí: pevné – statoru a pohyblivé – rotoru [19].

Magnetický obvod statoru je složen z elektrotechnických plechů, které jsou vzájemně izolovány. Tyto plechy obsahují drážky, v nichž je uloženo statorové vinutí, obvykle měděné. Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici. Třífázové vinutí statoru může být zapojeno do hvězdy (Y) nebo trojúhelníka (D) viz Obr. 1.2. Vodiče jsou lakované, smaltované či impregnované a jsou tak izolované od plechů i od sebe navzájem. Další součásti statoru jsou: litinová nebo hliníková kostra, ložiskové štíty, ložiska [17].

Rotor tvoří rovněž z plechy, které jsou nalisovány na hřídeli. V drážkách rotoru je uloženo vinutí tzv. kotva. Bývá používám buď rotor s kotvou nakrátko nebo rotor s vinutou kotvou. U rotoru s kotvou nakrátko je vinutí tvořeno vodivými neizolovanými tyčemi, nejčastěji z hliníku, mědi nebo mosazi. Tyto tyče jsou na čelních stranách spojeny kruhy nakrátko, vznikne tak tzv. klecové vinutí. U motorů menších výkonů se vinutí odlévá z hliníku společně s větracími lopatkami metodou tlakového lití. U rotoru s vinutou kotvou je v drážkách uloženo třífázové vinutí z vodičů. Konce vodičů jsou připojeny ke sběracím kroužkům a začátky jsou spojeny do uzlu. Lze tak připojit odporové spouštěče a omezovat záběrný proud při rozběhu motoru [17]. Motory s vinutou kotvou jsou dnes již nahrazovány motory s kotvou nakrátko napájenými z elektronických frekvenčních měničů.



Obr. 1.1: Popis částí asynchronního motoru [17]



Obr. 1.2: Zapojení svorkovnice 3f asynchronního motoru do Y (vlevo) a D (vpravo)

1.1 Princip třífázového asynchronního motoru

Funkce asynchronního motoru je dána vznikem točivého magnetického pole v trojfázovém vinutí rozloženém v drážkách statoru. Jednotlivé fáze vinutí jsou vůči sobě prostorově posunuty o 120° elektrických. Po připojení střídavého napětí začne třífázovým vinutím protékat soustava proudů se vzájemným časovým posunem 120° . Dochází tak ke vzniku točivého magnetického pole, otáčejícím se synchronní rychlostí n_1

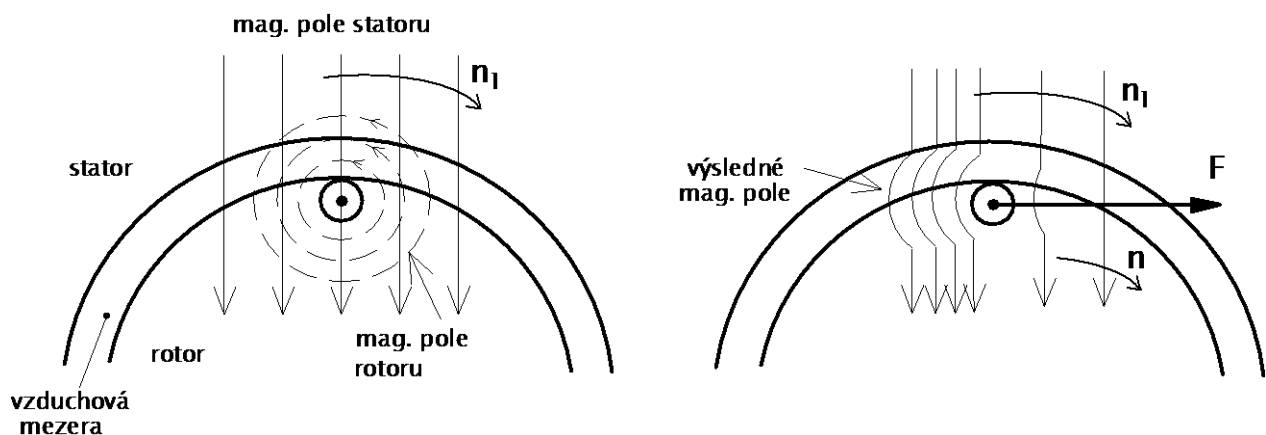
$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

kde f_1 je kmitočet napájecího statorového napětí a p je počet pólových párů vinutí [20].

V tomto magnetickém poli je umístěn rotor. Magnetické pole protíná vodiče rotoru, ve kterých se indukují napětí s kmitočtem:

$$f_2 = \frac{(n_1 - n) \cdot p}{60} = f_1 \cdot s \quad [\text{Hz}] \quad (1.2)$$

Jelikož je vinutí rotoru spojeno kruhy nakrátko, protéká proud, který vytváří magnetické pole rotoru. Vzájemným působením magnetického pole statoru a rotoru vzniká síla působící na vodiče rotoru, která má směr otáčení magnetického pole statoru [20]. Tato skutečnost je znázorněna na Obr. 1.3.



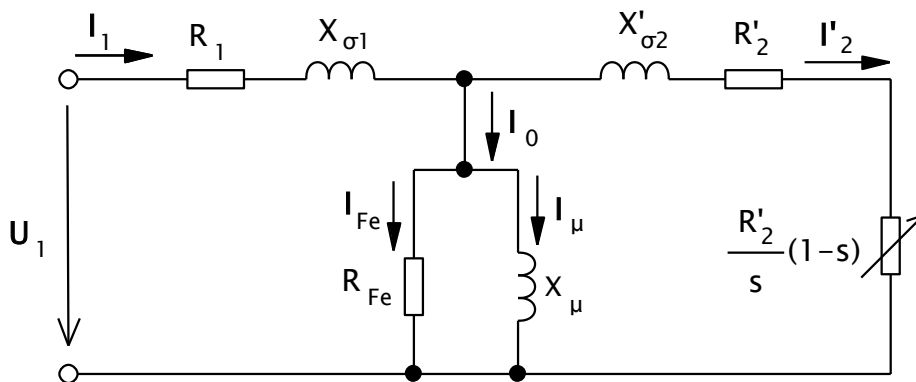
Obr. 1.3: Princip vzniku síly v asynchronním motoru [17]

Pro vytvoření indukovaného napětí v rotoru nemohou být otáčky točivého magnetického pole statoru n_1 stejné jako otáčky rotoru n . Rozdíl těchto otáček vztažený na otáčky točivého pole statoru se nazývá skluz s [17].

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad [-] \quad (1.3)$$

1.2 Náhradní zapojení asynchronního stroje

Nejčastěji je náhradní zapojení jedné fáze asynchronního stroje uváděno v řadě literatur ve tvaru T článku (tak jako je na Obr. 1.4). Můžeme se ale setkat i se zjednodušeným schématem ve tvaru článku Γ nebo Γ [16], které obsahuje pouze jednu hlavní a jednu rozptylovou indukčnost. Literatura [16] vysvětluje správnost použití jedné rozptylové indukčnosti v náhradním zapojení, na rozdíl od zapojení T článku, které obsahuje tyto indukčnosti dvě. V našem případě bylo využito náhradní zapojení ve tvaru T článku, jelikož používaný výpočetní software rovněž uvažuje tento druh náhradního zapojení.



Obr. 1.4: Náhradní zapojení jedné fáze asynchronního stroje [15]

Význam jednotlivých symbolů náhradního schématu je následující [15]:

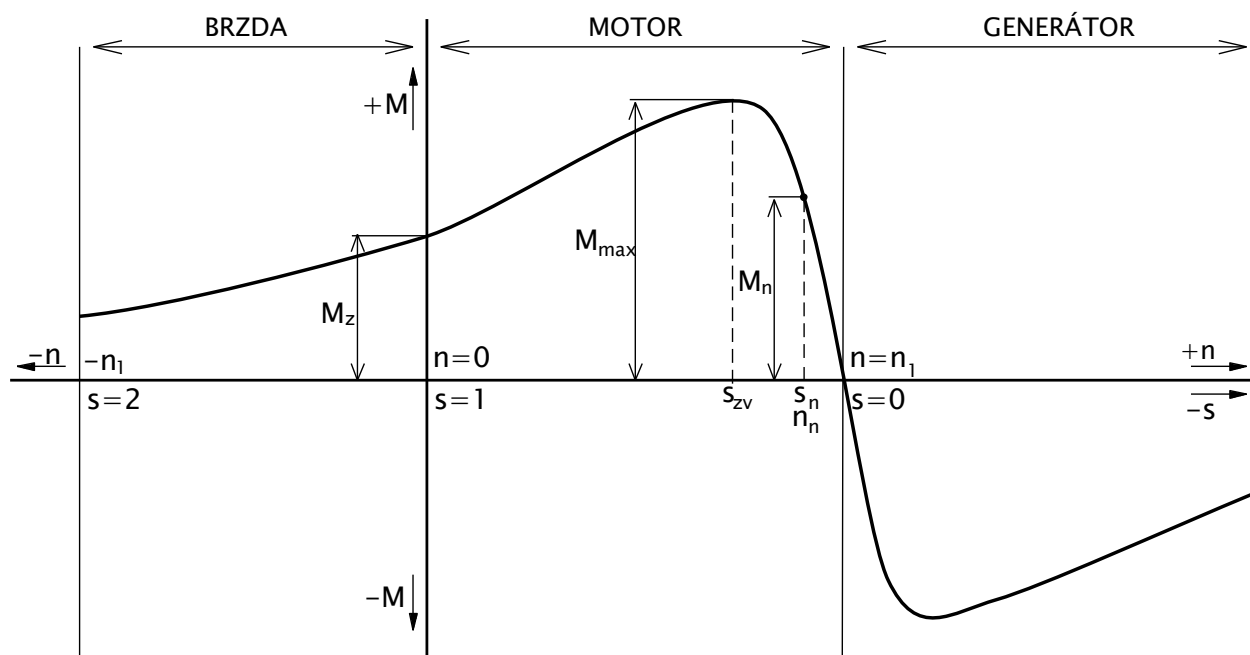
U_1	[V]	komplexní hodnota statorového napětí
I_1	[A]	komplexní hodnota statorového proudu
I_0	[A]	komplexní hodnota magnetizačního proudu
I_{Fe}	[A]	proud potřebný ke krytí ztrát v železe
I_μ	[A]	magnetizačního proudu
X_μ	[Ω]	hlavní, magnetizační reaktance
$X_{\sigma 1}$	[Ω]	rozptylová reaktance statoru
$X'_{\sigma 2}$	[Ω]	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator
R_1	[Ω]	odpor statorového vinutí
R'_2	[Ω]	odpor rotorového vinutí přepočítaný na stranu primárního obvodu
R_{FE}	[Ω]	fiktivní odpor reprezentující ztráty v železe
$\frac{R'_2}{s}(1-s)$	[Ω]	fiktivní odpor, elektrický výkon na tomto odporu představuje mechanický výkon na hřídeli[15].

V závislosti na zatížení stroje se mění odpory a reaktance náhradního obvodu. S růstem zatížení se zvětšuje rozptylový tok, dochází k nárůstu nasycení jednotlivých částí magnetického obvodu od rozptylových polí a tím ke zmenšení rozptylové reaktance $X_{\sigma 1}$ a $X_{\sigma 2}$. Při změně skluzu se mění odpor R_2 a reaktance rotoru $X_{\sigma 2}$. Změny jsou jen nepatrné v oblasti

od chodu naprázdno do jmenovitého chodu. S výraznějšími změnami musíme uvažovat při rozběhu stroje, kdy je proud několikanásobně větší než proud jmenovitý (typicky 4 – 8 krát) a kdy se frekvence rotorového proudu blíží k frekvenci napájecího napětí (vychází ze vztahu 1.2). Při rozběhu stroje se tak uplatňuje povrchový jev, díky kterému dochází k vytlačení proudu v drážce ve směru kolmém na směr rozptylových indukčních čar, tedy směrem ke vzduchové mezeře. Následkem toho je hustota proudu při rozběhu stroje v horní části drážky (tyče) větší a v dolní části drážky se menší. Proud tedy protéká menším průřezem tyče, a to se projeví zvětšením odporu rotorového vinutí a poklesem reaktance, zvětšením záběrného momentu, zmenšením záběrného proudu. Tento jev je tedy žádoucí a zohledňuje při návrhu tvaru drážky klecového vinutí rotoru [18] viz kapitola 1.5.2.

1.3 Momentová charakteristika asynchronního stroje

Momentová charakteristika nám znázorňuje závislost momentu na skluzu či otáčkách stroje, $M = f(s)$, $M = f(n)$.



Obr. 1.5: Momentová charakteristika asynchronního stroje [17]

V okamžiku připojení motoru na síť ($n = 0$, $s = 1$) se motor rozbíhá se záběrným momentem M_z . Při určitých otáčkách dosahuje motor tzv. momentu zvratu neboli maximálního momentu M_{max} . Oblast charakteristiky nalevo od maximálního momentu, jemuž odpovídá skluz zvratu s_{zv} , je nestabilní oblast. Oblast vpravo od maximálního momentu je stabilní neboli pracovní oblast. Překročí-li hodnota zátěže maximální moment M_{max} , motor se dostane do oblasti nestabilní a zastaví se. Nejvýhodnější je motor provozovat v oblasti od jmenovitého momentu M_n do momentu maximálního, kde při změně zatížení reaguje motor jen malou změnou otáček. U motorů se z toho důvodu stanovuje tzv. momentová přetížitelnost - poměr M_{max}/M_n , U běžných motorů bývá v rozmezí 1,75 až 2,5 [17]. V oblasti malého zatížení blízkého chodu naprázdno odebírá motor pouze jalový výkon k vytvoření magnetického pole a jen malý činný výkon na pokrytí ztrát naprázdno. Účinník je tak jen velmi malý [17].

Jmenovitý moment M_n se z jmenovitého výkonu P_n a otáček n_n určí ze vztahu

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \frac{n_n}{60}} \quad [\text{Nm}] \quad (1.4)$$

Rovnice pro mechanický moment je následující [17]:

$$M_{mech} = \frac{U_{n1}^2 \cdot m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad [\text{Nm}] \quad (1.5)$$

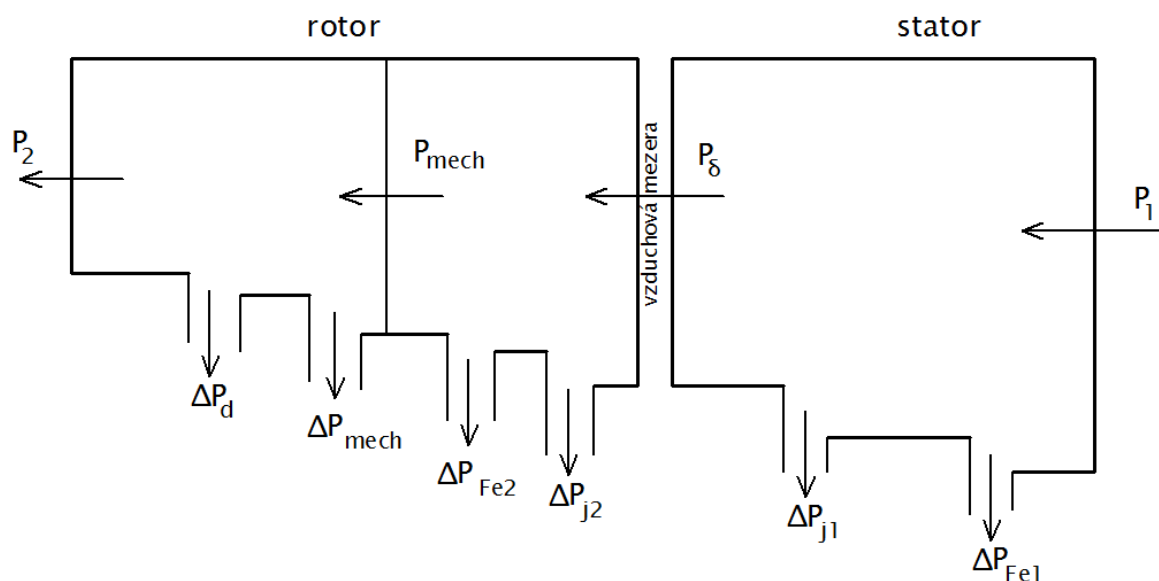
Ze vztahu pro mechanický moment vyplývá, že kromě odporu a reaktance závisí moment také na napájecím napětí a na frekvenci sítě. Moment motoru se mění kvadraticky se změnou napájecího napětí, se změnou frekvence se mění nepřímo úměrně.

1.4 Ztráty v asynchronním motoru

Část elektrického příkonu P_1 , který se nepřemění ve stroji na mechanickou energii se spotřebuje ve formě tepelných ztrát. Ztráty lze dělit do těchto hlavních skupin:

- 1) Ztráty v železe ΔP_{Fe} (hysterezní a vířivými proudy)
- 2) Ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1}
- 3) Ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{j2}
- 4) Mechanické ztráty ΔP_{mech} (třením a ventilační)
- 5) Přídavné (dodatečné) ztráty ΔP_d (v důsledku rozptylových toků a toků vyšších harmonických)

Znázornění míst vzniku jednotlivých ztrát v asynchronním motoru je na následujícím obrázku.



Obr. 1.6: Schéma přeměny výkonu asynchronního stroje [17]

Celkové ztráty jsou dány součtem jednotlivých dílčích ztrát

$$\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad [\text{W}] \quad (1.6)$$

Účinnost stroje se pak určí jako

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad [-] \quad (1.7)$$

kde P_2 je výkon mechanický, na hřídeli [W],

P_1 je elektrický příkon [W].

Níže budou rozebrány jednotlivé druhy ztrát, které jsou ovlivnitelné změnou tvaru drážek.

1.4.1 Ztráty v železe

Ztráty v železe jsou ztráty v magnetickém obvodu elektrického stroje. Tento magnetický obvod je složen z plechů, které jsou vzájemně izolované. Ztráty v železe lze dále dělit na ztráty hysterezní, ztráty vířivými proudy a ztráty přídavné.

Hysterezní ztráty jsou přímo úměrné kmitočtu magnetického pole a velikosti plochy statické hysterezní smyčky. Tyto ztráty nezávisí na časovém průběhu magnetické indukce. Vznikají v důsledku neustálého přemagnetovávání působením střídavého magnetického pole [28].

Ztráty vířivými proudy vznikají kvůli průchodu indukovaných proudů vodivým magnetickým materiálem. Velikost těchto ztrát ovlivňuje tloušťka plechu a jeho rezistivita. Ztráty vířivými proudy závisí přibližně kvadraticky na frekvenci a magnetické indukci [28].

Celkové ztráty v železe statoru se podle [18] dají vypočítat následujícím způsobem:

$$\Delta P_{FEh} = \Delta p \left(\frac{f}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) \quad [\text{W}] \quad (1.8)$$

kde Δp jsou měrné ztráty daného plechu [$\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$],

f frekvence napájecího napětí [Hz],

β exponent závislý na druhu použité oceli,

k_{dj} a k_{dz} jsou činitele uvažující vliv nerovnoměrného rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku,

B_{j1} a B_{z1av} indukce ve jhu a střední indukce v zubech statoru [T], [18].

Program Maxwell počítá měrné ztráty v železe podle rovnice [29]:

$$\Delta p = K_h B_{max}^2 f + K_c (B_{max} f)^2 + K_e (B_{max} f)^{1,5} \quad [\text{W}] \quad (1.9)$$

kde K_h, K_c, K_e představují koeficienty jednotlivých ztrát (koeficient hystereze, vířivý koeficient, koeficient v důsledku magnetických domén), tyto koeficienty se stanoví z charakteristiky udávající závislost měrných ztrát na frekvenci.

B_{max} je maximální amplituda magnetické indukce [T].

Při změně tvaru drážek dochází i ke změně magnetické indukce v zubech a jhu magnetického obvodu, a to má vliv na velikost ztrát v železe.

1.4.2 Ztráty ve vinutí

Ztráty ve vinutí tzv. Jouleovy ztráty jsou způsobené průchodem proudu vinutím o určitém odporu. Určují se zvlášť pro stator a rotor. Závisí na druhé mocnině efektivní hodnoty procházejícího proudu a na odporu vinutí. Odpor vinutí závisí na průřezu vodiče, jeho délce a teplotě.

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (1.10)$$

Ztráty ve vinutí rotoru

$$\Delta P_{j2} = m_2 R_2 I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (1.11)$$

kde m je počet fází

Elektrický odpor

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\text{W}] \quad (1.12)$$

ρ měrný elektrický odpor [Ωm],

l délka vodiče [m],

S je průřez vodiče [m^2].

Celkový statorový proud je složen s činné I_{cs} a jalové složky proud I_{js}

$$I_s = \sqrt{I_{\text{cs}}^2 + I_{js}^2} \quad [\text{W}] \quad (1.13)$$

Z uvedených vztahů lze částečně vyvodit, jak změna tvaru drážek může ovlivnit velikost ztrát ve vinutí. Například zvětšením rotorové drážky - průřezu rotorové tyče, dosáhneme snížení odporu a tím snížení ztrát ve vinutí rotoru. Změna tvaru rotorové drážky však působí na některé další parametry náhradního schématu. Například zmenšení výšky rotorové drážky způsobí rozšíření jha rotoru, tedy snížení indukce v této části. Dojde tak k ovlivnění velikosti magnetizační reaktance (zvýší se) a tím i magnetizačního proudu (sníží se). To povede ke změně celkového statorového proudu, což způsobí změnu ztrát ve vinutí statoru.

1.5 Tvary drážek a návrh rozměrů

1.5.1 Statorové drážky

Při návrhu rozměrů drážek se vychází z toho, aby plocha drážky odpovídala počtu a průměru vodičů do ní uložených, a navíc je nutné počítat s izolací. Další kritérium je, aby hodnota

magnetické indukce ve jhu statoru a v zubech byla v mezích daných použitou elektrotechnickou ocelí. Tvar drážek a zubů je rovněž dán výkonem stroje a typem vinutí [18].

Vinutí zhotovené z pásů se u motorů velkých výkonů ukládají do otevřených drážek s rovnoběžnými stěnami. Takové vinutí se nazývá vkládané. Vodiče kruhového průřezu vsypávaného vinutí se mohou uložit do drážky s libovolným tvarem [18].

Při zjišťování rozměrů drážek se nejprve určí rozměry zubů. Výpočet rozměrů vychází obvykle z dovolené indukce ve jhu statoru B_{j1} a indukce v neužším místě zubu B_{z1max} . Doporučené hodnoty pro jho statoru jsou v rozmezí 1,4 – 1,6 T. V neužším místě zubu se dovolená hodnota indukce pohybuje v rozmezí 1,7 – 1,95 T [18].

Jeden z možných postupů při výpočtu rozměrů drážek je uveden v [18]. Nejprve se ze zvolené hodnoty indukce vypočte výška jha statoru

$$h_j = \frac{\Phi}{2 B_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} \quad [\text{m}] \quad (1.14)$$

kde Φ je magnetický tok [Wb],

l_{Fe1} je aktivní délka železa [m],

k_{Fe} je činitel plnění železa [-]

poté se určí minimální šířka zubu

$$b_{z1(\min)} = \frac{B_\delta t_{d1} l_1}{B_{z1max} l_{Fe1} k_{Fe}} \quad [\text{m}] \quad (1.15)$$

kde B_δ je magnetická indukce ve vzduchové mezeře [T],

t_{d1} je drážková rozteč statoru [m] a

l_1 celková délka statoru [m].

Následně se vypočítá předběžná hloubka drážky

$$h_d = \frac{D_e - D}{2} - h_j \quad [\text{m}] \quad (1.16)$$

D_e je vnější průměr jha statoru [m]

D – vnitřní průměr statoru [m].

Výpočet šířky pro drážky s rovnoběžnými stěnami

$$b_d = t_{d1} - b_{z1min} \quad [\text{m}] \quad (1.17)$$

Výpočet šířky drážky u paty zubu pro drážku na Obr. 1.8

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_d)}{Q_1} - b_{z1} \quad [\text{m}] \quad (1.18)$$

Šířka drážky v její horní části

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_0 - b_0) - Q_1 b_{z1}}{Q_1 - \pi} \quad [\text{m}] \quad (1.19)$$

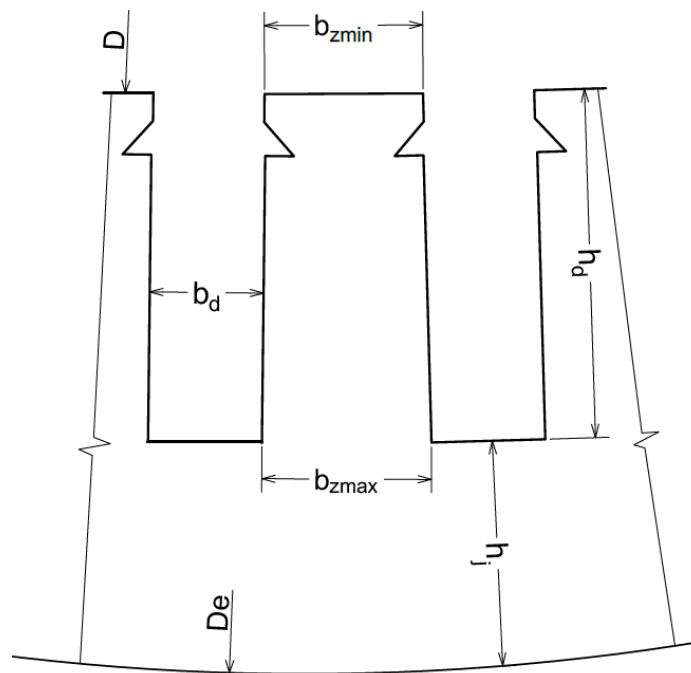
Aktivní hloubka drážky

$$h_1 = h_d - \left(h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} \right) \quad [\text{m}] \quad (1.20)$$

Celková hloubka drážky

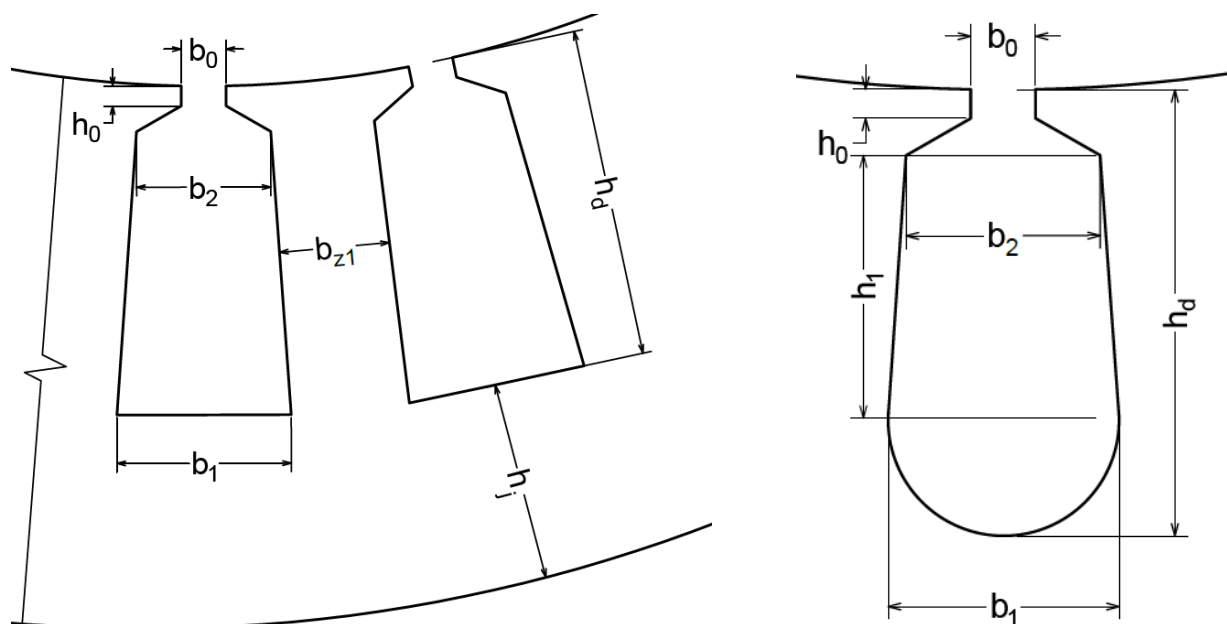
$$h_d = h_1 + \frac{b_1 - b_0}{2} + h_0 \quad [\text{m}] \quad (1.21)$$

Při návrhu počtu a průřezu vodičů musíme počítat v drážce s prostorem pro izolaci, dále také s určitou vůlí na vložení vodičů. V případě otevřených drážek (drážky typu M, N, F) také s místem pro vložení drážkového klínu. Na následujícím obrázku je drážka typu N s vybráním pro umístění drážkového klínu, (hloubka a šířka vybrání je normalizována). Tento tvar drážky je určen pro vložení pásových vodičů [18].



Obr. 1.7: Otevřená drážka typu N [18]

Vodiče kruhového průřezu vsypávaného vinutí se mohou vložit v podstatě do drážek libovolného tvaru. Snaha je však dodržet to, aby zuby měly rovnoběžné stěny, nikoliv jako je v případě drážek lichoběžníkových (Obr. 1.7), kdy jsou rovnoběžné stěny drážky. Díky rovnoběžným stěnám zubů se v jejich průřezu nemění magnetická indukce a magnetické napětí takových zubů je menší než magnetické napětí zúžených lichoběžníkových zubů. Tvar drážky vsypávaného vinutí se může volit například podle následujícího obrázku [18].



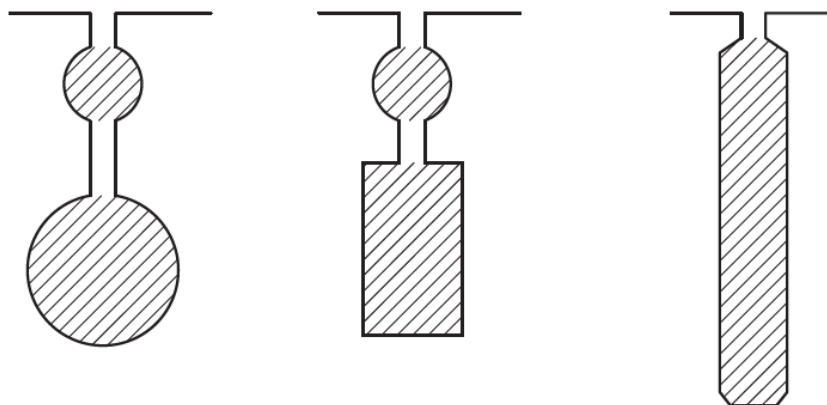
Obr. 1.8: Drážky typu L (vlevo) a S (vpravo) určené pro vsypávané vinutí [18]

Drážky na Obr. 1.8 jsou polozavřené, jejich otevření b_0 je normalizováno. Obvykle bývá v mezích od 1,8 mm u malých strojů až do 4 mm u větších strojů. Otevření drážky nám musí zajisti volný průchod vinutí do drážky, kdy se navíc počítat s rezervou určenou pro izolační vložku sloužící pro ochranu izolace vodičů při vsypávání vinutí. Výška otevření drážky h_0 musí být taková, aby byla zajištěna dostatečná pevnost hlav zubů. Hodnota h_0 bývá v rozmezí od 0,5 až 1 mm. Větší výška otevření h_0 vede k růstu rozptylového toku drážky [18].

1.5.2 Rotorové drážky

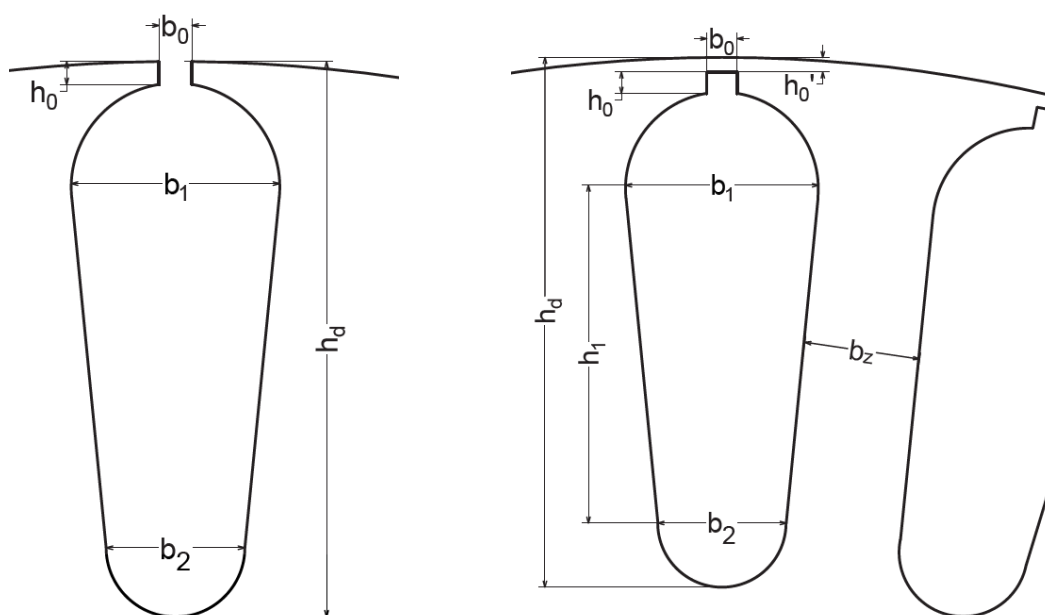
Tvar drážek rotoru nakrátko je dán požadavky na průběh momentové charakteristiky motoru a jeho výkonem. Převážně nám ovlivňuje rozběhovou část momentové charakteristiky. Vinutí nakrátko neboli klecové vinutí nemá žádnou izolaci mezi stěnami drážky a drážkovou částí vinutí. Setkáváme se buď s natvrdo pájeným vinutím nebo odlévaným vinutím. U natvrdo pájeného vinutí se tyče vinutí nasunou do drážek a v čelech se připájí nebo přivaří ke kruhům nakrátko. Tento způsob se využívá u velkých asynchronních motorů, kdy mají drážky hluboký obdélníkový tvar a tyče jsou hliníkové nebo měděné. U motorů s osovou výškou do 400 mm se vyskytují převážně rotory s litým hliníkovým vinutím. Metodou tlakového lití se vinutí odlévá společně s kruhy nakrátko, na nichž jsou zhotoveny ventilační lopatky [18].

Pro zvýšení záběrného momentu se drážky zhotovují úzké a hluboké. Rozptylová indukčnost je tím větší, čím je vodič hlouběji v drážce. Díky velké rozptylové reaktanci dolních vodičů je proud při rozběhu ($s \rightarrow 1$) vytlačován do horní části tyče a dojde tak ke snížení efektivního průřezu vodiče, a tedy ke zvětšení odporu, zvýšení záběrného momentu a snížení záběrného proudu. Při jmenovitém zatížení proud protéká celým průřezem tyče, povrchový jev se neuplatňuje. Rotory s úzkými hlubokými drážkami se nazývají vírové. Stejnou funkci mají i rotory s dvojitou klecí. Horní klec je rozběhová a spodní klec se nazývá běhová či pracovní. Drážky dvojité a vírové klece jsou znázorněny na následujícím obrázku [18].



Obr. 1.9: Drážky dvojité a vřevé klece [18]

Asynchronních motorů nakrátko s výškou osy do 250 mm mají zpravidla drážky typu V. Tyto drážky mají širokou horní část drážky a konstantní šířku zubů. Drážky se používají polozavřené nebo zavřené viz Obr. 1.10 [18].



Obr. 1.10: Rotorové drážky typu V, polozavřené a zavřené [18]

Při výpočtů rozměrů drážky se vychází z dovolené magnetické indukce v zubu rotoru B_{z2} (1,75 – 1,9 T) a z průřezu tyče S_t .

Výpočet šířky zubu

$$b_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2}}{B_{z2} k_{Fe}} \quad [\text{m}] \quad (1.22)$$

kde t_{d2} je drážková rozteč rotoru [m]

Rozměry drážky b_1 , b_2 , h_1 a h_d se určí následovně

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_0 - 2h'_0) - Q_2 b_{z2}}{\pi + Q_2} \quad [\text{m}] \quad (1.23)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad [\text{m}] \quad (1.24)$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Q_2}{2\pi} \quad [\text{m}] \quad (1.25)$$

$$h_d = h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} \quad [\text{m}] \quad (1.26)$$

kde D_2 je vnější průměr rotoru [m],

Q_2 je počet drážek rotoru [-],

S_t je průřez rotorové tyče [m²] [18].

Výše jsou pro přehled uvedeny jen základní tvary drážek, lze se však setkat ze složitějšími tvary drážek rotorového vinutí nakrátko, navrženými pro dosažení potřebných vlastností stroje [18].

1.5.3 Činitel plnění drážky

Jeden z důležitých parametrů při návrhu rozměrů drážky je činitel plnění drážky k_{dr} . Udává nám, jak je využit prostor drážky pro umístění vodičů. Snaha je vždy volit takový rozměr drážky, který zajistí uložení nutného počtu vodičů vinutí a izolace v co nejmenším prostoru [18]. Činitel plnění drážky se vypočte jako poměr celkového průřezu všech vodičů k ploše drážky

$$k_{dr} = \frac{S_v \cdot N_{dr} \cdot n_p}{S_d} \quad [\text{m}] \quad (1.27)$$

kde S_v je průřez vodiče [m²],

N_{dr} je počet vodičů v drážce,

n_p je počet paralelních vodičů tvořících jeden vodič,

S_d plocha drážky [m²].

V drážce, kromě samotných vodičů, zabírá místo drážková a cívková izolace, izolace vodičů a různé izolační vložky. U vodičů kruhové průřezu vzniká také tzv. mrtvý prostor, kde se nenachází izolace ani vodič. Všechny tyto okolnosti ovlivňují plnění drážky. Střední hodnota činitele plnění drážky vsypávaného vinutí z lakovaného drátu kruhového průřezu na napětí do 660 V je $k_{dr} = 0,30$ [18]. U námi analyzovaného motoru vychází činitel plnění statorové drážky rovněž 0,30.

2 OPTIMALIZAČNÍ METODY

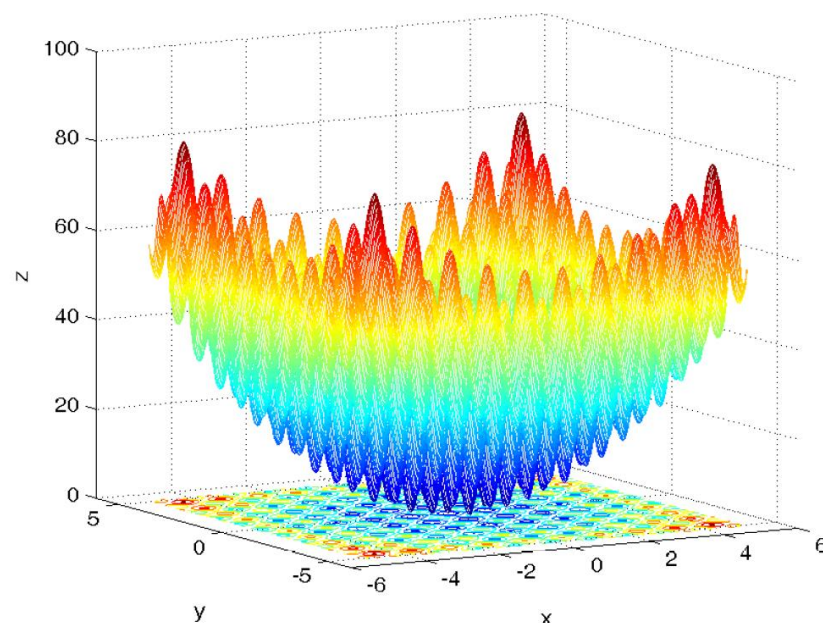
Úkolem optimalizace je najít optimální kombinaci argumentů dané funkce. Tato funkce se nazývá účelová či cílová. Optimalizační algoritmy slouží k nalezení globálního minima (resp. maxima) účelové funkce [4].

Pro účelovou funkci

$$f: D \rightarrow \mathbb{R}, \quad D \subseteq \mathbb{R}^d \quad (2.1)$$

máme najít bod $x^* \in D$ pro které platí, že $f(x^*) \leq f(x)$ pro $\forall x, x \in D$. Řešení problému globální optimalizace je nalezení bodu $x^* \in D$, tomuto bodu, říkáme bod globálního minima. Definiční obor D nazýváme jako doména, jde o prohledávaný prostor a přirozené číslo d je dimenze úlohy. Počet dimenzí je dán počtem optimalizovaných argumentů. Pokud nás zajímá globální maximum, tak jej nalezneme jako globální minimum funkce $g(x) = -f(x)$ [5].

Nalezení globálního extrému není vždy zcela jednoduché, zvláště pokud má účelová funkce více lokálních extrémů nebo argument funkce není jedno reálné číslo, ale vektor reálných čísel. Z geometrického hlediska, má-li daná účelová funkce například osm argumentů (nezávislých proměnných), pak hledáme extrém funkce na osmírozměrném prostoru, kde devátá plocha je návratová hodnota účelové funkce. Použitím analogie z třídímního prostoru bychom prvním osmi přiřadili charakter os x a y , deváté ploše charakter osy z [6]. Příkladem obtížné úlohy globální optimalizace je Rastriginova funkce na Obr. 2.1, kde je jedno globální minimum obklopeno mnoha lokálními minimy. Tato funkce je jednou z testovacích funkcí pro optimalizační algoritmy.



Obr. 2.1: Rastriginova funkce [5]

Řešení složitých optimalizačních problémů není vždy možné analytickou cestou, a pokud ano, tak je značně komplikované a zdlouhavé. Proto je nutné použít algoritmy, které jsou

vhodné pro řešení daných problémů. S úspěchem jsou v posledních 20 letech pro řešení složitých optimalizačních úloh používané stochastické algoritmy. Ty využívají heuristiku (tj. postup využívající náhodu, analogii, intuici, zkušenost) při prohledávání předem vymezeného prostoru. Stochastické algoritmy nemohou garantovat nalezení přesného řešení, ale jsou schopny v přijatelném čase dosáhnout velmi dobrých výsledků. Výsledná množina řešení nemusí obsahovat nejlepší možné řešení. Kvalitu výsledků ovlivňuje hlavně správnost nadefinování účelové funkce [4], [5], [6].

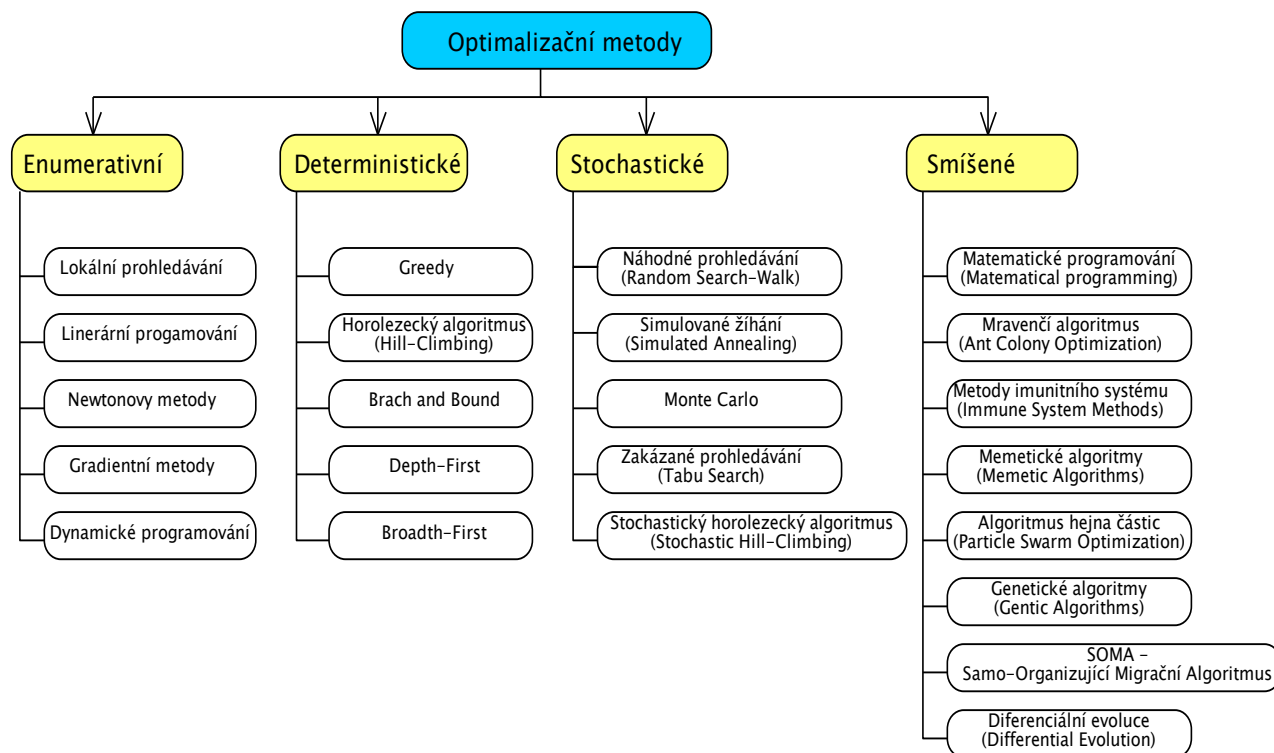
V posledních době jsou využívány převážné stochastické algoritmy evolučního typu, založené na biologických a fyzikálních principech. Jejich výhodou je, že se zaměřují na hledání globálního extrému, a ne pouze lokálního. Toho dosahují tím, že připouštějí s jistou pravděpodobností přijetí horšího řešení do další iterace a tím se snaží vyhnout uváznutí v lokálním extrému. Mezi evoluční algoritmy patří *genetický algoritmus* vycházející z myšlenek darwinovského principu evoluce. Genetický algoritmus má schopnost nalézt globálně optimální řešení v komplexním multimodálním vyhledávacím prostoru bez specifické znalosti řešeného problému. Tento algoritmus pracuje s populacemi možných řešení, jimž se říká jedinci. Jedinci jsou v běhu algoritmu ovlivňováni evolučními operátory: selekce, křížení a mutace. Mezi další využívané stochastické algoritmy patří metoda simulovaného žíhání, vycházející z fyzikálního procesu žíhání v pevných látkách, dále pak algoritmus hejna částic ozn. PSO (Particle Swarm Optimization) inspirovaný na základě pozorování chování ptačích a rybích hejn a další [4], [1], [5], [7]. Přehled těchto algoritmů a jejich možné rozdělení je uveden na Obr. 2.2.

2.1 Rozdělení optimalizačních metod

Optimalizační algoritmy dělíme na:

- 1) Enumerativní – takové algoritmy provádějí výpočet všech možných kombinací daného problému. Kvůli časové náročnosti jsou vhodné pro problémy, kde je argument účelové funkce diskrétního charakteru a kde nenabývá velkého počtu hodnot.
- 2) Deterministické – na rozdíl od enumerativních neprovádí výpočet všech možných řešení. Vyžadují předběžné předpoklady jako např. linearita, konvexnost problému, spojitý a malý prostor možných řešení, účelová funkce obsahující pouze jeden extrém.
- 3) Stochastické – algoritmy založené na využití pravděpodobnosti a náhody. Výsledkem se stává nejlepší řešení, které bylo nalezeno během celého náhodného prohledávání vymezeného prostoru.
- 4) Smíšené – tyto algoritmy vznikly sloučením deterministických a stochastických. Jsou schopné nalézt více řešení během jednoho spuštění. Jsou vhodné pro problémy bez omezení velikosti prohledávaného prostoru [6].

Na následujícím obrázku je uvedeno jedno z možných uspořádání optimalizačních algoritmů.



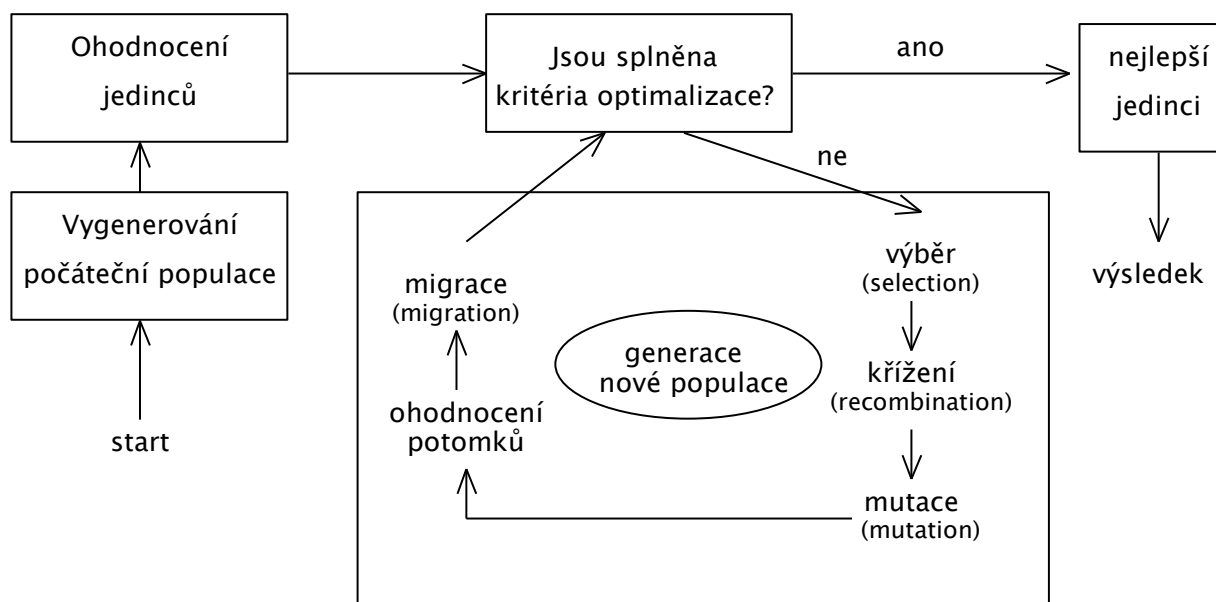
Obr. 2.2: Rozdělení optimalizačních algoritmů [7]

2.2 Evoluční algoritmy

Ještě před rozšířením počítačů ve velkém měřítku (50. léta 20. století), vznikl nápad, použít modely Darwinovy evoluční teorie pro automatizované řešení problémů. V 60. letech byly tři odlišné interpretace tohoto nápadu rozvinuty na třech různých místech. V USA Lawrence J. Fogel představil *evoluční programování*, zatímco John Henry Holland nazýval jeho metodu *genetickým algoritmem*. V Německu John Rechenberg and Hans Paul Schwefel představili *evoluční strategii*. Tyto oblasti se vyvíjely odděleně asi po dobu 15 let. V počátku 90. let se v návaznosti na evoluční principy objevil ještě čtvrtý směr - *genetické programování*. Souhrnně lze všechny oblasti pojmenovat jako *evoluční výpočetní techniky (Evolutionary computing)*, do kterých spadají také *evoluční algoritmy (Evolutionary algorithms)*. Základ všech těchto metod je odvozen z principů biologické evoluce [3].

Evoluční algoritmy patří mezi základní prostředky numerické matematiky při řešení velkých komplexních optimalizačních problémů. Pro svoji činnost využívají modely přírodních procesů, jako je například *selektce* (selection), *křížení* (recombination), *migrace* (migration) a *sousedství* (neighborhood). Důležitým znakem těchto algoritmů je, že pracují s populacemi jedinců (potenciálních řešení) namísto jediného řešení. Na začátku se vygeneruje náhodná výchozí populace. Všichni jedinci jsou ohodnoceni podle *objektivní funkce* (objective function). Pak dochází k výběru jedinců podle jejich *fitness* neboli vhodnosti k vytvoření potomků. Rodiče pak vytvoří potomky, kteří kombinují vlastnosti obou rodičů. Všichni potomci jsou následně podrobeni s určitou pravděpodobností operátoru mutace, kdy

může být informace obsažená v jedinci náhodně modifikována. Potomstvo vytváří novou generaci a nahrazuje své rodiče. Celý cyklus se provádí, dokud není dosaženo optimalizačního kritéria. Postup fungování vícepopulačního evolučního algoritmu je uveden na Obr. 2.3. U něj se navíc využívají subpopulace, mezi kterými se mohou jedinci navzájem prohazovat díky operátoru migrace. [3], [8].



Obr. 2.3: Struktura vícepopulačního evolučního algoritmu [3]

Evoluční algoritmy lze podle jejich strategie řešení rozdělit do dvou skupin:

1. Strategie *populace* – zde patří *genetické algoritmy*
2. *Bodová strategie* – např. metoda *simulované žhání (simulated annealing)*, *horolezecký algoritmus (hill-climbing)*. Základem těchto algoritmů je operátor *sousedství* aktuálního řešení, ve kterém hledáme řešení lepší [7].

Evoluční algoritmy mají tu výhodu, že jsou velmi obecně definované, a tudíž i aplikovatelné na mnoha problémech, především na těch, které jsou příliš složité pro řešení enumerativními a deterministickými metodami. Další výhodou je schopnost dostat se z lokálního extrému funkce. Toho dosahují tím, že s určitou pravděpodobností připouštějí do horší řešení, které je dále použito v nové generaci, a tím se vyhnou uváznutí v lokálním extrému. Na Obr. 2.1 je uvedena Rastriginova funkce z mnoha lokálními extrémy, tato funkce je evolučními algoritmy řešitelná. Nevýhodou těchto algoritmů je to, že do určité míry pracují s náhodou, a tedy jejich výsledky nelze zcela předvídat. Evoluční algoritmy mohou poskytovat řadu možných řešení daného problému, konečná volba je však ponechána na uživateli. Různé typy evolučních algoritmů se liší hlavně v procesu prohledávání prostoru řešení, kdy jde o rovnováhu dvou cílů. První cíl je, co nejrychleji nalézt nejbližší optimum v blízkosti výchozího bodu a druhý, co nejlépe prohledat prostor, v němž jsou všechna možná řešení [4], [7].

V dalších kapitolách budou vysvětleny vybrané nejpoužívanější evoluční algoritmy.

2.2.1 Genetický algoritmus

Genetický algoritmus (GA) patří v současnosti k nejčastěji používaným evolučním optimalizačním algoritmům. Podle Darwinovy teorie evoluce, ze které tento algoritmus vychází, přežívají jen nejlépe přizpůsobení jedinci populace. Každý jedinec má určité parametry (uvedené obvykle v binární podobě), které se u genetických algoritmů nazývají *geny*. Soubor genů jedince dává dohromady *chromozóm*. Sadu parametrů chromozómu nazýváme *genotyp*. Dalším důležitým pojmem v genetické algoritmu je pojem *fitness*. Je to kladné číslo značící relativní úspěšnost jedince v daném prostředí přežít a podílet se na reprodukci. Na každého jedince je aplikována fitness funkce, pomocí níž dojde k jeho ohodnocení. Jedinci s vyšší hodnotou fitness mají větší pravděpodobnost přežití a podílení se na vytváření další generace. Algoritmus využívá tři základní operace: *selekce*, *křížení* a *mutace*. Výběr rodičů probíhá pomocí selekce. Nejrozšířenější selekční mechanismu je ruletová selekce. Každému jedinci je přiřazena výšeč přímo úměrná jeho ohodnocení (tzv. *fitness proportionate selection*). Po výběrů rodičů nastává reprodukce potomků. Nejprve se provede operace křížení, jichž existuje několik technik. Jejich společná vlastnost je vzájemné prohození části chromozómu. Po operaci křížení nastává operace mutace, která s relativně malou pravděpodobností mění náhodně hodnotu vybraných genů. Nově vytvořené potomstvo nahrazuje původní populaci. Cyklus se nyní opakuje, dokud není splněna ukončovací podmínka [9], [7].

2.2.2 Simulované žíhání

Inspirace se k metodě Simulované žíhání našla ve statistické mechanice v popisu fyzikálního procesu žíhání tuhého tělesa. Žíhání je proces, při kterém je těleso zahřáté na vysokou teplotu až k bodu tání a pak je velmi pomalu chlazeno, tak aby se nestabilní částice dostaly do rovnovážné polohy. Při tom dochází k vytvoření stabilní krystalové mřížky, a tedy k odstranění vnitřních defektů tělesa. Je-li těleso drženo na stejné teplotě T dostatečně dlouho, potom se nachází v tepelné rovnováze, která je popsána Boltzmannovým rozdělením pravděpodobnosti [7].

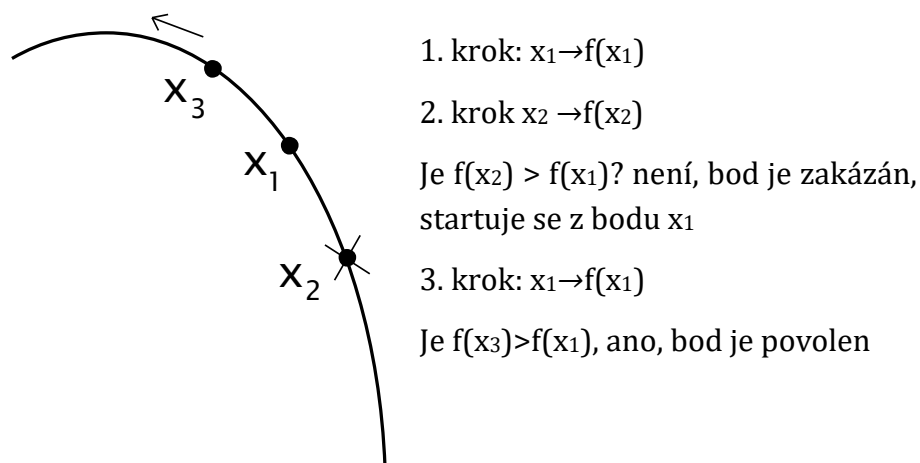
Metoda Simulovaného žíhání patří mezi algoritmy, které připouští kroky vedoucí ke zhoršení účelové funkce. Z části se podobá horolezeckému algoritmu. Rozdíl je v tom, že je schopná v počátku překonat lokální extrém. Pak se již chová jako horolezecký algoritmus. Přijetí horšího řešení je závislé na teplotě. Ze začátku je globálně prohledáván celý vymezený prostor, s klesající teplotou se prostor zmenšuje a klesá pravděpodobnost přijetí horšího řešení. Metoda se tedy snaží v každém iteračním kroku vylepšit nalezené minimum zmenšením vyhledávaného prostoru [7].

2.2.3 Horolezecký algoritmus

Horolezecký algoritmus (Hill-Climbing) patří mezi základní optimalizační algoritmy. Tento algoritmus neobsahuje evoluční prvky. Pracuje tak, že na začátku optimalizace vygeneruje náhodné řešení nacházející se v definovaném prostoru optimalizované funkce. V okolí tohoto navrženého řešení se následně sestrojí předepsaný počet nových řešení, tak že původní

zvolené řešení je středem nově navržených řešení. Následně se v této oblasti hledá minimum (maximum) účelové funkce a zaznamenává se nejlepší řešení. Nalezené minimum (maximum) se použije opět jako střed pro vytvoření nového okolí, v němž se opakuje hledání. Kritériem ukončení algoritmu je zvolený počet iterací. Nevýhodou je případ, kdy je funkce multimodální, obvykle tak algoritmus skončí v lokálních extrému, a to i při velkém počtu iterací. Výše je popisována varianta jednoduchého horolezecký algoritmus, další varianty tohoto algoritmu jsou: horolezecký algoritmus s učením, stochastický horolezecký algoritmus a paralelní horolezecký algoritmus. Tyto varianty se liší v počtu generovaných bodů v okolí a počtu průběhů algoritmů začínajících z několika bodů [7].

Postup hledání maxima jednoduchým horolezeckým algoritmem je uveden na následujícím obrázku:



Obr. 2.4: Princip fungování horolezeckého algoritmu [7]

2.2.4 Rojová inteligence

Rojová inteligence je další technikou využívanou v oboru umělé inteligence. Je inspirována kolektivním chováním samo organizujících se přírodních systémů [13]. Takové chování lze v přírodě sledovat u živočišných kolonií, např. u mravenců, termitů, včel a vos nebo také u ptačích a rybích hejn. Tato jednotlivá společenstva vykazují inteligentní chování i bez centrálního řízení celého roje. Jednotlivci (agenti) se v těchto koloniích specializují na určitou činnost a to přispívá k efektivitě provádění činností. Na takové společenstvo lze z pohledu algoritmů rojové inteligence nahlížet jako na skupinu nezávislých agentů, kteří mezi sebou a okolím interagují a vzájemně přímo či nepřímo komunikují, aby vyřešili určitý problém. Tyto metody jsou vhodné pro řešení problémů, u kterých lze řešení reprezentovat jako bod či křivku v n -rozměrném prostoru. Řešení (částice) jsou v prostoru rozmístěna geometricky s přiřazenou počáteční rychlostí a směrem. Pohyb roje částic je pravidelně vyhodnocován a směřován podle určitých pravidel k dobře se jevícím řešením. Postupem času se tak nasměřuje celé hejno k optimálnímu řešení problému. Robustnost postupu těchto systémů vede k odolnosti proti uváznutí v lokálním extrému. Tyto algoritmy lze aplikovat na problémy např. v počítačových aplikacích, strojírenství, stavebnictví [11], [12].

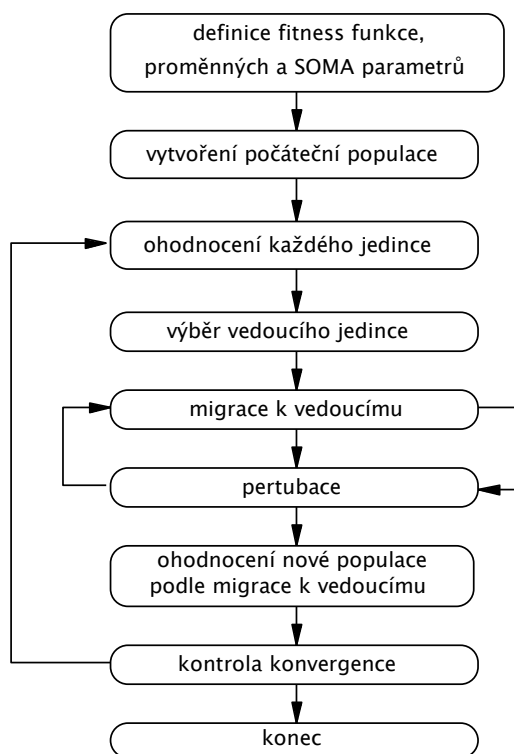
2.2.4.1 Optimalizace mravenčí kolonií

Mravenčí kolonie (Ant Colony Optimization) je algoritmus inspirovaný chováním mravenců v koloniích při hledání a sbírání potravy. Toto chování je založeno na nepřímé komunikaci. Ta je provedena ukládáním feromonové stopy při cestě mravenců od nalezené potravy zpátky k mraveništi. Mravenci se pohybují nahodile a jakmile některý narazí na zdroj potravy vrací se stejnou cestou zpět. Tuto cestu značí feromonovou stopou. Pokud ostatní mravenci při svém hledání na tuto cestu narazí, vydají se po ní. Čím se více mravenců pohybuje touto cestou, tím je silnější feromonová stopa. Pravděpodobnost, že se i ostatní mravenci po této cestě vydají je díky tomu větší. Ostatní nalezené cesty k potravě, které jsou delší, časem zanikají, protože feromonová stopa vyprchává, a tak dochází k jejímu zapomenutí. Vyprchávání feromonu zabraňuje předčasné konvergenci řešení pouze do jedné cesty, často lokálního extrému. Tento popsaný systém se nazývá *Ant systém*. Mravenčí algoritmus napodobuje výše popsané chování s umělými mravenci. Využívá se pro řešení problémů, které lze vyjádřit jako hledání cesty v grafu [11]. Příkladem může být plánování a hledání nekolizní cesty pro robota. Optimalizace probíhá v několika po sobě jdoucích iteracích. V každé iteraci provede daný počet mravenců své úkoly a vyhodnocují se cesty, jimiž se pohybovali. Celý proces končí splněním ukončovací podmínky, která může být např. počet iterací nebo nalezení optimálního řešení [7], [11].

2.2.5 SOMA – Samo Organizující se Migrační Algoritmus

Algoritmus SOMA vychází z genetického algoritmu. Pracuje podobně s populacemi, avšak neprobíhá u něj vytváření nových jedinců (řešení) prostřednictvím operace křížení, ale prohledávání prostoru možných řešení v tzv. *migračních kolech*. SOMA se řídí principy vycházejícími z napodobení chování inteligentních jedinců, kteří spolupracují při řešení společného problému. Samo-organizace se zde projevuje tím, že se jedinci navzájem ovlivňují při hledání lepšího řešení, dochází tak k vytváření a zanikání skupin jedinců, které putují prohledávaným prostorem. Tuto vlastnost můžeme vidět např. u smečky vlků či mravenčích kolonií. Řešení tak probíhá střídáním fází spolupráce, kdy si jedinci mezi sebou vyměňují informace a fází soutěžení o co nejlepší zdroj potravy. Takto se řešení opakuje, dokud nejsou všichni u nejlepšího zdroje potravy. Nejvíce používaná je strategie *AllToOne*, tedy *Všichni k jednomu*. Více o strategiích tohoto algoritmu lze nalézt v [6].

Na rozdíl od genetického algoritmu dokáže SOMA rychleji konvergovat ke globálnímu extrému. Děje se tak díky vnořenému cyklu *pertubace – migrace k vedoucímu* [14] obr. 2.8. Nevýhoda SOMA algoritmu je citlivost na nastavení řídicích a ukončovacích parametrů [6], [14]. Digram tohoto algoritmu je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 2.5: Princip SOMA- strategie AllToOne [14]

3 SEZNÁMENÍ S POUŽITÝMI PROGRAMY

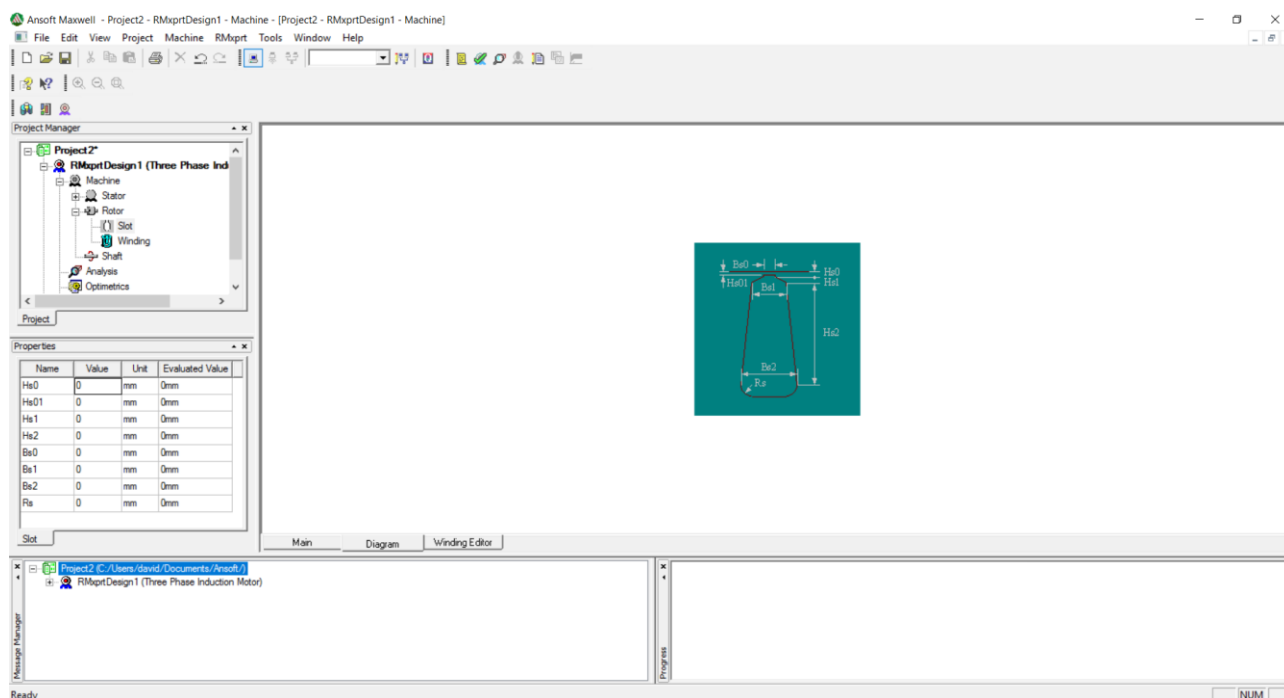
3.1 Program Maxwell

K analýze ztrát, stanovení účinnosti a charakteristik motoru byl použit program ANSYS Maxwell. Tento program se využívá k řešení 2D a 3D elektrických a magnetických polí pomocí metody konečných prvků. **Metoda konečných prvků (MKP)** je numerická metoda, která je založena na rozložení spojitého prostředí na konečný počet podoblastí (prvků). Vznikne tak síť (mesch), kde uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení. Pro jednotlivé uzly jsou sestaveny diferenciální rovnice, které jsou řešeny iteračními metodami. Z toho vyplývá, že hustota a topologie sítě nám ovlivňují kvalitu výsledků a dobu výpočtu. V programu Maxwell lze simulovat ustálený chod stroje (ozn. Magnetostatic, statická analýza magnetického pole), přechodné děje stroje (ozn. Transient, transientní analýza) nebo vířivé proudy (Eddy Current). Výsledkem transientní analýzy jsou časové závislosti jednotlivých veličin stroje (moment, proudy). Výsledkem statické analýzy jsou veličiny: moment, síla, matice indukčností. Lze také zobrazit rozložení magnetického pole ve stroji a získat tak přehled o místech, kde dochází k přesycování materiálu a díky tomu učinit konstrukční opatření [22], [23].

3.1.1 RMxpert

Součástí programu Maxwell je softwarový balík RMxpert (Rotational Machine Expert). RMxpert slouží k analytickému výpočtu parametrů točivých elektrických strojů. Je vhodný pro návrh a optimalizaci různých typů elektrických strojů. Jeho hlavní výhodou je rychlá možnost změny

a přepočtů parametrů. Další výhodou je možnost převést analyzovaný stroj do prostředí Maxwell 2D a 3D včetně geometrie, materiálů a okrajových podmínek. Geometrii 2D a 3D modelů lze také nainportovat z některého z CAD programů. V Rmxprt se postupuje tak, že se nejprve zvolí o jaký typ stroje se jedná a následně se do předdefinovaných šablon zadává geometrii statoru a rotoru, rozměry statorových a rotorových drážek, rotorové klece, rozložení statorového vinutí. Z těchto zadaných hodnot si program motor dokreslí. Dále je zapotřebí přiřadit materiály jednotlivým částem motoru. Materiály lze upravovat a zadávat jejich vlastnosti dle výrobce (BH křivku, křivku měrných ztrát). Je možné definovat rezistivitu vinutí statoru a vinutí klece rotoru. Před spuštěním analýzy je nutné zadat štitkové údaje motoru, jako jmenovitý výkon, otáčky, napětí a počet pólů. Po analýze lze zobrazit výpis všech vypočtených dat o motoru a nechat vykreslit požadované charakteristiky. Ukázka prostředí Rmxprt, konkrétně ze zadávání tvaru rotorové drážky je následujícím obrázku [22], [23].



Obr. 3.1: Ukázka prostředí Rmxprt – zadávání rozměru drážky

3.2 MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) je programové prostředí a objektově orientovaný programovací jazyk určený pro vědeckotechnické účely, výpočty, simulace, tvorbu algoritmů, analýzu dat, zpracování signálů a další. Základním datovým prvkem programu MATLAB je matice. Je možné vykreslovat 2D a 3D grafy funkcí, využívat řadu implementovaných nadstaveb tzv. „toolboxů“ nebo psát vlastní funkce do tzv. M-souborů [25].

4 OPTIMALIZOVANÝ STROJ

Optimalizovaným stojem je asynchronní motor od firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. Jedná se o třífázový, dvoupólový motor o jmenovitém výkonu 600 W. Šítkové parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4.1: Šítkové parametry motoru

Parametry	
Jmenovitý výkon P_2	0,6 kW
Jmenovité napětí U_1 - zapojení do Y	340-460 V
Jmenovitý proud statoru I_1	1,6 A
Jmenovité otáčky n	2830 ot/min
Účinník $\cos\varphi$	0,83
Frekvence f_1	50 Hz
Stupeň krytí	IP 56
Třída izolace	F

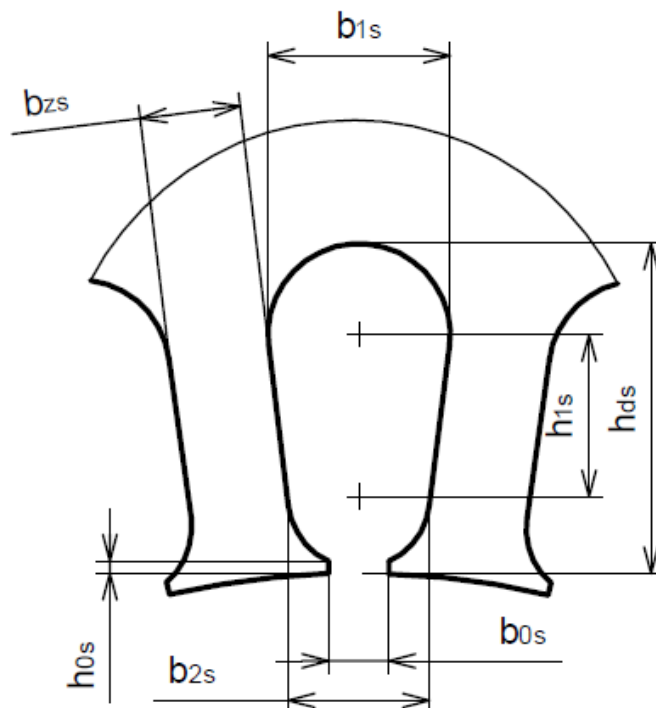
Při analýzách i měření byla použita jmenovitá velikost napájecího napětí 400 V. Vinutí je zapojeno do hvězdy. Magnetický obvod statoru i rotoru je sestaven z plechů M700-50A. Tyto plechy mají tloušťku 0,5 mm. Katalogové údaje jsou uvedeny v [21]. Jejich magnetizační charakteristika a křivka měrných ztrát je uvedena na Obr. 5.3 a Obr. 5.4. Materiálové vlastnosti dalších částí jsou uvedeny v Tab. 4.2. Aby byl ukázán vliv technologie výroby na změnu účinnosti stoje, byly pro simulaci vytvořeny dva modely. První má kruhový tvar magnetického obvodu s vlastnostmi udávanými v katalogu, ve druhém modelu je zahrnut vliv skutečného tvaru plechu a vliv stříhu plechu na magnetické vlastnosti (kapitola 5).

Tab. 4.2: Materiálové vlastnosti nastavené při analýze v RMxpert

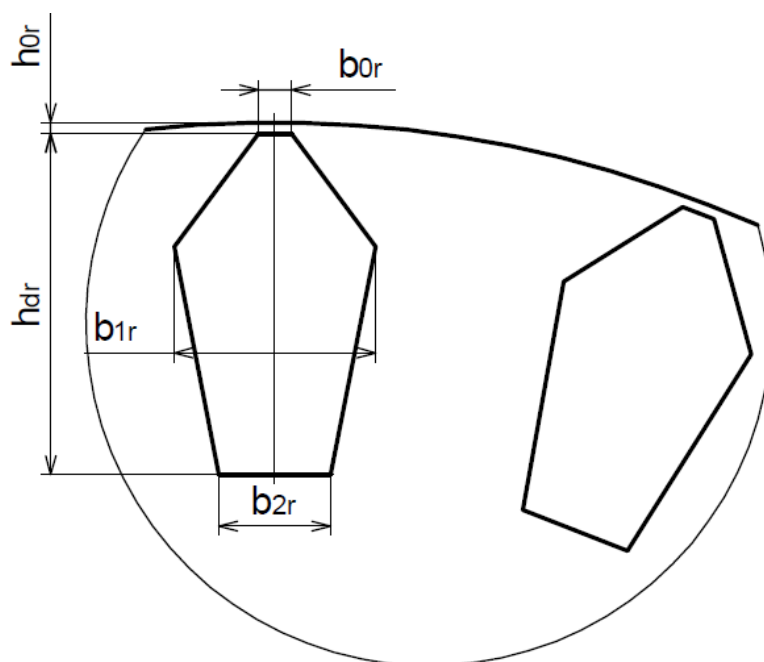
Klec rotoru - vodivost hliníku	$26,0 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
Statorové vinutí - rezistivita mědi	$17,24 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$

4.1 Statorová a rotorová drážka

Z důvodu sériové výroby motoru nemohou být uvedeny konkrétní rozměry drážek.



Obr. 4.1: Detail statorové drážky

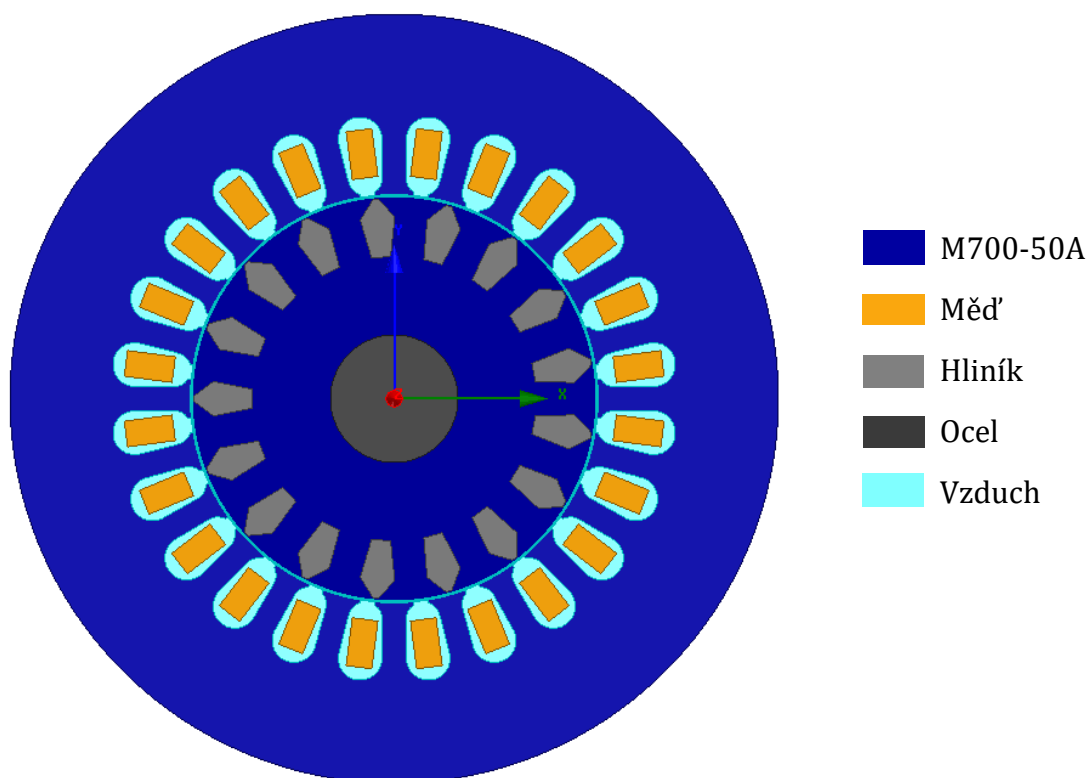


Obr. 4.2: Detail rotorové drážky

5 TVORBA MODELŮ PRO SIMULACI MKP

5.1 Model 1

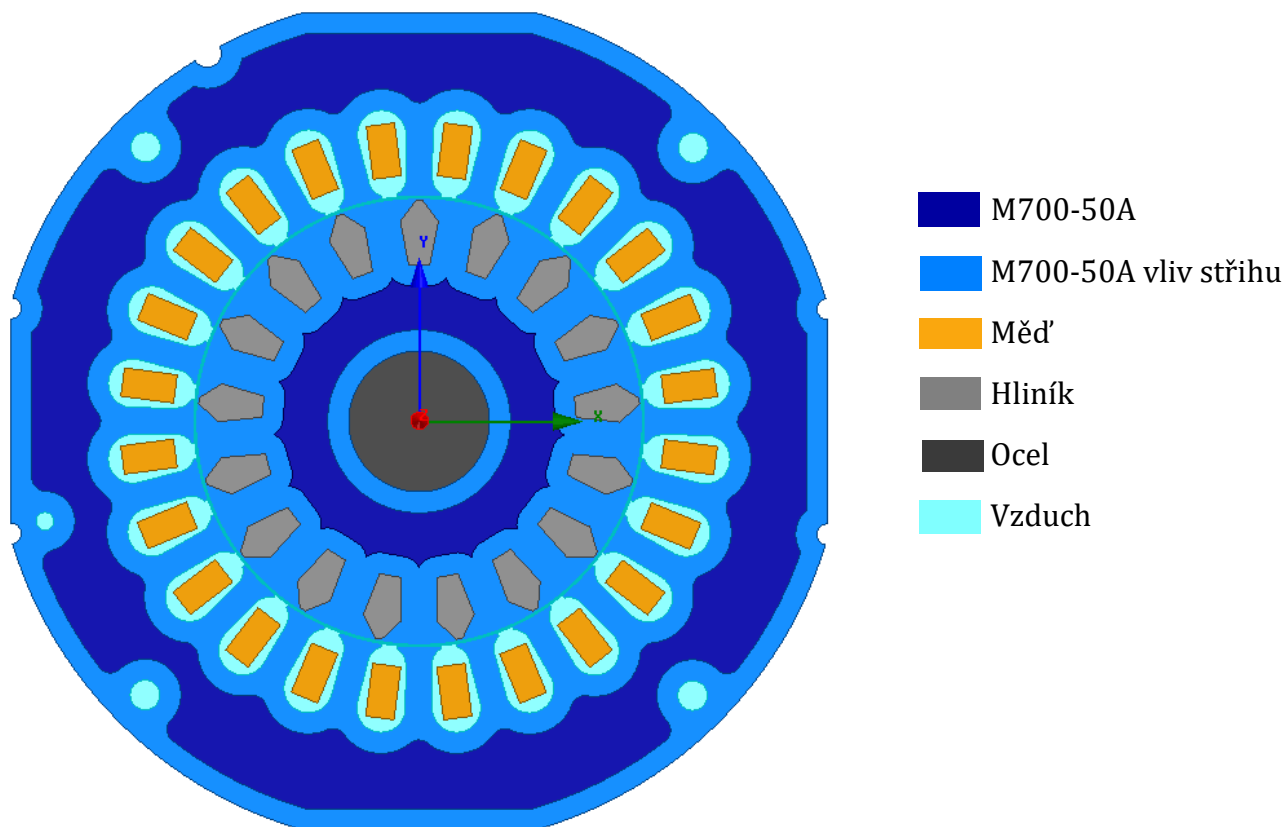
Model 1 byl vytvořen v prostředí RMXprt, ze kterého byl vygenerován 2D model pro analýzu metodou konečných prvků. Tento model je základní, má kruhový tvar statorového plechu a jeho magnetické vlastnosti jsou brány tak je uvedeno v katalogu výrobce.



Obr. 5.1: Model 1

5.2 Model 2

Statorový plech modelu 2 byl vytvořen podle výkresové dokumentace výrobce motoru. Na rozdíl od modelu 1 jsou zde čtyři zkosení, pět polokruhových výsečí a pět otvorů, z nichž čtyři jsou určeny pro nýty, které spojují svazek plechů magnetického obvodu statoru. V důsledku těchto konstrukčních úprav je plocha plechu modelu 2 menší o 4,23 % než plocha modelu 1. Oblast nýtů je nahrazena vzduchem. Z důvodu sériové výroby nejsou uvedeny konkrétní rozměry. U tohoto modelu je navíc uvažován vliv stříhu, který zhoršuje magnetické vlastnosti plechu. Vliv stříhu je zahrnut jak u statoru tak i rotoru a je simulován v okolí hran oblastí o šířce 3 mm, ve které jsou nastavené horší materiálové vlastnosti (BH křivka a křivka měrných ztrát).



Obr. 5.2: Model 2

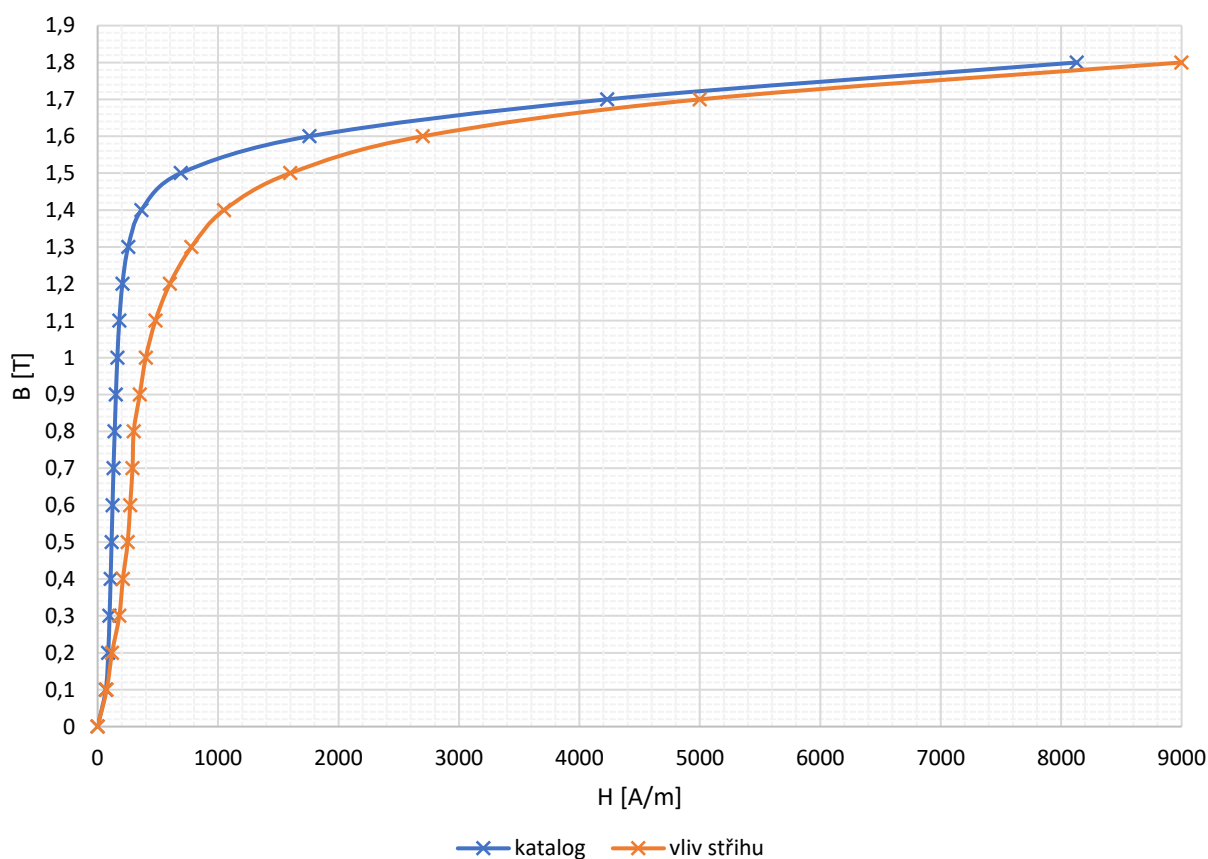
5.2.1 Vliv stříhu

Stříhání, děrování neorientovaných křemíkových elektrotechnických ocelí výrazně ovlivňuje jejich magnetické vlastnosti v blízkosti stříhu. Po stříhu dochází k lokální plastické deformaci a vnitřnímu pnutí v materiálu, a tím dochází ke změně magnetických vlastností v okolí stříhu. Vzhledem k tomu, že ovlivněná oblast stříhem se nachází převážně v okolí kritických částí stroje (zuby, vzduch mezera), právě tento lokální účinek může mít výrazný dopad na chování strojů, které nedosahují velký rozměrů. Takové stroje mohou mít vlivem stříhu ovlivněnou celou šířku zubů [30], [31].

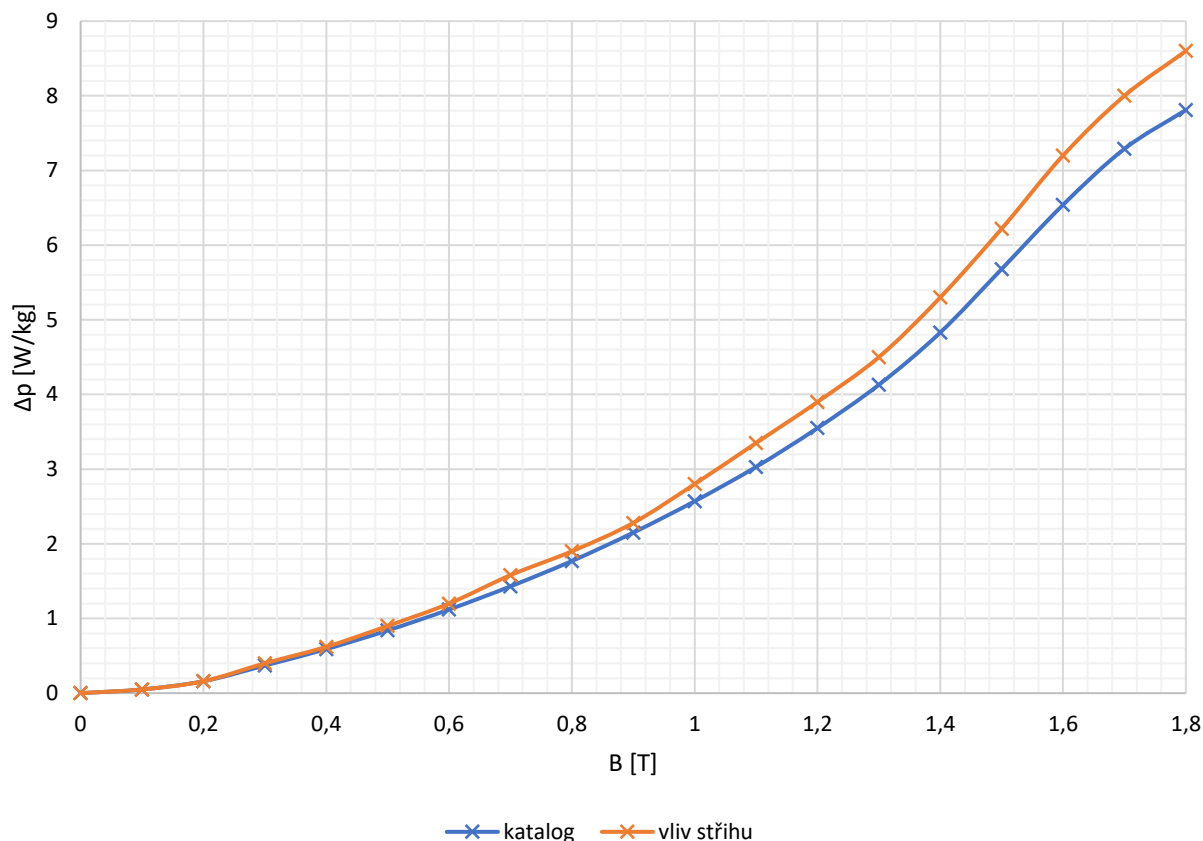
Například článek [31] potvrzuje na základě měření před a po stříhu plechu zhoršení rozložení magnetické indukce v oblastech stříhu. V této oblasti dochází ke snížení magnetické indukce a zvýšení měrných ztrát. Zde provedené experimenty zjistily ovlivnění materiálu do vzdálenosti až 10 mm od okraje stříhu. Největší je změna vlastností těsně u hrany a od ní se postupně zmenšuje. Zhoršení je výrazné zejména do 5 mm od stříhu. Dále bylo v této práci zjištěno, že výsledná degradace může být téměř zcela odstraněna procesem žíhání po vystřížení plechů [31]. Proces žíhání plechů je však technologicky náročný proces prodražující výrobu. Různé technologie výroby a různé podmínky při výrobě však mohou mít odlišný vliv na vlastnosti plechů. To může být důvod, proč jiné odborné studie uvádí jinou šířku ovlivněné oblasti.

Největší změna vlastností je tedy těsně u hrany stříhu a od ní se postupně zmenšuje. Aby bylo ale možné toto ovlivnění magnetických vlastností modelovat, byla v modelu 2 vytvořena

diskrétní oblast podél hrany stříhu o šířce 3 mm, ve které byly odhadnuty magnetické vlastnosti ovlivněné stříháním na základě studií v [31], [32], [33]. V těchto zdrojích jsou dle metody měření zjištěny výsledky šířky poškozené oblasti 1,5 až 3 mm. Jedná se o šířku diskretní oblasti, ve které jsou pro simulaci MKP nastaveny konstantní vlastnosti. V reálném prostředí stříhu dochází však k postupné změně vlastností. Zde byl nastaven jiný průběh BH křivky a křivky měrných ztrát. Jak vyplývá z [31], [33] nejvíce ovlivněná oblast BH křivky je v oblasti jejího kolene. Při malém a velké indukci k tak velkému rozdílu nedochází. Degradace BH křivky se projevuje zvýšením magnetizačního proudu, což vede ke zvýšení ztrát ve vinutí statoru a snížení účinníku [2]. Ke změně křivky měrných ztrát dochází výrazněji až při vyšší hodnotě magnetické indukce. Porovnání průběhu BH křivky a křivky měrných ztrát uvedených v katalogu výrobce s odhadem jejich průběhu vlivem stříhu je uvedeno na Obr. 5.3 a na Obr. 5.4.



Obr. 5.3: Porovnání magnetizační křivky uvedené v katalogu [21] s odhadnutou křivkou poškozenou vlivem stříhu [31], [2]



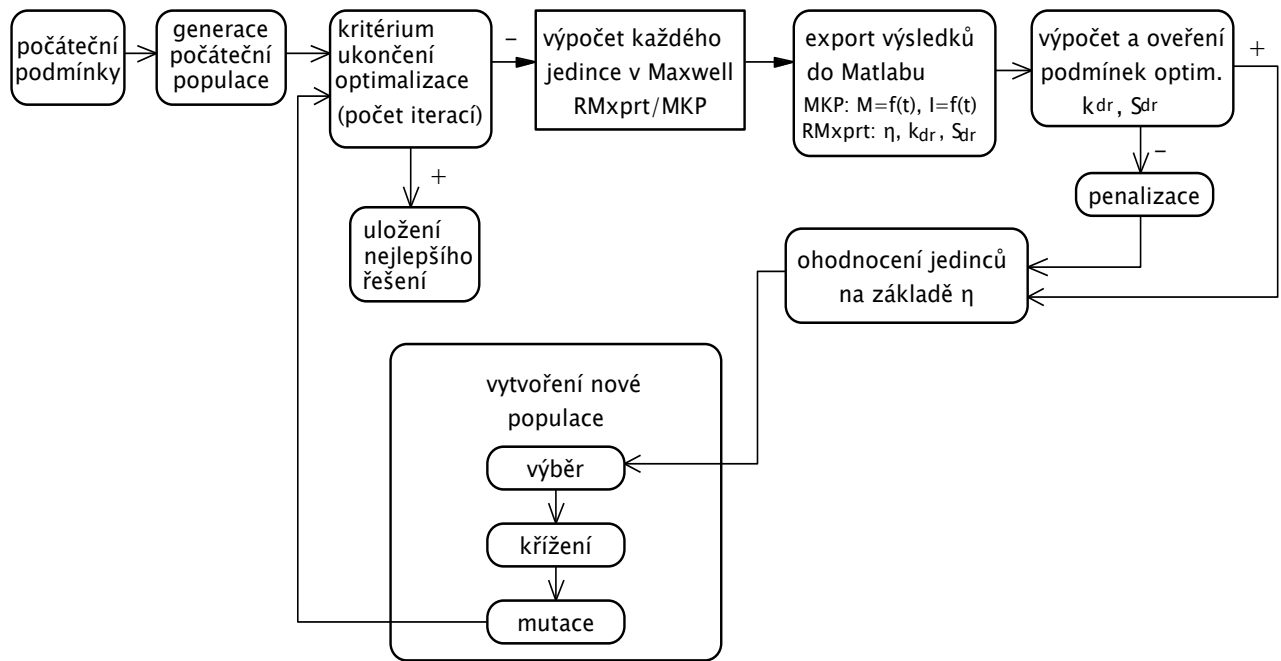
Obr. 5.4: Porovnání křivky měrných ztrát uvedené v katalogu [21] s odhadnutou křivkou poškozenou vlivem stříhu [31], [2]

6 POSTUP OPTIMALIZACE TVARU DRÁŽEK

K optimalizaci tvaru statorové a rotorové drážky asynchronního motoru byl použit genetický algoritmus (GA). Tento algoritmus byl naprogramován v prostředí MATLAB a díky spojení s programem Maxwell byla celá optimalizace prováděna. Podklady pro sestavení algoritmu byly čerpány z literatury [26] (*Practical Genetic Algorithms* - Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt).

Cílem optimalizace bylo dosažení co nejvyšší účinnosti při dodržení určitých podmínek vyplývajících především z vyrobitelnosti stroje. Před započatím optimalizace se předpokládalo snížení plochy statorové drážky, tedy zvýšení plnění drážky. Maximální přípustný činitel plnění byl po dohodě s výrobcem stanoven 0,35. Při vyšším činiteli plnění by již nebylo možné zaručit uložení daného počtu vodičů včetně izolace do prostoru drážky. Podmínkou bylo také na zachování stejného průřezu statorového vodiče. Dále bylo snahou, aby stěny zubů byly rovnoběžné a bylo tak zajištěno stejné syčení v průřezu zubu. U rotorové drážky bylo podmínkou zachování původní plochy drážky v toleranci $\pm 5\%$.

Princip fungování genetického algoritmu je vysvětlen v kapitole 2.2.1. Průběh optimalizace je znázorněn na následujícím diagramu.



Obr. 6.1: Diagram fungování optimalizace

Genetický algoritmus použitý pro optimalizaci pracuje s celými čísly. Vytvoření jedinci populace obsahují dílčí rozměry satorové a rotorové drážky. Tyto rozměry jsou v počátku náhodně generovány v rozmezí dané horní a dolní hranicí. Tím je zajištěno uvažování jen reálných rozměrů částí drážek. Po vygenerování populace jedinců obsahujících parametry drážek je každý jedinec odeslán do programu Maxwell, zde je spuštěna analýza. Do programu MATLAB se zpátky vrací vypočtené parametry motoru při dané kombinaci rozměrů drážek (daných jedinců). Z analytického výpočtu v RMxprt je to přímo hodnota účinnosti a další hodnoty nutné pro kontrolu stanovených podmínek, např. činitel plnění. Z transienční analýzy MKP získáme průběhy momentu a proudů v závislosti na čase. Průběhy $M = f(t)$ a $I = f(t)$ jsou exportovány do Matlabu a výpočtem je určena účinnost (viz kapitola 6.2). Z rozměrů drážky se pro kontrolu vypočítá činitel plnění k_{dr} a plocha rotorové drážky S_{dr} . V případě nesplnění podmínek na k_{dr} nebo S_{dr} je daný jedinec penalizován (je u něj snížena hodnota vypočtené účinnosti). Dále jsou jednotliví jedinci ohodnoceni dle vypočtené účinnosti. Na základě toho je stanovena jejich pravděpodobnost výběru pro proces křížení. V daném genetickém algoritmu je použit *ruletový mechanismus selekce* s pravděpodobností výběru jedince přímo úměrnou jeho ohodnocení. Jedinci s vyšším ohodnocením, tedy s vyšší účinností mají větší šanci být vybráni pro proces *křížení*. Více o ruletovém mechanismu selekce je uvedeno v [9]. V procesu křížení je v daném algoritmu využito základního způsobu, tj. *jednobodového křížení*. Od náhodně vygenerovaného bodu křížení si vybraní jedinci mezi sebou vymění své geny, tedy některé parametry drážky. Po tomto procesu následuje ještě proces *mutace*. Ten spočívá v tom, že je náhodně vybrána pozice v matici (populaci) jedinců. Na tuto pozici je znovu vygenerován parametr drážky ve stanovených mezích. Po těchto procesech: ohodnocení, výběr, křížení a mutace, vzniká nová generace jedinců (potomci), která nahrazuje starou generaci (rodiče). Následně program běží v cyklu a hledá se vždy nejlepší výsledek v každé iteraci. Program je ukončen po dosažení předem stanoveného počtu iterací.

6.1 Optimalizace s využitím programu RMxpert

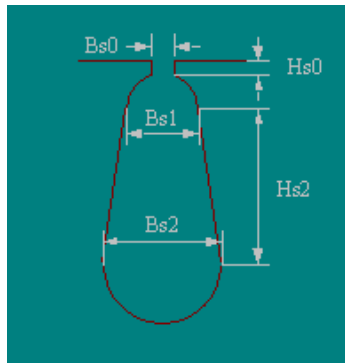
Pro optimalizaci bylo nutné propojit programy RMxpert a MATLAB, tak aby genetický algoritmus běžící v prostředí MATLAB mohl posílat parametry drážek do programu RMxpert, kde došlo k analytickému výpočtu motoru s daným tvarem drážky. Vybrané výsledky výpočtu byly následně odeslány zpět do prostředí MATLAB pro další zpracování. Program Maxwell umožňuje zaznamenat změny při práci v programu do skriptu (Tools – Record Script To File), díky tomu je propojení obou programů snadnější. Vzniklý skript je v jazyce Visual Basic, a je tedy nutné ho přepsat do jazyku MATLAB, k tomu posloužily podklady uvedené v [27]. Níže uvádím příklad propojení obou programů včetně změny parametru jednoho segmentu a příkazu pro spuštění analýzy.

```
%% Propojení RMxpert a MATLAB
```

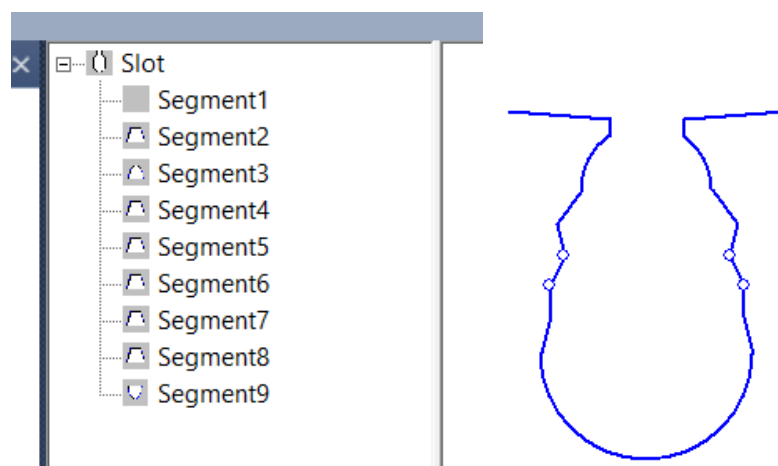
```
iMaxwell=actxserver('AnsoftMaxwell.MaxwellScriptInterface');
Desktop=iMaxwell.GetAppDesktop();
Desktop.RestoreWindow;
Desktop.OpenProject('C:/GA/abc.mxl');
Project = Desktop.SetActiveProject('abc');
Design = Project.SetActiveDesign('aaa');
Editor = Design.SetActiveEditor('Machine');
invoke(Editor,'ChangeProperty',{ 'NAME:AllTabs', { 'NAME:UserDefSlotSegment',
{ 'NAME:PropServers',
'Rotor:UserDefSymmetricSlot:UserDefSlotSegment:ID_1106'}, { 'NAME:ChangedProps',
{ 'NAME:End width', 'Value:=' , [num2str(0), 'mm']} }}}});
Design.Analyze('Setup1');
```

6.1.1 Optimalizace statorové drážky

Nejprve byla optimalizována samostatně drážka statoru. Původní drážka měla činitel plnění 0,3 (viz kapitola 1.5.3). Maximální přípustné plnění bylo po poradě s výrobcem stanoveno 0,35. Z původní drážky statoru byly zachovány rozměry otevření drážky ozn. B_{s0} a výška otevření drážky H_{s0} . Postupovalo se tak, že nejprve byla optimalizace provedena pro předdefinovaný typ drážky v programu (Obr. 6.2). Optimalizace probíhala pouze při změně tří rozměrů: B_{s1} , B_{s2} a H_{s2} . To se jevilo jako nedostatečné, a proto se přistoupilo k rozdělení drážky na několik segmentů (Obr. 6.3). Rozdělení drážky na segmenty je jednou z funkcí RMxpertu, díky tomu lze získat větší variabilitu tvaru drážky.



Obr. 6.2: Definovaný tvar drážky v RMxpert

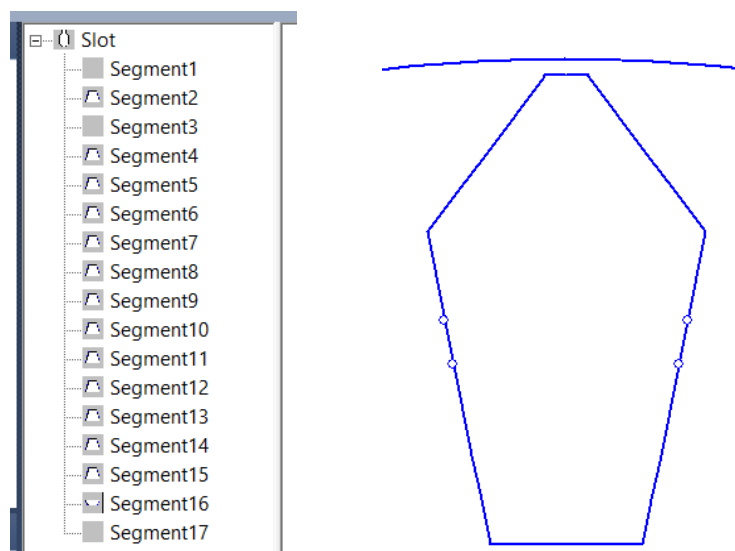


Obr. 6.3: Rozdělení statorové drážky na segmenty

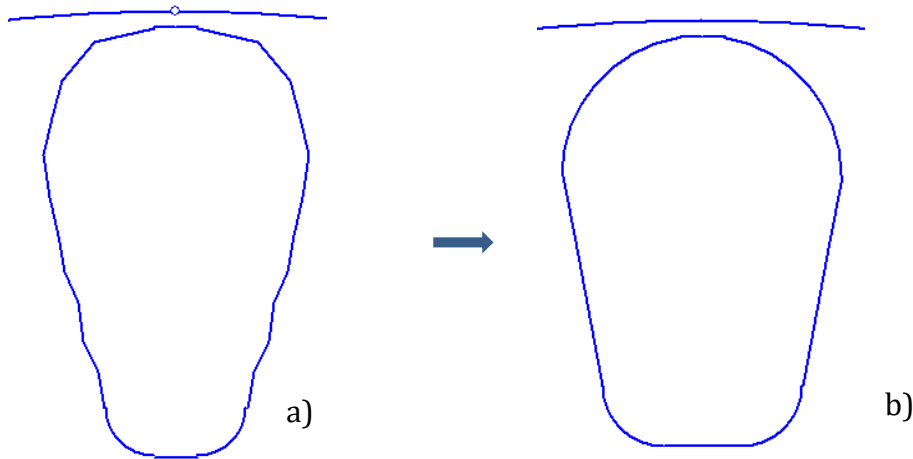
Aby měla drážka plynulý tvar a bylo zajištěno stejné sycení v průřezu zubu, což bylo jednou z počátečních podmínek, nastavily se u středových lichoběžníkových segmentů rovnoběžné stěny zubu (funkce *Paralell tooth*). Ve výsledku se segmenty ve středové části zjednodušily na jeden segment a měnil se jen průměr zaoblených segmentů a výška středové části.

6.1.2 Optimalizace rotorové drážky

U rotorové drážky se optimalizace prováděla za podmínky dodržení přibližně stejné plochy drážky (tolerance $\pm 5\%$) a podmínky na rovnoběžnost stěn zubů. Původní rotorová drážka byla rozdělena na segmenty, tak jak je znázorněno na Obr. 6.4. Nejprve se nastavil velký rozsah rozměrů jednotlivých segmentů, aby se získal přehled o tvarech s lepší účinností. Po několika spuštění optimalizačního programu měla výsledná nejlepší řešení širokou vrchní část drážky viz Obr. 6.5 a). Proto se do této oblasti přidalo více segmentů. Následně pro plynulý tvar drážky byly segmenty nahrazeny půlkruhovým segmentem a střední část se opět zjednodušila na jeden segment, dále byla nastavena funkce na rovnoběžné stěny zubů Obr. 6.5 b).



Obr. 6.4: Rozdělení rotorové drážky na segmenty



Obr. 6.5: a) průběžné výsledky rotorové drážky, b) zjednodušení na menší počet segmentů

Jako poslední byla optimalizace provedena pro obě drážky současně v jednom genetickém algoritmu. Při tom se využito již poznatků o rozvržení a počtu segmentů satorové a rotorové drážky z předešlých optimalizací.

6.2 Optimalizace s využitím MKP

Při optimalizaci tvaru drážek s využitím simulace metodou konečných prvků byly použity dva modely. Tyto modely jsou uvedené v kapitole 5. Pro simulaci MKP byla zvolena transientní analýza s krokem 0,01 ms do doby 120 ms. Transientní neboli přechodná analýza nám simuluje rozběh stroje. Tento typ analýzy je přesnější, ale časově náročnější. Jejím výstupem jsou průběhy fázových proudů a průběh momentu v závislosti na čase. Z ustáleného stavu těchto průběhů byl vypočten příkon, výkon a následně stanovena účinnost. Pro porovnání byly ještě určeny další veličiny, které jsou přímo porovnatelné s měřením, jde o celkové ztráty, ztráty ve vinutí satoru, moment a satorový proud.

Příkon

$$P_1 = \frac{1}{T} \int (u_1(t)i_1(t) + u_2(t)i_2(t) + u_3(t)i_3(t))dt \quad [\text{W}] \quad (6.1)$$

Výkon

$$P_2 = \frac{1}{T} \int (M(t)\omega)dt \quad [\text{W}] \quad (6.2)$$

Účinnost

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad [-] \quad (6.3)$$

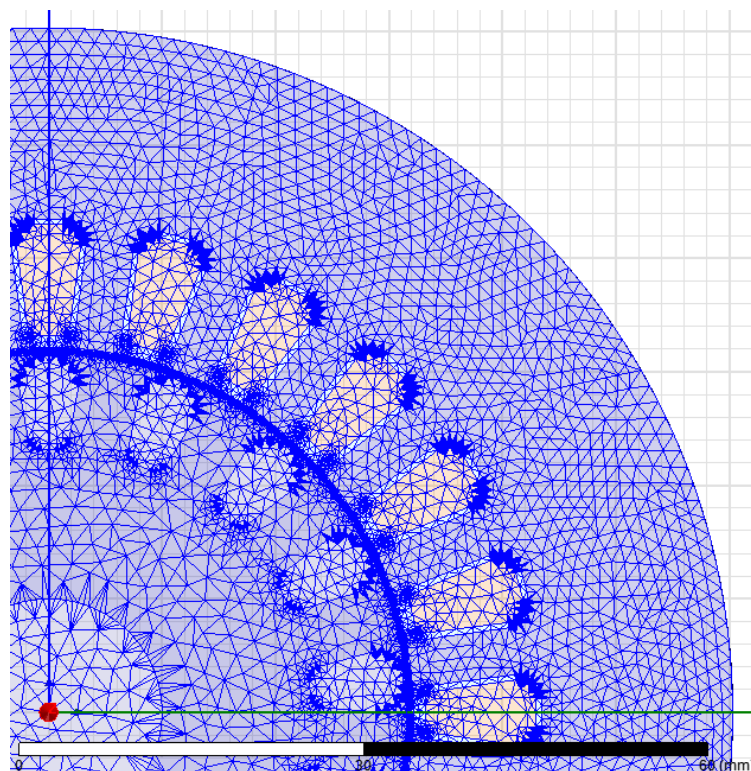
Celkové ztráty

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad [\text{W}] \quad (6.4)$$

Ztráty ve vinutí satoru

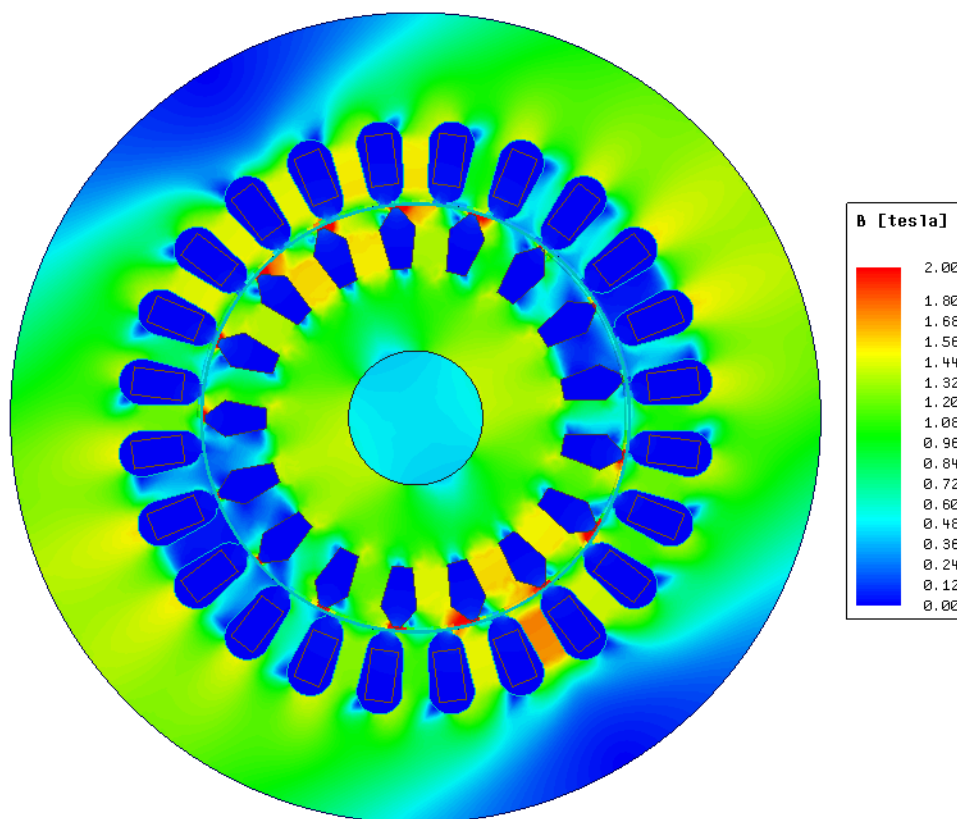
$$\Delta P_{j1} = 3R_1 I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (6.5)$$

Přesnost výsledků metodou konečných prvků závisí na hustotě a rozložení prvků sítě (mesh). V důležitých částech stroje jako je vzduchová mezera a okolí zubů byla nastavena mnohem hustší síť než v ostatních částech stroje. Vzduchová mezera byla rozdělena na tři vrstvy tak, aby se dosáhlo tří elementů sítě nad sebou. Celkový počet elementů u každého modelu se pohyboval okolo 50 tis. Vzhledem k lichému počtu rotorových tyčí nebylo možné simulovat pouze polovinu stroje (jeden pól). To je běžný přístup, který vede ke zkrácení výpočetního času.

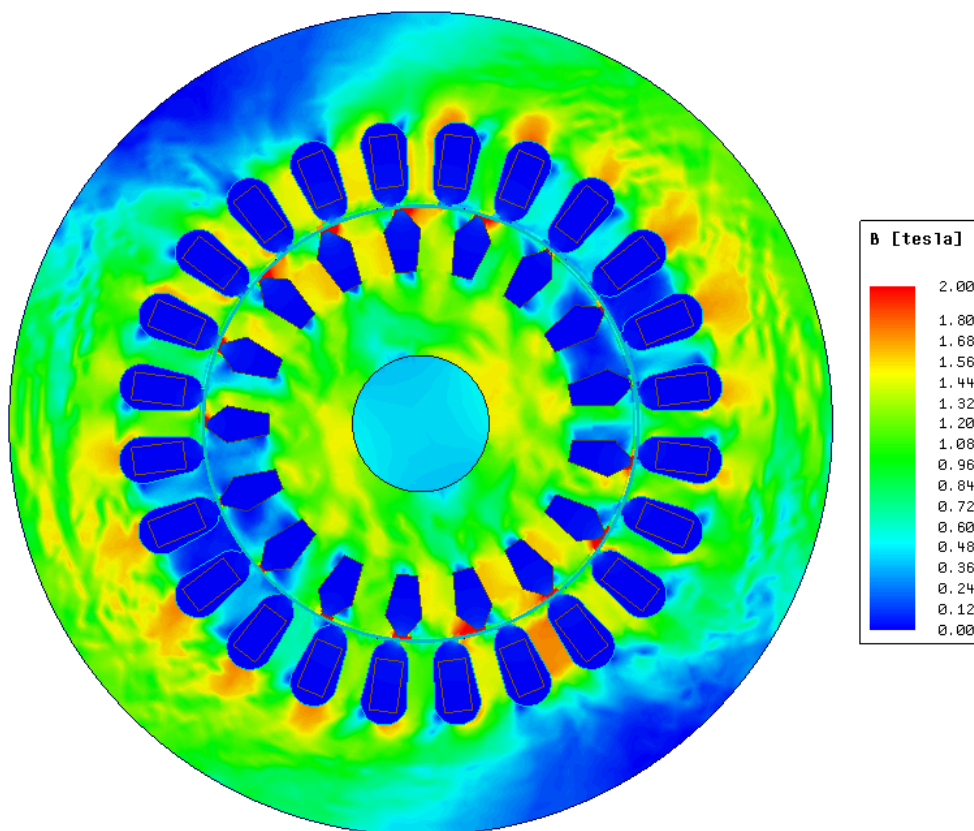


Obr. 6.6: Detail rozložení prvků sítě MKP

Počet elementů sítě a doba analýzy nám ovlivňuje časovou náročnost výpočtu. Celkovou dobu optimalizace pak ovlivňuje počet iterací a množství jedinců v populaci daného genetického algoritmu. Doba výpočtu také ovlivňuje, zdali je v modelu uvažován vliv ztrát v železe na rozložení magnetického pole. Zahrnutí tohoto vlivu přispívá k získání přesnějších výsledků, avšak při jeho uvažování narůstá výrazně doba výpočtu. Proto při optimalizaci nebyl tento vliv uvažován, zahrnut byl až pro obdržení výsledku. Rozdíl mezi uvažováním a neuvažováním vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole je možné pozorovat na obrázcích níže (Obr. 6.7 a Obr. 6.8). Zde je zachyceno rozložení magnetického pole v řezu stroje v ustáleném stavu při jmenovitém zatížení. Při neuvažování tohoto vlivu je magnetické indukce rovnoměrně a pravidelně rozložena. Porovnání výsledků při uvažování a neuvažování vlivu ztrát na magnetické pole při simulaci původních modelů se uvádí v Tab. 8.8. Celkové ztráty se liší o necelých 28 W. Rozdíl v účinnosti při uvažování/neuvažování vlivu ztrát na rozložení magnetického pole zde představuje přibližně 3 %.



Obr. 6.7: Rozložení magnetické indukce v motoru při neuvažování vlivu ztrát v železe na magnetické pole (ustálený stav, jmenovité zatížení)



Obr. 6.8: Rozložení magnetické indukce v motoru při uvažování vlivu ztrát v železe na magnetické pole (ustálený stav, jmenovité zatížení)

Metoda konečných prvků je co do času a potřeby výpočetního výkonu velmi náročná metoda pro využití při optimalizaci elektrických strojů. Celá optimalizace může zabrat několik dní. Mnohem přívětivější způsob řešení je při využití analytického výpočtu současně s MKP. Pro získání přehledu a přibližného tvaru drážek s lepší účinností lze provést rychlou optimalizaci s analytickými výpočty v RMxpřtu. Následně již s doporučeným tvarem drážky provést optimalizaci s využitím MKP, kde již poté není nutné prohledávat širokou oblast řešení, ale zaměřit se podrobněji na tvar doporučený z výpočtů v RMxpřtu. Takto lze efektivně dosáhnout poměrně dobrých výsledků optimalizace v přijatelném čase. Je nutné si uvědomit, že optimalizace není otázkou jednoho spuštění optimalizačního algoritmu. Optimální řešení se většinou najde až po několikátém spuštění, proto není vhodné zpočátku provádět optimalizaci MKP, ale časově rychlým analytickým výpočtem.

7 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE TVARU DRÁŽEK

Jako optimalizační algoritmus byl použit genetický algoritmus, který běžel v prostředí MATLAB. Optimalizace byla provedena nejprve s využitím analytického výpočtu v programu RMxpřt a poté metodou konečných prvků v programu Maxwell. Tato kapitola shrnuje dosažené výsledky.

7.1 Výsledky optimalizace analytickým výpočtem v RMxpřt

Časová náročnost optimalizace analytickým výpočtem v RMxpřt je řádově několik minut, v závislosti na počtu iterací. To je hlavní výhoda tohoto způsobu výpočtu při optimalizaci tvaru drážek. Výsledky v Tab. 7.1. jsou pro porovnání uvedeny pro stejné otáčky motoru, které byly změřeny při jmenovitém zatížení (2,03 Nm) $n = 2849$ ot/min.

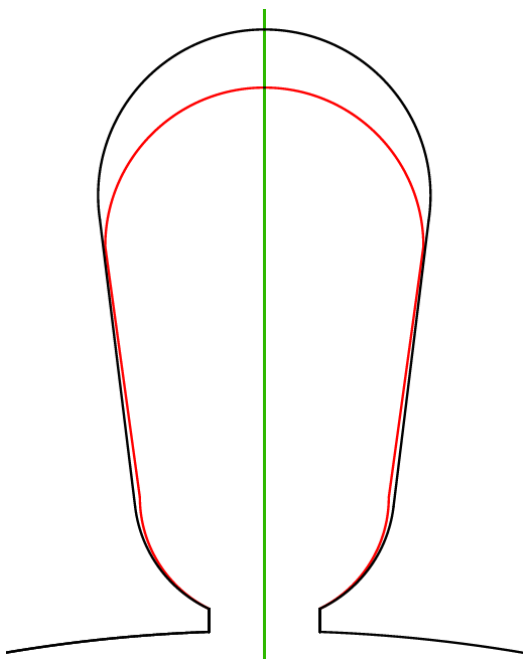
Tab. 7.1: Výsledky optimalizace v RMxpřt

	Původní tvar drážek	Optimalizace pouze statorové drážky	Optimalizace pouze rotorové drážky	Optimalizace obou drážek	Měření
Účinnost η [%]	78,51	78,99	79,19	79,68	78,79
Účinník $\cos\varphi$ [-]	0,8288	0,8330	0,8601	0,8648	0,7870
Ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} [W]	82,55	79,23	76,60	73,08	81,45
Ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{j2} [W]	34,99	34,72	33,94	34,02	32,96
Ztráty v železe ΔP_{FE} [W]	29,94	28,84	29,99	28,80	30,98
Mechanické ztráty ΔP_{mech} [W]	15,11	15,12	15,16	15,15	15,79
Celkové ztráty ΔP [W]	165,58	160,91	158,70	154,06	162,80
Indukce ve jhu statoru B_{js} [T]	1,398	1,335	1,392	1,325	-
Indukce ve jhu rotoru B_{jr} [T]	1,928	1,923	1,715	1,718	-
Indukce v zubu statoru B_{zs} [T]	1,553	1,448	1,569	1,475	-
Indukce v zubu rotoru B_{jr} [T]	1,616	1,628	1,534	1,532	-
Indukce ve vzd. mezeře B_δ [T]	0,672	0,677	0,679	0,686	
Statorový proud I_l [A]	1,307	1,295	1,259	1,244	1,40

7.1.1 Porovnání satorové drážky

Na obr. 7.1.1 je porovnání původního tvaru a nového optimalizovaného tvaru satorové drážky. Při optimalizaci byla dodržena podmínka na činitel plnění drážky. Ten u nové drážky vychází 0,35. Plocha se tak zmenšila o 14,5 %. Zároveň bylo dodrženo plynulého vyrobiteľného tvaru. Dále došlo k mírnému rozšíření zubu ve spodní části drážky o 6,2 % a výška drážky se zmenšila o 9,6 %. Rozměry otevření drážky b_{2s} a výška otevření drážky h_{0s} nebyly do optimalizace zahrnuty.

Účinnost motoru se při optimalizaci pouze satorové drážky zvýšila oproti původnímu tvaru o 0,48 %. Mírně se také zvýšil účinník. Jouleovy ztráty ve vinutí satoru klesly o 3,3 W a ztráty v železe o 1,1 W. Celkové ztráty se snížily oproti modelu s původním tvarem drážek o 4,7 W, to činí rozdíl 2,8 %. Indukce ve jhu satoru se díky zmenšení výšky drážky zmenšila o 4,5 %. V důsledku rozšíření zubu satoru se zmenšila indukce v zubu satoru o 6,8 %. Dále se jen nepatrně změnila indukce ve vzduchové mezeře a v zubu rotoru.



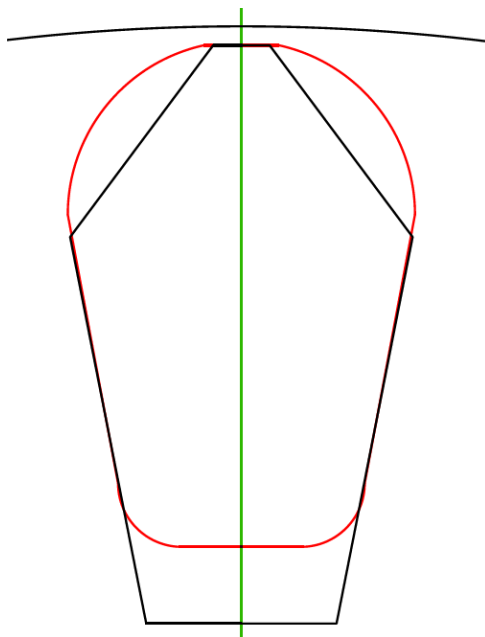
Obr. 7.1: Porovnání původní a optimalizované satorové drážky, využití RMxprt

7.1.2 Porovnání rotorové drážky

Na Obr. 7.2 je porovnání původního a optimalizovaného tvaru rotorové drážky. Podmínkou při optimalizaci bylo zachování původní plochy drážky v toleranci ± 5 %. Plocha nové drážky je menší o 0,33 %. Na výšku je drážka o 13,3 % menší.

Dle výsledků uvedených v Tab. 7.1 lze vidět, že větší vliv na zvýšení účinnosti má u tohoto stroje nový tvar drážky rotorové. Účinnost motoru se při optimalizaci pouze rotorových drážek zvýšila o 0,68 % oproti původnímu modelu. Zkrácení rotorové drážky a tedy rozšíření jha rotoru vedlo k pokles magnetické indukce v této části. To se projevilo zvýšením magnetizační reaktance, což vedlo ke snížení magnetizačního proudu. Následkem toho se zvýšil účinník, konkrétně o 3,8 %. Ztráty ve vinutí satoru byly zjištěny menší oproti původnímu

modelu o 5,95 W tj. 11,5 %. Tento výrazný pokles je způsoben menším statorovým proudem, který klesl o 0,048 A tj. 3,7 %. Ztráty ve vinutí rotoru klesly o 1,08 W tj. 2,8 %. Ostatní ztráty zůstaly téměř beze změny. Celkové ztráty se zmenšily o 6,88 W, tj o 4,2 %. Indukce ve jhu rotoru se zmenšila o 0,2 T (11 %) a to díky rozšíření jha rotoru (menší výšce drážky). Také došlo ke zmenšení indukce v zubu rotoru o 0,08 T (5 %). Nepatrně se zvýšila indukce ve vzduchové mezeře a v zubu statoru.



Obr. 7.2: Porovnání původní a optimalizované rotorové drážky, využití RMxprt

7.1.3 Porovnání optimalizace obou drážek

Jako další krok byla provedena optimalizace obou drážek současně. Při tom byly dodrženy stejné podmínky jako při optimalizaci jednotlivých drážek. Souhrnné výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.1. Při optimalizaci obou drážek současně se navržený tvar lišil zcela nepatrně od tvaru optimalizovaných drážek uvedených na Obr. 7.1 a Obr. 7.2, proto zde nejsou znova uváděny. Plocha nové drážky statoru se zmenšila o 14,7 % a plocha rotorové drážky se po optimalizaci zmenšila o 1,7 %.

Optimalizací obou drážek se dosáhlo účinnosti 79,68 %, to je o 1,17 % více než má původní model motoru. Dále došlo ke zvýšení účinníku o 4,3 %, a to díky snížení magnetizačního proudu, což je důsledek zvýšení magnetizační reaktance. Tu ovlivnilo snížení magnetické indukce ve jhu rotoru vlivem zkrácení rotorové drážky. Snížení magnetizačního proudu vedlo k poklesu celkového statorového proudu o 4,8 %, díky čemuž jsou menší ztráty ve vinutí statoru. Konkrétně se tyto ztráty snížily o 9,47 W (tj. o 11,5 %). Dále klesly ztráty ve vinutí rotoru a to o 2,8 %. Ztráty v železe se rovněž snížily, a to o 1,14 W (tj. 3,8 %), tento pokles je způsoben převážně menší indukcí v zubu statoru a jhu statoru. Celkové ztráty klesly 11,5 W tedy o 7 %. Objem zubu statoru se zmenšil a objem jha statoru se zvýšil. Indukce ve jhu statoru poklesla o 5,2 %, ve jhu rotoru klesla o 10,9 %. Indukce v zubu statoru se snížila o 5 % a v zubu rotoru klesla o 5,2 %. Indukce ve vzduchové mezeře se zvýšila o 2,1 %, to je

způsobeno nižším úbytkem napětí na statorovém vinutí v důsledku menšího statorového proudu.

7.2 Výsledky optimalizace výpočtem MKP

Optimalizace s využitím metody konečných prvků byla prováděna pro obě drážky současně. Při tvorbě drážek modelů se vycházelo již z poznatků o tvarech s lepší účinností získaných z analytického výpočtu v RMxpert. Dále byl základní tvar a s ním spojené množství optimalizovaných parametrů drážek omezen s ohledem na zvolené počáteční podmínky: reálný vyrobitelný tvar a rovnoběžné stěny zubů pro zajištění stejného sycení v průřezu zubů. Rozměr otevření drážky a výška otevření drážky zůstal zachován. Díky podmínce rovnoběžnosti zubů klesl počet optimalizovaných parametrů z 11 na 9 (některé parametry se dopočítávaly) a to vedlo ke snížení náročnosti optimalizace. Dále byla při optimalizaci nastavena nulová elektrická vodivost plechů a nastaveno neuvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole (více v kapitole 6.2). Až u konečného řešení byl proveden výpočet s uvažováním tohoto vlivu. Obě řešení jsou pro porovnání uvedena v tabulkách níže. Rozsah, v němž se generovaly počáteční parametry v genetickém algoritmu, byl zvolen s ohledem na možné rozměry drážky, plochu drážek, počet iterací a sním spojenou dobu optimalizace a další. Z logického hlediska je totiž jasné, že není nutné hledat pomocí algoritmu řešení v prostoru kde je předem jisté dosažení horších výsledků. Bylo však nutné nastavit a následně kontrolovat podmínky na činitel plnění statorové drážky (max. 0,35) a plochu rotorové drážky (tolerance $\pm 5\%$ s původní plochou).

Výsledky v následujících tabulkách jsou uvedeny pro ustálený stav motoru se jmenovitým zatížením, pro otáčky motoru $n = 2849$ ot/min.

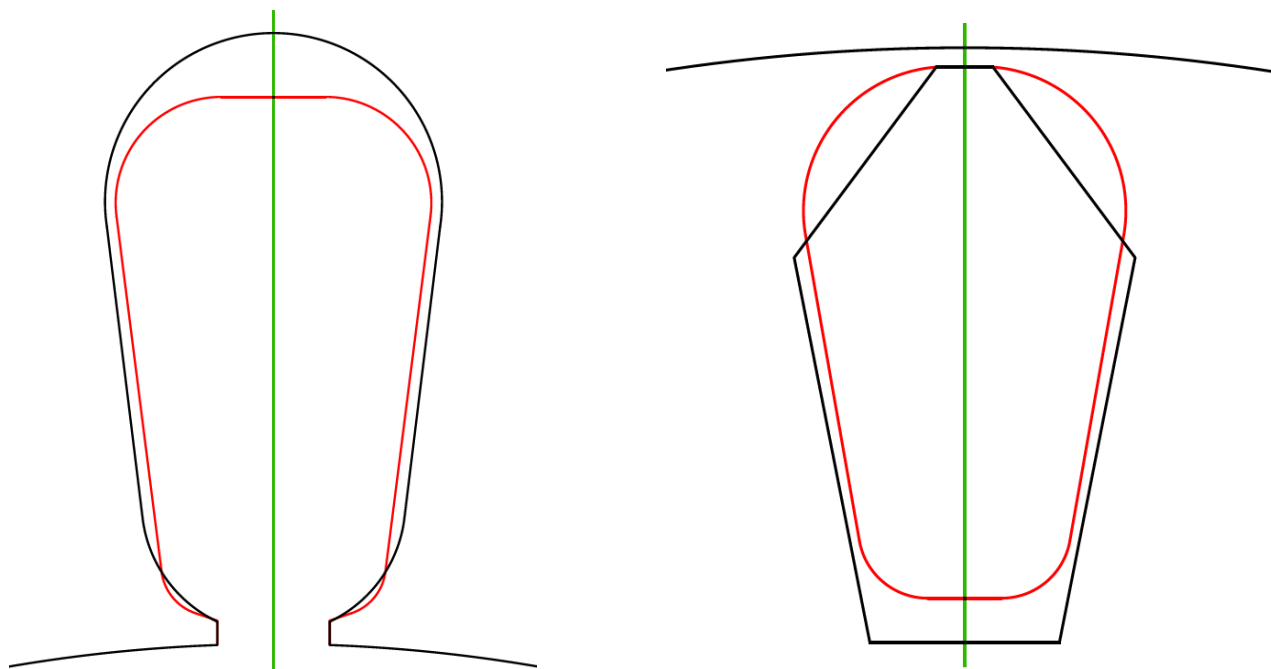
7.2.1 Výsledky pro model 1

Model 1 má kruhový tvar magnetického obvodu a jeho magnetické vlastnosti jsou nastaveny dle katalogových hodnot, viz kapitola 5.1.

Tab. 7.2: Výsledky optimalizace modelu 1 MKP

Název	Označení	Původní model 1a	Optimaliz. model 1a	Původní model 1b	Optimaliz. model 1b
Účinnost	η [%]	82,51	83,06	85,54	86,11
Celkové ztráty	ΔP [W]	143,12	130,63	116,00	104,94
Ztráty ve vinutí statoru	ΔP_{j1} [W]	74,68	65,81	72,06	63,34
Moment	M [Nm]	2,26	2,15	2,30	2,18
Statorový proud	I_1 [A]	1,34	1,26	1,32	1,24

Pozn: označení písmenem **a** - výpočet při uvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole. Písmeno **b** - výpočet bez uvažování vlivu těchto ztrát na magnetické pole.



Obr. 7.3: Porovnání původní a optimalizované drážky statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) pro model 1, využití MKP

Na Obr. 7.3 jsou k porovnání oba tvary drážky. Plocha optimalizované drážky statoru klesla o 14,8 %, činitel plnění je 0,35. Výška drážky se zmenšila o 10,4 % a její šířka o 6,3 %. U optimalizované rotorové drážky se plocha zmenšila o 2,7 %, její výška o 7,8 %.

Rozdíl v účinnost při uvažování nebo neuvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole činí přibližně 3 %. Za vypovídající a přesnější hodnotu lze považovat výsledek při uvažování tohoto vlivu. Optimalizovaný model má oproti původnímu modelu účinnost vyšší o 0,55 %. Jeho celkové ztráty jsou menší o 8,7 %. Dále má model s optimalizovanými drážkami na rozdíl od původního modelu menší jmenovitý moment o 4,9 % a satorový proud o 6 %.

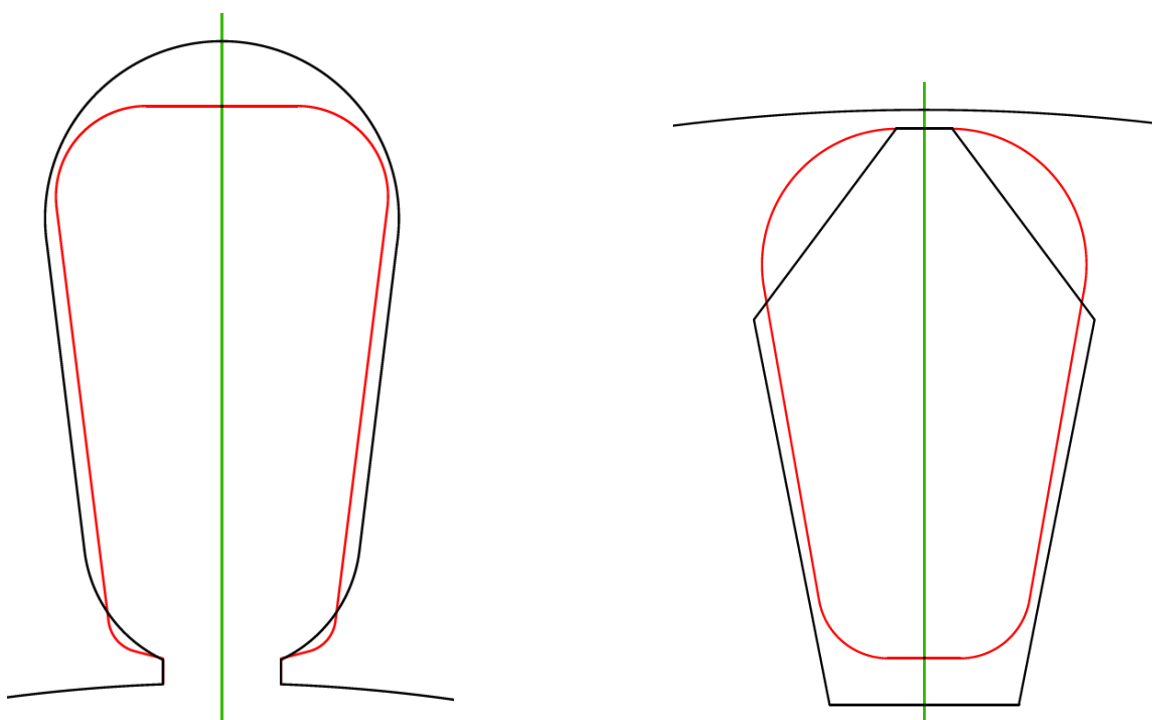
7.2.2 Výsledky pro model 2

Model 2 má skutečný tvar magnetického obvodu, a navíc je zde uvažován vliv stříhu, viz kapitola 5.2.

Tab. 7.3: Výsledky optimalizace modelu 2 MKP

Název	Označení	Původní model 2a	Optimaliz. model 2a	Původní model 2b	Optimaliz. model 2b
Účinnost	η [%]	81,90	82,45	85,10	85,62
Celkové ztráty	ΔP [W]	141,86	136,22	114,08	109,24
Ztráty ve vinutí statoru	ΔP_{j1} [W]	74,41	69,72	71,64	67,11
Moment	M [Nm]	2,15	2,15	2,18	2,18
Statorový proud	I_1 [A]	1,34	1,30	1,32	1,27

Pozn: označení písmenem **a** - výpočet při uvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole. Písmeno **b** - výpočet bez uvažování vlivu těchto ztrát na magnetické pole.

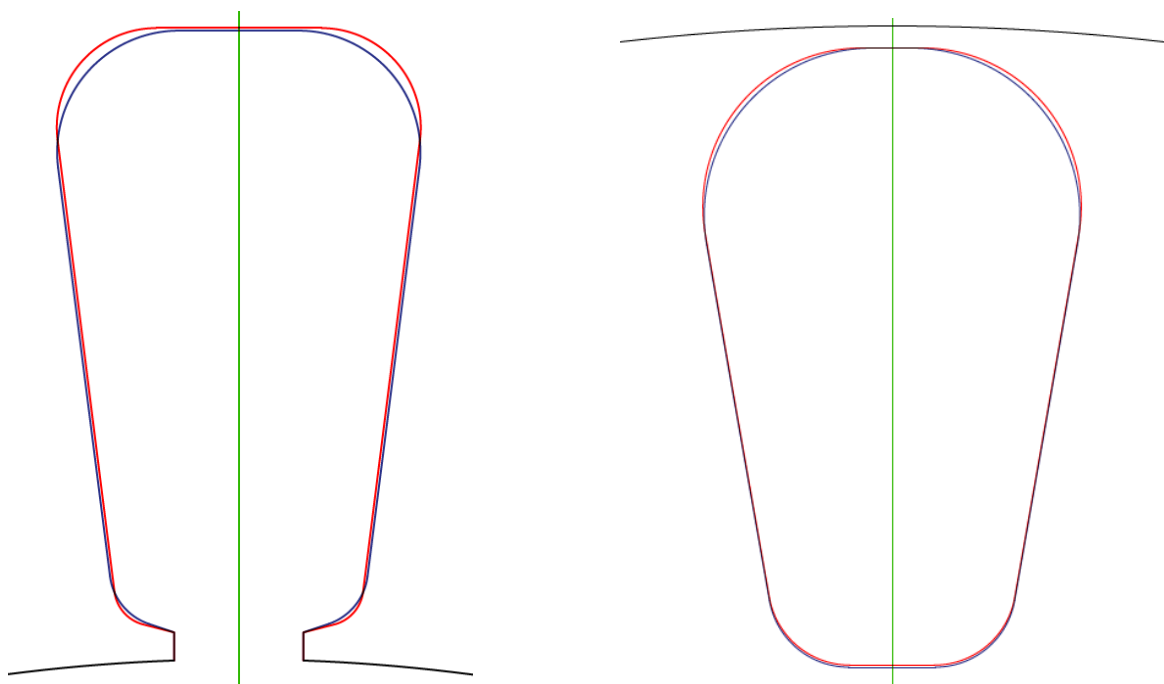


Obr. 7.4: Porovnání původní a optimalizované drážky statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) pro model 2, využití MKP

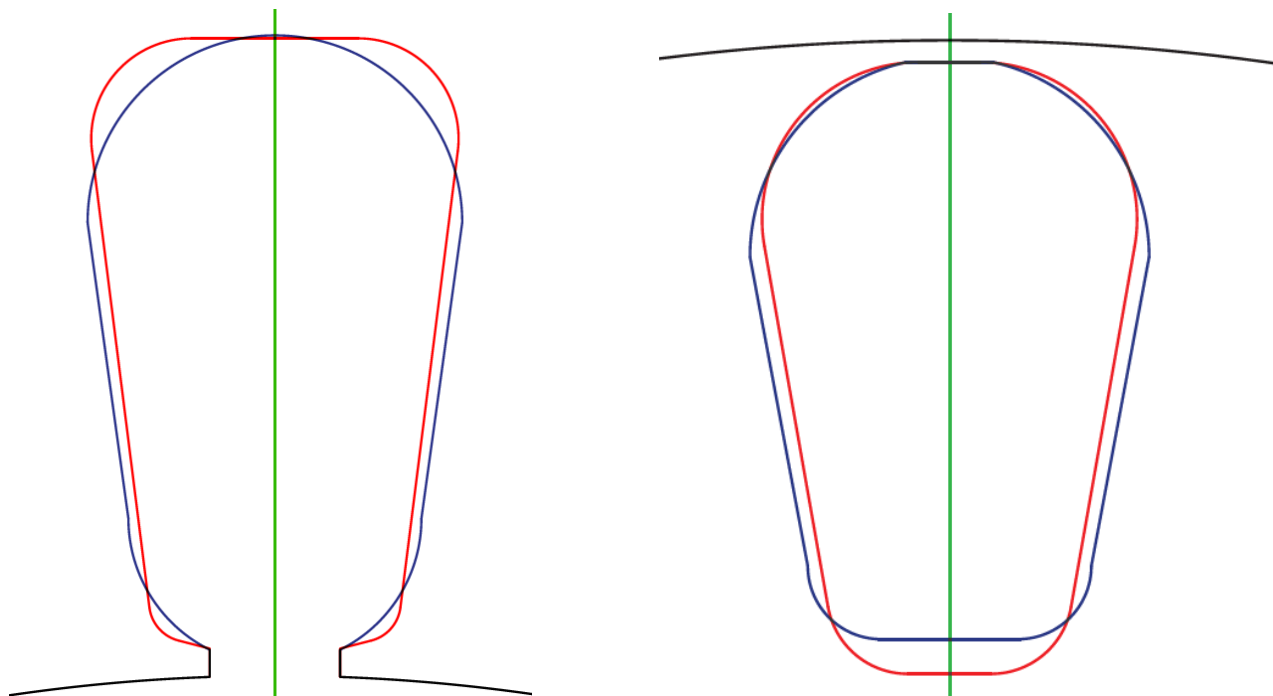
Na Obr. 7.4. jsou pro porovnání oba tvary statorové i rotorové drážky. Plocha optimalizované drážky statoru se zmenšila o 14,3 %, činitel plnění je 0,35. Výška drážky se zmenšila o 10 % a její šířka o 7,3 %. U optimalizované rotorové drážky se plocha zmenšila o 2,2 % a její výška o 8,1 %.

Rozdíl v účinnosti při uvažování nebo neuvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole činí 3,2 %. Za vypovídající a přesnější hodnotu lze považovat výsledek při uvažování tohoto vlivu. Optimalizovaný model má oproti původnímu modelu účinnost vyšší o 0,55 %, účinnost dosahuje hodnoty 82,45 %. Celkové ztráty jsou menší o 4 %. Jmenovitý moment se nezměnil. Statorový proud se u optimalizovaného modelu snížil o 3 %.

Na Obr. 7.5 jsou k porovnání uvedeny výsledné tvary drážek modelu 1 a modelu 2 ke kterým došel optimalizační algoritmus a na Obr. 7.6 je porovnání optimalizovaných drážek modelu 2 a z RMxpřtu.

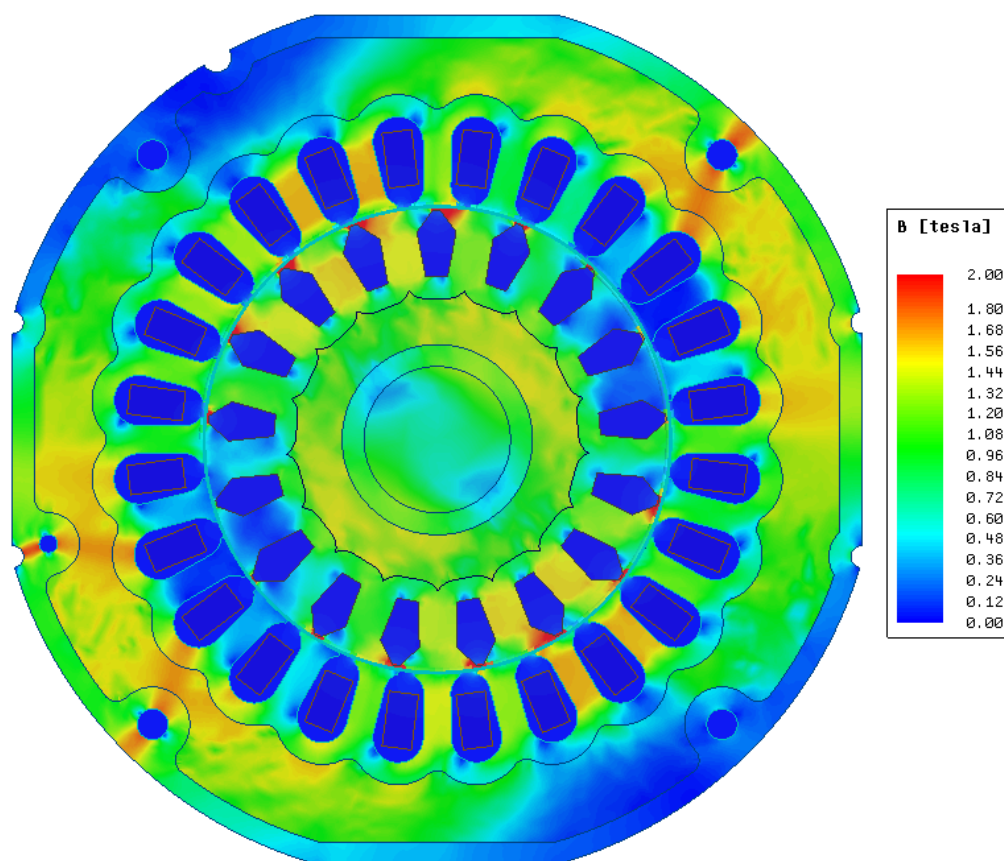


Obr. 7.5: Porovnání optimalizovaných drážek statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) modelu 1 a modelu 2

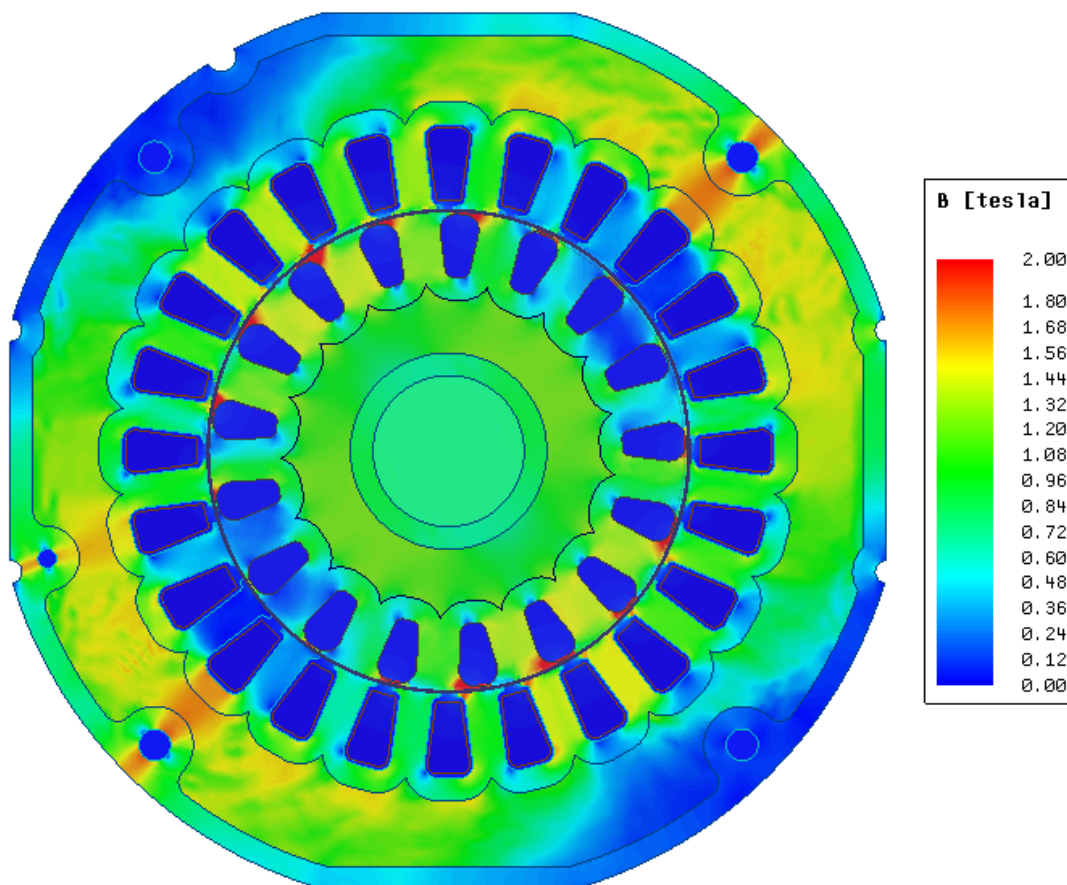


Obr. 7.6: Porovnání optimalizovaných drážek statoru (vlevo) a rotoru (vpravo) pro RMxpřt a modelu 2

Na následujících obrázcích je uvedeno rozložení magnetické indukce v řezu stroje pro původní a optimalizovaný model 2. Lze vidět, že indukce v zubech statoru i rotoru po optimalizaci drážek poklesla. Stejně tak je patrné snížení indukce ve jhu rotoru.



Obr. 7.7: Rozložení magnetické indukce v původním modelu 2



Obr. 7.8: Rozložení magnetické indukce v optimalizovaném modelu 2

8 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Účinnost motoru byla ověřena při jmenovitém momentu stroje, který byl určen ze štítku. Jeho hodnota je 2,025 Nm. Před samotným měřením běžel motor dostatečně dlouhou dobu při jmenovitém zatížení, aby se dosáhlo ustáleného oteplení motoru a byly tak napodobeny provozní podmínky. Pro motor těchto rozměrů a daného výkonu je dostačující doba pro dosažení ustáleného oteplení 2 hodiny. Pro určení jednotlivých ztrát v asynchronním motoru bylo nutné provést zkoušku naprázdno a při zatížení. Z těchto dvou zkoušek se získaly potřebné veličiny pro určení jednotlivých ztrát. Postup měření a jeho zpracování je proveden podle normy ČSN EN 60034-2-1 (350000) [24]. Výsledky měření jsou zaznamenány tak jak po sobě měření následovalo.

8.1 Odpor vinutí

Statorového vinutí je zapojeno do hvězdy. Výsledky měření odporu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 8.1: Odpor vinutí za studena a za provozního stavu

	za studena	provozní stav
$R_{U-V} [\Omega]$	24,2	28,5
$R_{V-W} [\Omega]$	22,9	26,6
$R_{W-U} [\Omega]$	23,8	27,6
$R_{AVG} [\Omega]$	23,6	27,7
$R_v [\Omega]$	11,8	13,8
$t_{okolí} [^{\circ}C]$	21,8	23,0

8.1.1 Stanovení teploty vinutí statoru

Oteplení vinutí bylo určeno tzv. Odporovou metodou. Měřením odporu za studena a po zahřátí bylo stanoveno jeho oteplení dle následujícího vztahu:

$$\Delta\vartheta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \vartheta_0) + \vartheta_0 - \vartheta_v \quad [^{\circ}C] \quad (8.1)$$

kde R_1 odpor vinutí za studena $[\Omega]$,

R_2 je odpor vinutí po zahřátí $[\Omega]$,

ϑ_0 je počáteční teplota vinutí $[^{\circ}C]$,

ϑ_v je teplota okolí při měření odporu v zahřátém stavu $[^{\circ}C]$, [18].

pozn. číslo 235 platí pro měď, pro vinutí z hliníku by se dosazovala hodnota 245.

Výpočet:

$$\Delta\vartheta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \vartheta_0) + \vartheta_0 - \vartheta_v = \frac{13,8 - 11,8}{11,8} (235 + 21,8) + 21,8 - 23 = 42,32 \text{ } ^{\circ}C$$

$$\vartheta = \Delta\vartheta + \vartheta_v = 42,32 + 23 = 65,3 \text{ } ^{\circ}C$$

Teplota vinutí statoru byla vypočtena na 65,3 °C. Jelikož motor běžel před měřením dostatečně dlouhou dobu při svém jmenovitém zatížení, dosáhl ustálené teploty. Proto můžeme tuto teplotu uvažovat pro celý motor. Do měření touto metodou je však vnesena chyba způsobena dobou, kterou trvá odpojení napájení a připojení přístroje měřicího odpor, za tuto dobu totiž dojde ke změně odporu.

8.2 Výsledky měření při jmenovitých parametrech

Motor byl před měřením uveden do provozní teploty. Pro větší přesnost se při jmenovitém momentu (2,025 Nm) provedly čtyři měření a jejich hodnoty byly zprůměrovány.

Tab. 8.2: Naměřené hodnoty ve jmenovitém bodě motoru

U_1 [V]	U_2 [V]	U_3 [V]	U [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I [A]	P_1 [W]	$\cos \varphi$ [-]	M [Nm]	n [ot/min]
400,53	401,70	401,67	401,30	1,38	1,45	1,39	1,40	767,73	0,787	2,0275	2849,13

Tab. 8.3: Vypočtené hodnoty jednotlivých ztrát ve jmenovitém bodě

s [-]	P_2 [W]	η [%]	U_r [V]	ΔP_{j1} [W]	ΔP_{FE} [W]	ΔP_{mech} [W]	ΔP_{j2} [W]	ΔP_{Lr} [W]
0,0503	604,92	78,79	375,5	81,45	30,98	15,79	32,96	1,62

8.3 Výsledky měření ze zkoušky naprázdno

Z měření naprázdno se určily ztráty v železe a mechanické ztráty. Asynchronní motor při chodu naprázdno odebírá ze sítě příkon, který v sobě zahrnuje jednak ztráty v železe ΔP_{Fe} , dále ztráty mechanické ΔP_{mech} a ztráty Jouleovy ve vinutí statoru ΔP_{j10} způsobené proudem naprázdno I_0 .

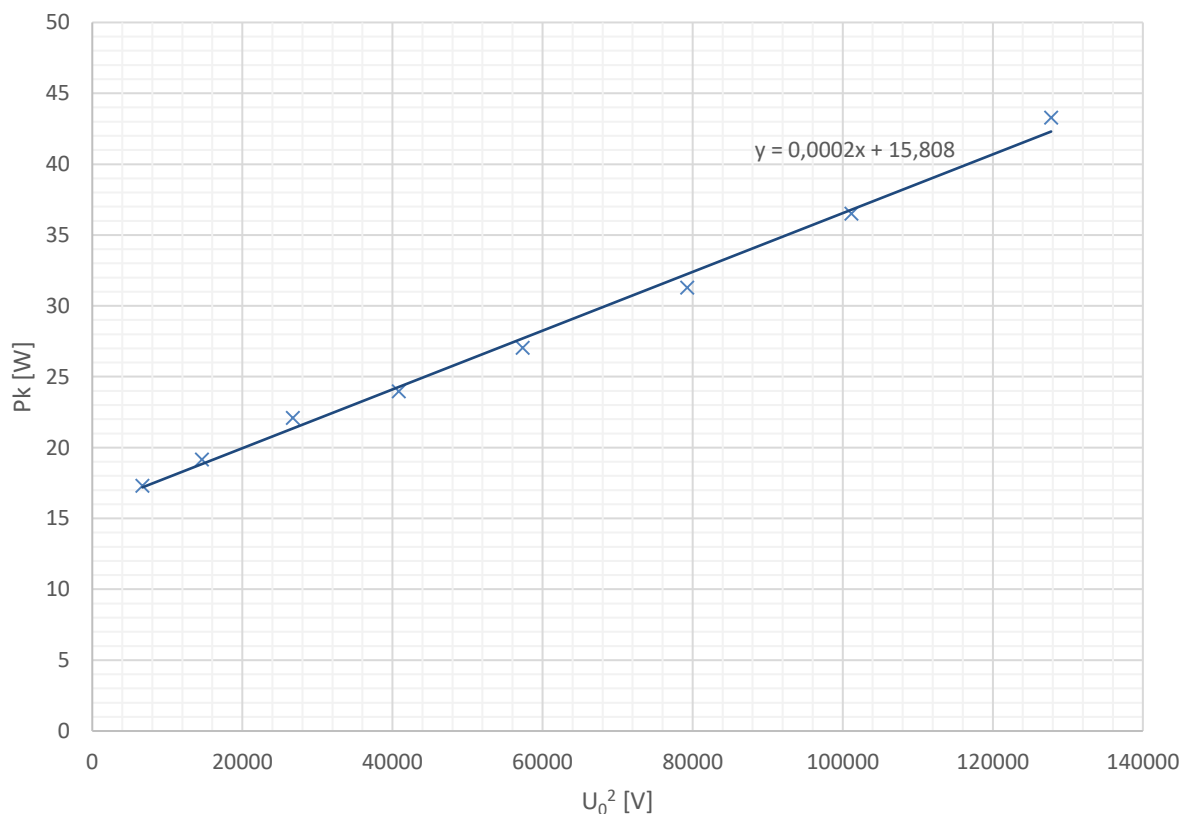
Měření probíhalo při mechanicky odpojeném asynchronním dynamometru od 125 % U_n (500V) po 20 % U_n (80V). Snižování napětí probíhalo po kroku 40 V. Otáčky se měřily optickým bezkontaktním čidlem.

Tab. 8.4: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno

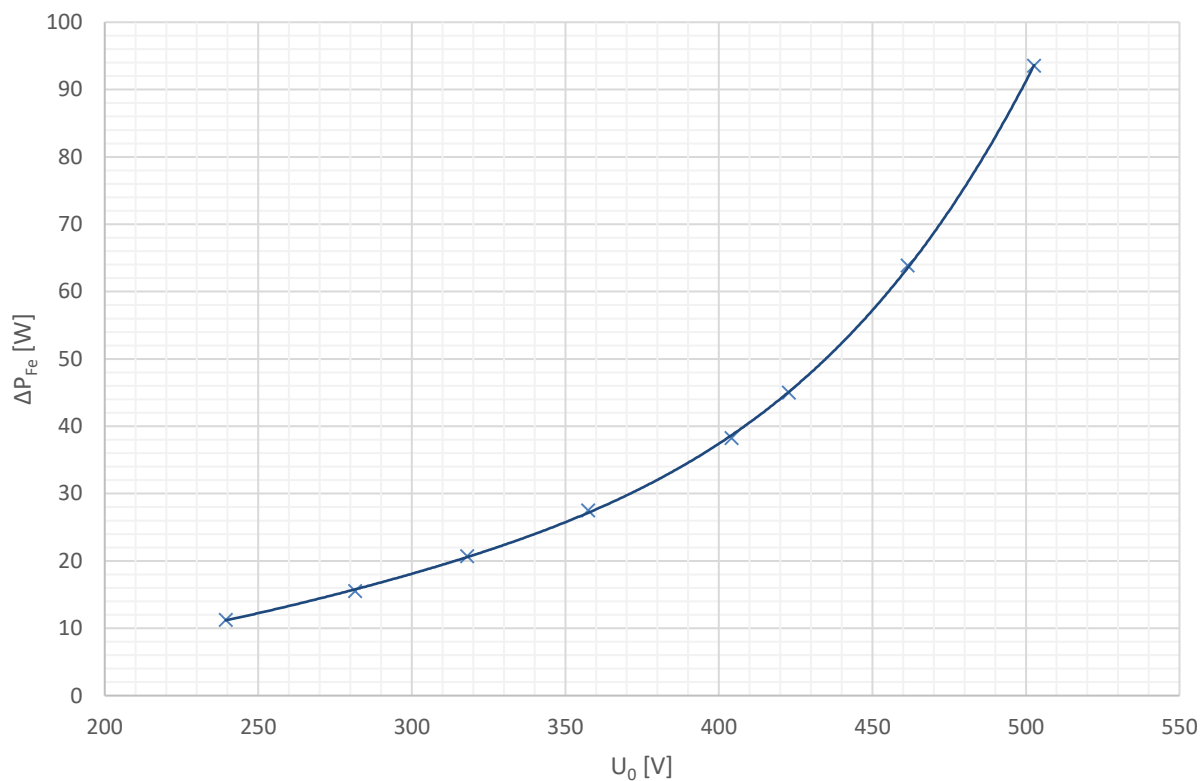
U_0 [V]	I_0 [A]	P_{10} [W]	$\cos \varphi$ [-]	n [ot/min]	ΔP_{j10} [W]	ΔP_k [W]	ΔP_{j10} [W]	ΔP_{mech} [W]	ΔP_{FE} [W]
502,67	2,160	287,4	0,1528	2997,1	178,07	109,33	178,07	15,8	93,54
461,52	1,482	163,5	0,1380	2997,6	83,83	79,67	83,83		63,88
422,75	1,050	102,9	0,1337	2997,3	42,10	60,80	42,10		45,01
404,12	0,911	85,7	0,1344	2996,5	31,68	54,02	31,68		38,23
357,45	0,675	60,7	0,1452	2995,6	17,41	43,29	17,41		27,50
318,06	0,557	48,3	0,1576	2994,9	11,83	36,51	11,83		20,72
281,56	0,468	39,7	0,1737	2994,5	8,36	31,30	8,36		15,51
239,46	0,381	32,6	0,2061	2991,5	5,55	27,05	5,55		11,26
202,07	0,314	27,7	0,2522	2988,8	3,77	23,97	3,77		8,18
163,51	0,257	24,6	0,3382	2982,4	2,52	22,10	2,52		6,31
120,94	0,206	20,8	0,4808	2967,5	1,62	19,16	1,62		3,37
81,71	0,191	18,7	0,6913	2922,8	1,39	17,31	1,39		1,52

Pozn.: žlutě jsou zvýrazněny hodnoty naměřené.

Z grafu $\Delta P_k = f(U_0^2)$ určíme mechanických ztrát. Vynesenou závislost $\Delta P_k = f(U_0^2)$ extrapolujeme k nulové hodnotě osy x (U_0^2) získáme průsečík na ose y (ΔP_k), který nám udává hodnotu mechanických ztrát, jež uvažujeme za konstantní, jelikož se otáčky při měření naprázdno příliš nemění.



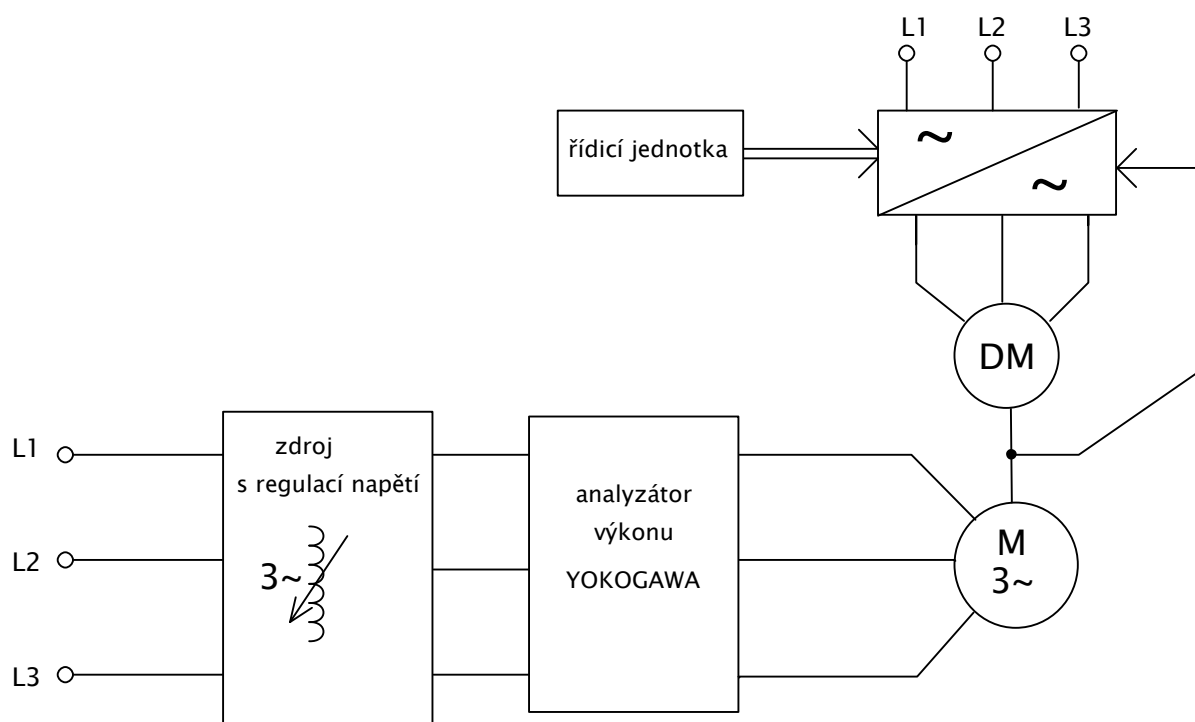
Obr. 8.1: Závislost konstantních ztrát ΔP_k na druhé mocnině napětí naprázdno U_0 – určení mechanických ztrát



Obr. 8.2: Závislost ztrát v železe ΔP_{Fe} na napětí naprázdno U_0

8.4 Výsledky měření zatěžovací charakteristiky

Motor byl zatěžován asynchronním dynamometrem sestupně od 150 % M_n do 25 % M_n . Schéma zapojení daného měření je uvedeno na následujícím obrázku.



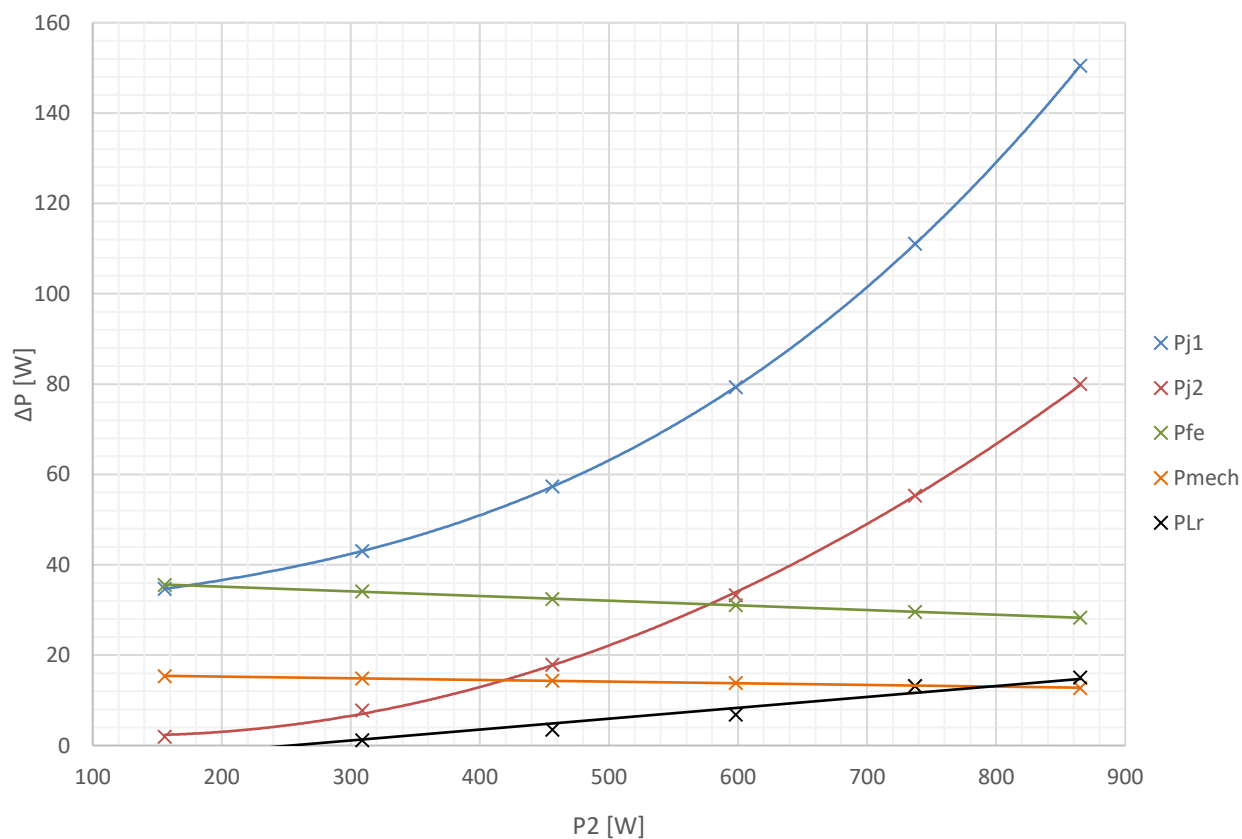
Obr. 8.3: Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky

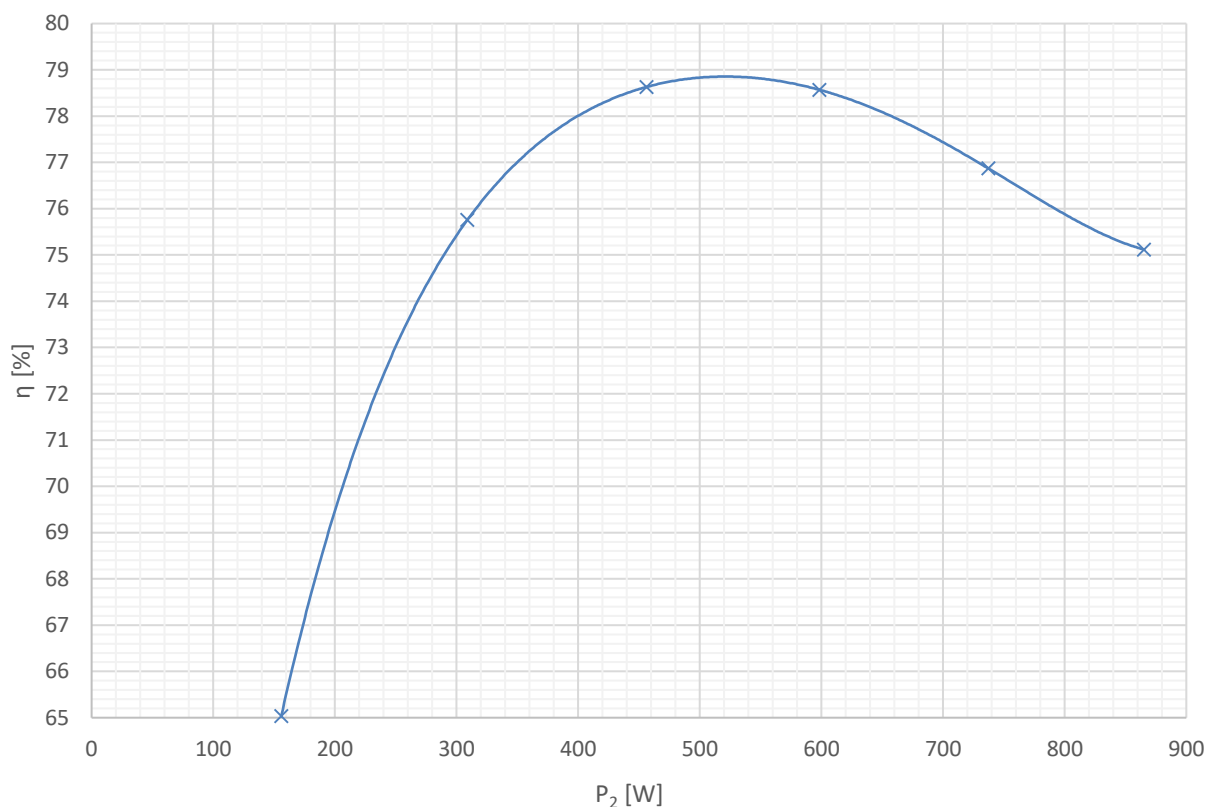
Tab. 8.5: Měření zatěžovací charakteristiky

U [V]	I [A]	P ₁ [W]	cos φ [-]	M [Nm]	n [ot/min]
400,91	1,92	1151,90	0,8652	3,00	2753,3
401,01	1,65	959,20	0,8383	2,52	2797,3
401,18	1,39	761,50	0,7874	2,01	2846,7
401,23	1,18	580,10	0,7051	1,51	2890,3
402,24	1,03	407,80	0,5709	1,01	2929,6
401,90	0,92	239,70	0,3741	0,50	2965,2

Tab. 8.6: Vypočet jednotlivých ztrát pro různé zátěžné momenty

M [Nm]	s [-]	P ₂ [W]	η [%]	sin φ [-]	U _r [V]	ΔP _{j1} [W]	ΔP _{FE} [W]	ΔP _{mech} [W]	ΔP _{j2} [W]	ΔP _{Lr} [W]
3,00	0,0822	865,26	75,12	0,5014	362,41	150,51	28,29	12,74	80,02	15,07
2,52	0,0676	737,31	76,87	0,5452	368,98	111,09	29,60	13,26	55,30	13,15
2,01	0,0511	598,30	78,57	0,6164	375,82	79,32	31,05	13,85	33,27	6,82
1,51	0,0366	456,13	78,63	0,7091	382,02	57,36	32,46	14,38	17,93	3,48
1,01	0,0235	308,93	75,76	0,8210	388,91	43,03	34,15	14,88	7,76	1,19
0,50	0,0116	155,88	65,03	0,9274	394,28	34,68	35,57	15,34	1,97	-1,13

Obr. 8.4: Závislost ztrát v železe ΔP_{Fe} , mechanických ztrát ΔP_{mech} , ztrát ve vinutí statoru a rotoru ΔP_{j1} , ΔP_{j2} a ztrát zbytkových ΔP_{Lr} na výkonu motoru P_2



Obr. 8.5: Závislost účinnosti na mechanickém výkonu P_2

8.5 Porovnání měření s výpočty původních modelů

Výsledky měření motoru při jmenovitých parametrech jsou uvedeny v Tab. 8.3. pro srovnání s analytickým výpočtem v programu RMxpřt a výpočty metodou konečných prvků jsou navíc zaznamenány v Tab. 8.8.

Tab. 8.7: Porovnání výsledků ztrát získaných měřením a výpočty

Název	Označení	Měření	RMxpřt
Ztráty ve vinutí statoru	ΔP_{j1} [W]	81,45	82,55
Ztráty ve vinutí rotoru	ΔP_{j2} [W]	32,96	34,99
Ztráty v železe	ΔP_{Fe} [W]	30,98	29,94
Mechanické ztráty	ΔP_{mech} [W]	15,79	15,11
Zbytkové / dodatečné ztráty	ΔP_{Lr} [W]	1,62	3,00
Celkové ztráty	ΔP [W]	162,80	165,58
Účinnost	η [%]	78,79	78,51

Pozn. Dodatečné ztráty ΔP_{Lr} byly do RMxpřtu zadány jako 0,5 % z P_2 , dle [18].

Tab. 8.8: Porovnání dostupných výsledků měření a výpočtů

Název	Označení	Měření	RMxpřt	MKP model 1a	MKP model 1b	MKP model 2a	MKP model 2b
Účinnost	η [%]	78,79	78,51	82,51	85,54	81,90	85,10
Celkové ztráty	ΔP [W]	162,80	165,58	143,12	116,00	141,86	114,08
Ztráty ve vinutí statoru	ΔP_{j1} [W]	81,45	82,55	74,68	72,06	74,41	71,64
Moment	M [Nm]	2,03	2,02	2,26	2,30	2,15	2,18
Statorový proud	I_1 [A]	1,40	1,31	1,34	1,32	1,34	1,32

Pozn.: označení modelu písmenem **a** znamená výpočet při uvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole. Písmeno **b** značí výpočet bez uvažování tohoto vlivu. Odlišnosti jednotlivých modelů počítaných metodou konečných prvků (MKP) jsou vysvětleny v kapitole 5.

Výsledky měření se nejvíce shodují s výsledky získanými analytickým výpočtem v RMxpřtu. Účinnost motoru vyšla při měření 78,79 % z analytického výpočtu v RMxpřtu 78,51 % a výpočtem metodou konečných prvků u modelu 1a 82,51 % a modelu 2a 81,90 %. Výsledky u modelů s označením **b** jsou výrazně odlišné, to je dáno kvůli neuvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole. Tyto výsledky nebudou dále porovnávány, jsou uvedeny záměrně pro ukázání vlivu tohoto nastavení na získané výsledky. Pro obdržení přesnějších výsledků je tedy nutné s tímto vlivem při simulaci MKP počítat. Model 2 má skutečný tvar magnetického obvodu a je u něj uvažován vliv stříhu. Rozdíl v účinnosti modelu 1 a 2 činí 0,61 %. Je tedy zřejmé, že změna tvaru plechu z kruhového na skutečný a uvažování vlivu stříhu na magnetické vlastnosti mají nezanedbatelný vliv na účinnost stroje.

Jednotlivé ztráty získané měřením lze porovnat s výpočty v RMxpřtu. Z transienční analýzy MKP nezískáme všechny druhy ztrát. Lze z ní pro porovnání určit celkové ztráty a ztráty ve vinutí statoru. Dále je možné získat ztráty v železe, ty jsou však počítány jiným způsobem a není je tedy vhodné porovnávat s výsledky z měření a z RMxpřtu. Ztráty ve vinutí statoru vyšly z měření 81,5 W, v RMxpřtu o 1,1 W více a o 7 W méně výpočtem MKP u modelu 2a. Ztráty ve vinutí rotoru byly měřením stanoveny 33,0 W, v RMxpřtu vyšly o 2,0 W více. Ztráty v železe, zjištěné ze zkoušky naprázdno představují 30,98 W, což je o 1 W více než výsledek získaný výpočtem v RMxpřtu. Mechanické ztráty byly rovněž zjištěny z měření naprázdno, jejich hodnota je 15,79 W. Mechanické ztráty a ztráty dodatečné nemá opodstatnění porovnávat, jelikož tyto ztráty zadává do RMxpřt přímo uživatel. Mechanické ztráty tak byly do programu zadány podle výsledků měření. Program RMxpřt si je jen přepočítá podle uvažovaných otáček stroje. Dodatečné ztráty ΔP_{Lr} byly do programu zadány jako 0,5 % ze jmenovitého výkonu stroje, tak jak uvádí [18]. Z měření byly dodatečné neboli zbytkové ztráty získány odečtením všech ztrát od rozdílu příkonu a výkonu. Celkové ztráty vyšly z měření 162,8 W, v RMxpřtu 165,9 W a u modelu 2a 141,9 W. Jmenovitý moment vyšel z měření 2,02 Nm. Nejvíce se liší výpočtem MKP, kde u modelu 2a vyšel o 0,12 Nm (5,9 %) více.

Statorový proud vyšel měřením 1,40 A, výpočtem v RMxpřtu o 6,4 % méně a u modelu 2a MKP o 4,3 % méně.

Analytický výpočet motoru programem RMxpřt je ovlivněn několika faktory. Jednak zde není uvažován přesný tvar statorového plechu podle výkresové dokumentace, ale jen kruhový tvar bez okrajových zkosení a otvorů pro nýty. Program si navíc některé parametry sám odhaduje, jako např. tvar čel statorového vinutí a další. Značný vliv na výsledky má nastavení materiálových vlastností jednotlivých částí s ohledem na odhad teploty ve stroji. Výpočet metodou konečných prvků se považuje za přesnější způsob výpočtu, to se však při srovnání s měřením nepotvrdilo. Pro MKP byly vytvořeny dva modely. Model 1 se nejvíce podobá tomu, se kterým počítá RMxpřt a také jsou v něm nastaveny stejné materiálové vlastnosti. Model 2 má konstrukčně stejný tvar magnetického obvodu jako reálný motor a je zde navíc zahrnut vliv stříhu. Oba modely pro MKP jsou 2D a neuvažuje se u nich zešíkmení rotorových tyčí, s tím analytický výpočet v RMxpřtu počítá. Chyby měření jsou ovlivněny přesností použitých měřicích přístrojů, vliv má rovněž měnící se teplota v motoru při velkých skluzech.

9 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo provést optimalizaci tvaru drážek asynchronního motoru se zaměřením na dosažení co nejvyšší účinnosti. Optimalizovány byly drážky statoru i rotoru. Jmenovitý výkon daného motoru byl 600 W. Nejprve probíhala optimalizace s využitím analytického výpočtu v programu RMxprt a poté s využitím metody konečných prvků. Pro tuto metodu byly v programu Maxwell vytvořeny dva modely. První s kruhovým tvarem magnetického obvodu s vlastnostmi udávanými v katalogu. Druhý model zahrnuje některé vlivy technologie výroby: skutečný tvar magnetického obvodu a vliv zhoršení vlastností plechů po stříhu.

K optimalizaci byl použit genetický algoritmus, který patří mezi nejčastěji používané optimalizační algoritmy. Práce popisuje i další algoritmy. Pro tento typ úlohy by byl vhodný rovněž algoritmus SOMA. Optimalizační algoritmus běžel v prostředí MATLAB a optimalizace se prováděla díky propojení s výpočtovým programem. Při tom bylo dbáno na dodržení podmínek souvisejících s vyrobiteľností. Maximální hodnota činitele plnění statorové drážky se po dohodě s výrobcem stanovila na 0,35. Průřez statorového vodiče zůstal zachován. Také bylo snahou, aby stěny zubů byly rovnoběžné a bylo tak zajištěno stejné syčení v průřezu zubu. U rotorové drážky bylo podmínkou zachování původní plochy drážky.

Analytický výpočet v programu RMxprt je velmi rychlý, proto mohl algoritmus při optimalizaci provádět větší počet iterací a prohledávat větší prostor možných řešení. V programu RMxprt byly zkoušeny všechny možnosti k nalezení nejlepšího tvaru drážek. Je zde možné použít předdefinované tvary drážek nebo tvary sestavovat ze segmentů. Model motoru s původními drážkami má dle simulace v programu RMxprt účinnost 78,51 %. Při optimalizaci pouze statorových drážek se dosáhlo účinnosti o 0,48 % vyšší. Při optimalizaci jen rotorových drážek se účinnost zvýšila o 0,68 %. Rovněž byly optimalizovány obě drážky současně, dosáhlo se tak účinnosti 79,68 %, tedy o 1,17 % více, než měl model s původním tvarem drážek. Z výsledků tedy vyplývá, že výraznější vliv na zvýšení účinnosti má v případě tohoto motoru změna tvaru rotorové drážky. Další výpočty v RMxpřtu ukazují, že po optimalizaci došlo k navýšení účinníku oproti původnímu modelu o 4,3 %, a to díky snížení magnetizačního proudu, což je důsledek zvýšení magnetizační reaktance. Tu ovlivnilo snížení magnetické indukce ve jhu rotoru vlivem zkrácení rotorové drážky. Snížení magnetizačního proudu navíc vedlo k poklesu celkového statorového proudu o 4,8 %, díky čemuž klesly ztráty ve vinutí statoru o 11,5 %. To je nejvýraznější změna při porovnání všech typů ztrát (viz Tab. 7.1). Celkové ztráty se snížily o 11,5 W, tj. o 7 %. Magnetická indukce poklesla ve všech částech magnetického obvodu. Zvýšila se jen nepatrně ve vzduchové mezeři, to je způsobeno nižším úbytkem napětí na statorovém vinutí v důsledku menšího statorového proudu.

Při optimalizaci s využitím metody konečných prvků byla použita transientní analýza, která je přesnější, ale časově náročnější. Na začátku se nevycházelo z původního tvaru drážek, ale již z tvaru navrženého z předešlé optimalizace v RMxprt. Důvodem bylo zkrácení doby optimalizace. Nalezení optimálního řešení nemusí být totiž otázkou jednoho spuštění optimalizačního algoritmu. Z počátku tedy není vhodné provádět optimalizaci metodou

konečných prvků, ale časově rychlým analytickým výpočtem a obě metody vhodně kombinovat. Optimalizace probíhala u obou modelů při neuvažování vlivu ztrát v železe na rozložení magnetického pole. Tento vliv by dobu optimalizace prodlužoval. Až u konečného řešení byl proveden výpočet s jeho uvažováním. Za vypovídající a přesnější hodnotu lze považovat výsledek při zahrnutí tohoto vlivu. Účinnost byla při uvažování vlivu ztrát v železe na magnetické pole zjištěna u obou modelů přibližně o 3 % nižší než při zanedbání tohoto vlivu. Z výsledků simulací modelů 1 a 2 je zřejmé, že změna tvaru plechu z kruhového na skutečný a vliv stříhu na magnetické vlastnosti mají nezanedbatelný vliv na účinnost stroje. U modelu 2, který tyto vlivy zahrnoval, byla účinnost o 0,61 % nižší než u modelu 1. Účinnost modelu 2a s původním tvarem drážek a s uvažováním všech zmíněných vlivů vyšla 81,90 %. Optimalizací obou drážek tohoto modelu při využití metody konečných prvků se dosáhlo účinnosti 82,51 %, tedy o 0,55 % více než měl původní model. Dále bylo zjištěno snížení magnetické indukce v zubech statoru i rotoru a také ve jhu rotoru.

Výsledné tvary optimalizovaných drážek modelu 1 a 2 se od sebe příliš neliší. Z toho plyne, že s vlivy technologie výroby nebylo nutné při optimalizaci počítat. S jejich uvažováním se doba optimalizace prodloužila. Pro zpřesnění výpočtů je stačilo zahrnout dodatečně po optimalizaci.

Z tvarů optimalizovaných statorových drážek lze vidět, že algoritmus navrhoval tuto drážku s menší plochou. To bylo v souladu s dohodou výrobce. Následkem menší plochy drážek došlo ke zvětšení objemu zubů a jha statoru, díky čemuž klesla indukce v těchto částech a klesly tak i ztráty v železe. Dosáhnout vyšší účinnosti by také šlo zvětšením plochy statorové drážky tak, aby se do ní daly uložit vodiče s větším průřezem. Jelikož ztráty ve vinutí statoru zaujímají u tohoto motoru přibližně 50 % z celkových ztrát, bylo by toto opatření rovněž jednou z cest pro zvýšení účinnosti. V této práci bylo ale jednou z počátečních podmínek zachování původního průřezu vodiče.

Z práce vyplývá, že optimalizace tvaru drážek je jednou z možností pro dosažení vyšší účinnosti stroje. Z ekonomického hlediska jsou náklady na toto opatření minimální. Prostřihovadla na plechy se z důvodu opotřebení pravidelně vyměňují, a tedy by došlo pouze k výměně za prostřihovadlo s novým tvarem. Dále je zřejmé, že úprava tvaru drážek nemusí být vždy zaměřena jen na zvyšování účinnosti. Změnou tvaru drážek můžeme ovlivnit parametry stroje jako: účinník, velikost záběrného a maximálního momentu, a tedy průběh momentové charakteristiky. Tvar drážek má vliv na velikost magnetizační a rozptylové indukčnosti a ovlivňuje syčení jednotlivých částí magnetického obvodu. Lze ovlivnit velikost Jouleových ztrát ve vinutí statoru i rotoru a také ztráty v železe.

LITERATURA

- [1] PŘEHLED IMPLEMENTACE SMĚRNICE O EKODESIGNU A POŽADAVKŮ NA ENERGETICKOU EFEKTIVNOST VYBRANÝCH SKUPIN VÝROBKŮ. In: *INFORMAČNÍ PORTÁL Ministerstva průmyslu a obchodu* [online]. Praha: SEVEN Energy s.r.o., 2011. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/prehled-implementace-smernice-o-ekodesignu-a-pozadavku-na-en.pdf>
- [2] MACH, Martin. *ANALÝZA ZTRÁT ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ MALÉHO VÝKONU*. Brno, 2015. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, CSc.
- [3] SUMATHI, S., T. HAMSAPRIYA a P. SUREKHA. *Evolutionary intelligence: an introduction to theory and applications with Matlab*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 3540751580.
- [4] VOLNÁ, Eva. *Evoluční algoritmy a neuronové sítě: Určeno pro vzdělávání v akreditovaných studijních programech*. Ostrava, 2012.
- [5] TVRDÍK, Josef. *Stochastické algoritmy pro globální optimalizaci*. Ostrava, 2010.
- [6] ZELINKA, Ivan. *Umělá inteligence: v problémech globální optimalizace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 8073000695.
- [7] ZELINKA, Ivan. *Evoluční výpočetní techniky: principy a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 9788073002183.
- [8] KVASNIČKA, Vladimír, Jiří POSPÍCHAL a Peter TIŇO. *Evolučné algoritmy*. První. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2000. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 8022713775.
- [9] HYNEK, Josef. *Genetické algoritmy a genetické programování*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008. Průvodce (Grada). ISBN 9788024726953.
- [10] MathWorks: Help. *MathWorks* [online]. The MathWorks, Inc., 2016 [cit. 2016-10-22]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html?searchHighlight=ga>
- [11] KRÖMER, Pavel. *Optimalizace pomocí mravenčích kolonií: Inspirace, definice, aplikace a perspektivy* [online]. VŠB Technical University of Ostrava, 2012 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~kro080/mravenci.pdf>
- [12] BONABEAU, Eric, Marco DORIGO a Guy THERAULAZ. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems* [online]. New York: Oxford University Press, 1999 [cit. 2016-10-23]. ISBN 0-19-513159-2. Dostupné z: http://dlia.ir/Scientific/e_book/Science/Cybernetics/006285.pdf
- [13] NĚMEC, Miloš. *Optimalizace pomocí mravenčích kolonií*. Praha, 2006. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická Katedra kybernetiky. Vedoucí práce Ing. Petr Pošík.

- [14] KURFÜRST, Jiří. *OPTIMALIZACE STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY NA ROTORU POMOCÍ UMĚLÉ INTELIGENCE*. Brno, 2013. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. ČESTMÍR ONDRŮŠEK, CSc.
- [15] CIPÍN, Radoslav. *MODERNÍ MATEMATICKÉ METODY SYNTÉZY A ANALÝZY STŘÍDAVÝCH STROJŮ*. Brno, 2012. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [16] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek IV: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulsní měniče s transformátorem*. Brno, 2008. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [17] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje: Asynchronní stroje*. Brno. Skripta. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [18] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání Praha: Státní nakladatelství technické literatury. Moskva: Nakladatelství Mir, 1988
- [19] POKORNÝ, Karel. *Stavba elektrických strojů I*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [20] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. 1. vyd. Praha: BEN, 2004. ISBN 80-730-0092-X.
- [21] Typical data for SURA M700-50A. In: [online]. Cogent Surahammars Bruks AB, 2008. Dostupné z: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf>
- [22] *Metoda konečných prvků* [online]. Brno [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf. Přednáška. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [23] *Ansoft Maxwell 3D: Electromagnetic and Electromechanical Analysis, user's guide – Maxwell 3D* [online]. Pittsburgh [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf. Ansoft corporation.
- [24] ČSN EN 60034-2-1 (350000). *Točivé elektrické stroje: Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [25] HERINGOVÁ, Blanka a Petr HORA. *MATLAB: Díl I. - Práce s programem* [online]. 1995. Dostupné také z: <http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/mvs/tutorial.pdf>
- [26] RANDY L. HAUPT, SUE ELLEN HAUPT., Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt. *Practical genetic algorithms with CD-Rom*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2004. ISBN 978-047-1671-749.

- [27] SAITZ, Julius. *Advanced Techniques for Greater Accuracy, Capacity, and Speed using Maxwell 11: Ansoft Corporation* [online]. In: . Dostupné z: <http://www.readbag.com/ansoft-leadinginsight-pdf-high-performance-electromechanical-design-advanced-techniques-for-greater-accuracy-capacity-and-speed-using-maxwell-v11>
- [28] JIRSÁK, Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. *Materiály a technická dokumentace: Část Materiály v elektrotechnice*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [29] *ANSYS Maxwell 2D: user's guide –Maxwell 2D* [online]. Canonsburg, USA, 2011. Dostupné také z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V14.pdf
- [30] F. Ossart, E. Hug, O. Hubert, C. Buvat and R. Billardon, "Effect of punching on electrical steels: Experimental and numerical coupled analysis," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 3137-3140, Sep 2000.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=908712&isnumber=19613>
- [31] T. Nakata, M. Nakano and K. Kawahara, "Effects of Stress Due to Cutting on Magnetic Characteristics of Silicon Steel," in *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, vol. 7, no. 6, pp. 453-457, June 1992.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4565422&isnumber=4565415>
- [32] Z. Gmyrek and A. Cavagnino, "Analytical method for determining the damaged area width in magnetic materials due to punching process," *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, 2011, pp. 1764-1769.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6119573&isnumber=6119266>
- [33] Z. Gmyrek, A. Cavagnino and L. Ferraris, "Estimation of the Magnetic Properties of the Damaged Area Resulting From the Punching Process: Experimental Research and FEM Modeling," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 5, pp. 2069-2077, Sept.-Oct. 2013.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6511985&isnumber=6600841>