

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh pohonu elektrické koloběžky

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr PŘÍBEK**
Osobní číslo: **E17B0120P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Návrh pohonu elektrické koloběžky**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši elektromotorů, které mohou být použity jako pohon pro elektrickou koloběžku.
2. Na základě 1. bodu zadání proveďte elektromagnetický návrh motoru. Návrh motoru ověřte pomocí MKP.
3. Vytvořte 3D model motoru a proveďte kalkulaci ceny motoru.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Veřejně dostupné informační zdroje, databáze www.ieee.org
2. PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 9780470695166.
3. KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radek Čermák**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM) s vnějším rotorem. Motor je navržen pro montáž do zadního kola koloběžky. V bakalářské práci je vypočten elektromagnetický návrh stroje, náhradní parametry a ztráty ve stroji. Návrh je ověřen v programu RMxprt a pomocí metody konečných prvků (MKP). V práci je zahrnut 3D model navrženého stroje a kalkulace ceny motoru.

Klíčová slova

PMSM, motor, synchronní stroj s permanentními magnety, elektrická koloběžka, magnety, návrh motoru, RMxprt, MKP

Abstract

The bachelor thesis presents design of synchronous motor with permanent magnets (PMSM) with outer rotor. The motor is designed for scooter rear wheel assembly. In the bachelor thesis, there is a calculation for electromagnetic design of the machine, spare parameters and machine losses. The design is verified in the RMxpert program and with finite element method magnetics (FEMM). In this thesis, there is a 3D model of a designed machine and the calculation of machine price.

Key words

PMSM, motor, permanent magnets synchronous machine, electric scooter, magnets, design of electrical motor, RMxpert, FEMM

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.6.2020

Petr Příbek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Radkovi Čermákovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	15
1.1 MOTORY PMSM	15
1.1.1 Princip PMSM	16
1.1.2 Vlastnosti PMSM	16
1.1.3 Konstrukce PMSM	16
1.2 PERMANENTNÍ MAGNETY TOČIVÝCH STROJŮ	17
1.2.1 Aplikace permanentních magnetů v točivých strojích	17
1.3 BLDC MOTORY	18
1.3.1 Konstrukce BLDC motorů	18
1.3.2 Princip BLDC motorů	18
1.3.3 Použití BLDC	19
1.3.4 Dostupné BLDC motory	19
1.3.5 Výběr motoru pro elektrickou koloběžku	20
1.4 ELEKTRICKÉ KOLOBĚŽKY	21
1.4.1 Typy koloběžek	21
1.4.2 Dostupné elektrické koloběžky	21
1.5 MOTORY POUŽÍVANÉ V ELEKTRICKÝCH KOLOBĚŽKÁCH	23
1.6 OMEZENÍ PROVOZU ELEKTRICKÝCH KOLOBĚŽEK	24
2 NÁVRH PMSM MOTORU	25
2.1 URČENÍ POTŘEBNÉHO MOMENTU MOTORU	25
2.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY STROJE A JEJICH URČENÍ	29
2.3 VÝPOČTY PRO VINUTÍ STATORU	31
2.4 VÝPOČTY PRO MAGNETICKÝ OBVOD STATORU	34
2.5 VÝPOČTY PRO NÁVRH DRÁŽKY STATORU	37
2.5.1 Rozměry drážky	38
2.6 VÝPOČTY PRO NÁVRH ROTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY	42
2.7 VÝPOČTY PRO NÁHRADNÍ PARAMETRY STROJE	48
2.8 ZTRÁTY A ÚČINNOST MOTORU	53
2.8.1 Výpočet ztrát ve vinutí statoru	53
2.8.2 Výpočet ztrát v železe	54
2.8.3 Výpočet mechanických ztrát	56
2.8.4 Výpočet celkových ztrát stroje a výsledné účinnosti	56
3 OVĚŘENÍ NÁVRHU MOTORU	57
3.1 OVĚŘENÍ NÁVRHU MOTORU POMOCÍ PROGRAMU ANSYS RMXprt	57
3.2 OVĚŘENÍ NÁVRHU MOTORU POMOCÍ MKP	59
4 VYTVOŘENÍ 3D MODELU	61
5 KALKULACE CENY MOTORU	63
5.1 CENA STATOROVÝCH A ROTOROVÝCH PLECHŮ	63
5.2 CENA VINUTÍ	64
5.3 CENA PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	64
5.4 CELKOVÁ CENA MOTORU	65
ZÁVĚR	66
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	68
PŘÍLOHY	1

Úvod

V současné době se koloběžky stávají čím dál oblíbenějším dopravním prostředkem ať už pro případy, kdy se člověk potřebuje dostat na určité místo, třeba do práce, nebo pro využití ve volném čase. V současnosti se vyrábějí koloběžky v mnoha různých variantách od skladných městských typů po odpružené terénní koloběžky. S nástupem elektromobility došlo i na koloběžky a lidé díky tomu mohou jezdit po městě nebo v přírodě bez sebemenší námahy.

Většinu trhu zaujímají elektrokoloběžky s BLDC motory, díky kterým dosahují výborných jízdních vlastností v kombinaci s dobrým dojezdem. BLDC motory je také snazší řídit, jelikož proud vycházející z baterie je stejnosměrný. Za použití PWM měniče je ovšem možné také použití konstrukčně nepřilíš odlišného třífázového synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM).

Teoretická část bakalářské práce se zabývá rešerší různých typů elektromotorů a jejich vhodností pro použití v elektrokoloběžce. Ve druhé části práce zmiňuje některé z používaných elektrokoloběžek.

V praktické části bakalářské práce se podle vnějších vlivů a jízdních parametrů zvolil pro koloběžku ideální výkon motoru $P = 1 \text{ kW}$. Pro PMSM s vnějším rotorem, umístěný v zadním kole koloběžky se spočetl návrh motoru, který se následně ověřil v programu RMxprt a pomocí metody konečných prvků (MKP). Poté se na základě vypočtených vlastností v programu progeCAD vytvořil konstrukční 3D model motoru včetně hřídele a uchycení k hřídeli. Nakonec se podle návrhu vytvořila kalkulace přibližné ceny navrženého motoru.

Seznam symbolů a zkratk

$\cos \varphi$	Účinník	[–]
$2p$	Počet pólů	[–]
h_0	Výška otevření drážky	[m]
h_1	Výška pólového nástavce	[m]
h_2	Výška drážky od pólového nástavce	[m]
h_d	Výška drážky	[m]
h_{j1}	Výška statorového jha	[m]
h_{j2}	Šířka rotorového jha	[m]
h_m	Výška magnetu	[m]
h_p	Výška pláště	[m]
h_p	Výška pláště	[m]
h_z	Výška zubu	[m]
ΔP	Celkové ztráty stroje	[W]
ΔP_{fe_j1}	Magnetické ztráty ve statorovém jhu	[W]
ΔP_{fe}	Celkové ztráty v železe	[W]
ΔP_{fe_z}	Magnetické ztráty v železe	[W]
ΔP_j	Jouleovy ztráty	[W]
ΔP_m	Výpočet mechanických ztrát	[W]
ΔU_{j2}	Úbytek napětí v rotorovém jhu	[V]
ΔU_z	Úbytek napětí v zubu	[V]
ΔU_δ	Úbytek napětí ve vzduchové mezeře	[V]
$\Delta p_{1,4/50}$	Ztrátové číslo plechu ve statoru	[W/kg]
$\Delta p_{1,8/50}$	Ztrátové číslo plechu v zubu	[W/kg]
A	Obvodová proudová hustota	[A/m]
A_{skut}	Skutečná proudová obvodová hustota	[A/m]
B	Délka části drážky vycházející ven	[m]
B_{j1}	Magnetická indukce ve jhu statoru	[T]
B_{j2}	Kontrola sycení rotorového jha	[T]
B_m	Magnetická indukce na povrchu magnetů	[T]
B_z	Magnetická indukce v zubu	[T]
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]

C	Essonův činitel	$[-]$
C_{skut}	Skutečný Essonův činitel	$[VA/m^3ot]$
D_1	Vnější průměr statoru	$[m]$
D_2	Vnější průměr rotoru	$[m]$
D_r	Vnitřní průměr rotoru	$[m]$
D_v	Vnitřní průměr statoru	$[m]$
F	Síla	$[N]$
H_c	Střední koercitivita magnetu	$[A/m]$
H_{j1}	Intenzita magnetického pole statorového jha	$[A/m]$
H_{j2}	Intenzita magnetického pole rotorového jha	$[A/m]$
H_{j2}	Intenzita magnetického pole rotoru	$[A/m]$
H_m	Intenzita magnetického pole magnetu	$[A/m]$
H_z	Intenzita magnetického pole v zubu	$[A/m]$
H_δ	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	$[A/m]$
I_f	Fázový proud	$[A]$
K_ξ	Činitel čel izolovaných páskou	$[-]$
$L_{a\sigma}$	Rozptylová indukčnost	$[H]$
L_{dif}	Diferenční indukčnost	$[H]$
L_{mi}	Magnetizační indukčnost	$[H]$
M	Moment stroje	$[Nm]$
M_n	Jmenovitý moment	$[Nm]$
N_s	Počet závitů	$[-]$
O_a	Odpor zrychlení	$[N]$
O_f	Valivý odpor	$[N]$
O_s	Odpor stoupání	$[N]$
O_{vz}	Odpor vzduchu	$[N]$
P	Činný výkon	$[W]$
Q	Počet drážek statoru	$[-]$
Q_p	Počet drážek na pól	$[-]$
$R_{a_{cu_{20^\circ C}}$	Odpor měděného vinutí	$[\Omega]$
S	Příkon stroje	$[VA]$
$S_{cu c}$	Celkový obsah mědi v drážce	$[mm^2]$

S_{cu}	Průřez vodiče	$[mm^2]$
S_d	Plocha drážky	$[mm^2]$
S_i	Vnitřní elektromagnetický výkon	$[VA]$
S_x	Čelní plocha lidského těla	$[m^2]$
U_f	Fázové napětí	$[V]$
U_i	Velikost indukovaného napětí ve stroji	$[V]$
U_{max}	Amplituda baterie	$[V]$
U_s	Sdružené napětí	$[V]$
V_d	Počet vodičů v drážce	$[-]$
X_{ad}	Podélná reaktance	$[\Omega]$
$X_{a\sigma}$	Rozptylová reaktance	$[\Omega]$
X_d	Celková synchronní reaktance stroje	$[\Omega]$
Z_n	Impedance stroje jmenovitá	$[\Omega]$
a	Zrychlení	$[m/s^2]$
a	Počet paralelních větví	$[-]$
a	Počet paralelních větví	$[-]$
b_0	Šířka otevření drážky	$[m]$
b_1	Šířka drážky	$[m]$
b_2	Šířka spodní části drážky	$[m]$
b_c	Střední šířka cívk	$[m]$
b_m	Šířka magnetu	$[m]$
b_z	Šířka zubu	$[m]$
c_x	Součinitel vzdušného odporu	$[-]$
d_k	Průměr kola	$[m]$
d_{pl}	Tloušťka plechu	$[m]$
d_r	Průměr ráfku	$[m]$
d_v	Průměr vodiče	$[mm]$
f	Součinitel valivého odporu asfaltu	$[-]$
f	Jmenovitá frekvence	$[Hz]$
g	Tihové zrychlení	$[m/s^2]$
k'_β	Činitel pro určení rozptylu	$[-]$
k_c	Carterův činitel	$[-]$
k_e	Činitel poměru indukovaného ku jmenovitému	$[-]$

	napětí	
k_{r1}	Činitel rozlohy	[-]
k_v	Činitel vinutí	[-]
k_{v1}	Činitel vinutí pro první harmonickou	[-]
k_w	Činitel využití drážky	[-]
k_{y1}	Činitel kroku	[-]
k_β	Činitel pro určení rozptylu	[-]
l	Délka statoru	[m]
$l_{\check{c}}$	Délka čela	[m]
l_e	Efektivní délka stroje	[m]
l_{e_skut}	Skutečná délka stroje	[m]
l_{j2}	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
l_r	Délka rotoru	[m]
l_v	Délka vodiče v drážce	[m]
l_z	Délka závitů	[m]
m	Počet fází	[-]
m_b	Hmotnost baterie	[kg]
m_c	Celková hmotnost	[kg]
m_c	Celková hmotnost stroje	[kg]
m_{cu}	Hmotnost vinutí	[kg]
m_{fe_j1}	Hmotnost jha statoru	[kg]
m_{fe_r}	Hmotnost železa rotoru	[kg]
m_{fe_s}	Celková hmotnost statorového železa	[kg]
m_{fe_z}	Hmotnost zubů statoru	[kg]
m_k	Hmotnost koloběžky	[kg]
m_m	Hmotnost motoru	[kg]
m_o	Hmotnost osoby	[kg]
m_{pm}	Hmotnost permanentních magnetů	[kg]
n	Otáčky	[ot/min]
n_{pl}	Počet plechů	[-]
p	Počet pólpárů	[-]
q	Počet drážek na pól a fázi	[-]
r_d	Dynamický poloměr pneumatiky	[m]

s	Sklon vozovky	[%]
t_{d1}	Drážková rozteč	[m]
t_p	Pólová rozteč statoru	[m]
ν	Řád harmonické	[-]
v	Obvodová rychlost	[m/s]
v_{max}	Maximální rychlost	[km/h]
v_{pv}	Rychlost protivětru	[m/s]
v_v	Průměrná rychlost	[m/s]
y_{1d}	Cívkový krok	[-]
α	Sklon vozovky	[rad]
β	Činitel zkrácení kroku	[-]
δ	Šířka vzduchové mezery	[m]
δ'	Přepočtená šířka vzduchové mezery	[m]
δ_{ef}	Efektivní hodnota vzduchové mezery	[m]
η	Účinnost	[%]
η	Výsledná účinnost stroje	[%]
λ_{ξ}	Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel vinutí	[-]
λ_d	Činitel drážkového rozptylu	[-]
μ_0	Permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	Relativní permeabilita	[-]
ρ_{cu}	Hustota mědi	[kg/m ³]
$\rho_{cu,20^\circ C}$	Rezistivita měděného vinutí při 20 °C	[Ωm]
ρ_{fe}	Hustota železa	[kg/m ³]
ρ_{pm}	Hustota magnetu	[kg/m ³]
ρ_{vz}	Hustota vzduchu	[kg/m ³]
σ_{cu}	Proudová hustota	[A/mm ²]
τ_{dif}	Činitel diferenčního rozptylu	[-]
ϑ	Součinitel vlivu rotačních částí	[-]
ϕ_c	Celkový magnetický tok	[Wb]
ϕ_{j1}	Magnetický tok procházející jhem statoru	[Wb]
ϕ_z	Magnetický tok v zubu	[Wb]

1 Stroje s permanentními magnety

Určité typy synchronních strojů pro svou funkci vyžadují magnetické pole, které není závislé na proudu v kotvě. U běžných synchronních strojů protéká budící proud budícím vinutím na rotoru. V tomto vinutí ovšem vznikají Jouleovy ztráty, které mohou snižovat výkon stroje. Kvůli tomu se do rotoru místo vinutí dávají permanentní magnety. V poslední době se pro výrobu permanentních magnetů využívají sloučeniny vzácných zemin. Jedná se například o samarium-kobaltové magnety (SmCo) nebo neodymové magnety (NdFeB). Tyto směsi jsou ovšem jako materiály velice nákladné. Z toho důvodu se pro nenáročné použití stroje osazují feritovými magnety. [1]

1.1 Motory PMSM

V poslední době neustále přibývá aplikací točivých strojů synchronních. Čím dál častěji se setkáváme se synchronními stroji s permanentními magnety. Velice brzy se ze synchronních pohonů stal standard. [6]

V minulosti se v dopravě používaly v největší míře stejnosměrné stroje. Využívaly se jak v automobilové technice jako pomocné pohony, tak i u kolejových vozidel jako trakční pohony. Synchronní stroje se používaly hlavně jako alternátory. [6]

Zlom přišel s objevem použití permanentních magnetů ze slitin vzácných zemin v synchronních strojích. PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors, v překladu synchronní motory s permanentními magnety) se využívají v aplikacích se servopohony od stovek wattů do desítek kilowattů již přes deset let. Postupně nahrazovaly hlavně krokové a stejnosměrné motory. Díky velmi dobrým vlastnostem se začaly hojně používat i v dopravě. Jde hlavně o: [6]

- Využití synchronních strojů v aplikacích, kde se jako hlavní zdroj energie běžně využívá spalovací motor. Jde o aplikace do stovek kilowattů. Zde se uplatňují i synchronní stroje buzené vinutím na rotoru.
- Uplatnění PMSM jakožto trakčních motorů pro kolejová a nekolejová vozidla. V těchto aplikacích nahrazují asynchronní a stejnosměrné trakční motory.
- Aplikace PMSM, nahrazující stejnosměrné motory obsahující permanentní magnety, v pomocných pohonech. Výkony se pohybují okolo desítek wattů až

jednotek kilowattů. Jedná se zejména o automobilovou techniku.

1.1.1 Princip PMSM

Princip PMSP se zakládá na interakci točivého pole statoru s konstantním magnetickým polem rotoru, které vytváří permanentní magnety. Po přivedení sinusového proudu do vinutí statoru vzniká točivé magnetické pole. Buzení PMSM motoru je zajištěno permanentními magnety, mohou být vyloučeny ztráty budícího vinutí, a proto lze u těchto motorů dosáhnout vyšší účinnosti než u klasických synchronních motorů. Motor má celkově menší rozměry, ale je schopen dodat stejný či větší výkon. S menšími rozměry nachází tyto motory širší uplatnění a je nižší i cena jejich výroby. [26]

1.1.2 Vlastnosti PMSM

Ve srovnání s asynchronními stroji mají PMSM řadu výhod, mezi které patří například [6]:

- Nižší hmotnost a objem motoru
- Menší moment setrvačnosti
- Možnost pohonu přímo bez nutnosti využít převodovku. Tato skutečnost vyplývá z menšího objemu motoru
- Vysoká momentová přetížitelnost
- Lepší účinnost

Dále má PMSM ovšem i řadu nevýhod [6]:

- Větší složitost konstrukce a s tím související složitější výrobní technologie a opravy
- Nižší odolnost
- Pořizovací cena je vyšší
- Stroj nelze odbudít

1.1.3 Konstrukce PMSM

Klasické synchronní stroje, které mají na rotoru navinuto budící vinutí, se uplatňují hlavně jako zdroje elektrické energie. Například v automobilové technice, kde se vyskytují jako alternátory, které dobíjí akumulátor energií převzatou ze spalovacího motoru. Dále se s nimi lze setkat v lokomotivách, kde rovněž zastupují důležitou roli přenosu výkonu spalovacího motoru k výrobě elektrické energie. K pohonu strojů bývají klasické synchronní stroje použity jen výjimečně.

To ovšem neplatí pro synchronní motory s permanentními magnety. Jejich konstrukce bývá velmi různá v závislosti na použití. V případě klasického provedení má PMSM na statoru v drážkách navinuto trojfázové vinutí, stejně jako je tomu u asynchronního motoru. Ve statoru se nachází rotor, na kterém jsou umístěny permanentní magnety. Uvnitř rotoru se často nachází dutiny pro jeho odlehčení. Nehrozí zde, že by se narušil magnetický tok, jelikož ten se uzavírá na povrchu rotoru. Permanentní magnety mají póly rozděleny do dílčích segmentů, jejichž rozměry se pohybují od desetin po jednotky centimetrů a to i u větších strojů. Magnety používané v synchronních strojích jsou vyrobeny ze slitin vzácných kovů a díky tomu mají velmi vysokou magnetickou indukci. V porovnání s běžnými feritovými magnety více než dvojnásobnou. Na rotor stroje se magnety pro upevnění lepí. Z hlediska širokého použití PMSM je důležitá optimalizace jeho konstrukce. Hlavně kvůli velkým rozdílům v poměrech průměru a délky. Například pro pohon elektrické koloběžky, je vhodné navrhnout motor s menší délkou, která bude kompenzována větším průměrem. [6]

1.2 Permanentní magnety točivých strojů

K usnadnění magnetizačního procesu se používají magneticky měkké materiály. Požadavky na permanentní magnety jsou opačné. Přemagnetování permanentního magnetu z počátečního stavu je velice náročné. Jakmile se Weissovy domény paralelně zorientují, díky silnému působení vnějšího pole, materiál se trvale zmagnetizuje. [3]

1.2.1 Aplikace permanentních magnetů v točivých strojích

Permanentní magnety jsou používány v široké oblasti malých elektrických strojů. Jsou používány kupříkladu k buzení stejnosměrných motorů, synchronních strojů a hybridních krokových motorů. V poslední době se čím dál častěji objevují permanentní magnety i ve větších strojích, například jako generátory větrných elektráren, dosahující výkonu několika megawatt. Existují také aplikace permanentních magnetů jakožto magnetických ložisek. V těchto aplikacích se využívá odpudivých sil jednotlivých magnetů. Návrh magnetických obvodů s permanentními magnety je výpočetně složitější než při návrhu magnetických obvodů běžných strojů. [3]

1.3 BLDC motory

BLDC motory, převzato z anglického výrazu brushless DC motory (v překladu bezuhlíkové stejnosměrné motory), jsou motory nevyžadující ke své činnosti uhlíky, kroužky, mechanické komutátory ani jiné kluzné kontakty, které jsou potřeba u jiných typů stejnosměrných motorů. [7]

V minulosti byl hlavním zástupcem stejnosměrných motorů klasický komutátorový motor. Jeho hlavní nevýhodou je nutnost použití komutátoru, jakožto kluzného kontaktu. Ten se postupem času opotřebovává a tím pádem klade motor zvýšené nároky na údržbu. [11]

Problém s použitím komutátoru je u motorů BLDC řešen elektronickou komutací. BLDC motor tedy ke své činnosti potřebuje elektronickou jednotku, která postupně napájí jednotlivá vinutí statoru. Tím pádem odpadá potřeba užívání mechanického komutátoru, který by trpěl opotřebováváním. [11]

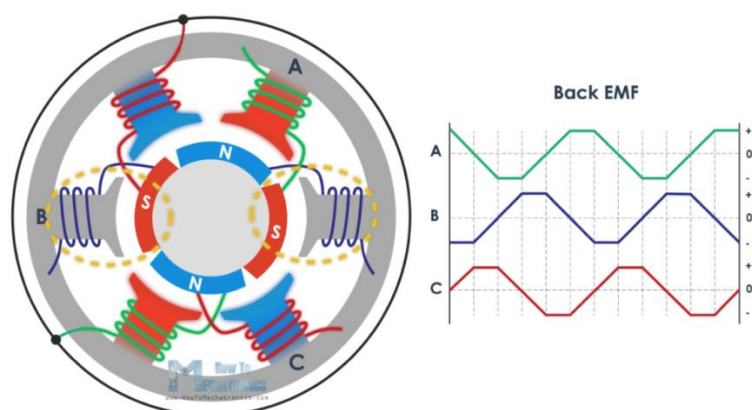
1.3.1 Konstrukce BLDC motorů

BLDC motor má, jako ostatní elektromotory, stator a rotor. Na rozdíl od jiných elektrických strojů s vinutím na rotoru má BLDC motor, stejně jako PMSM, na rotoru připevněny permanentní magnety. [13] Stator je tvořen 3 vinutími, která obstarávají buzení. Vinutí jsou spojena do hvězdy. [14]

1.3.2 Princip BLDC motorů

Bezuhlíkové motory patří mezi synchronní stroje. Statorem generované magnetické pole se tedy otáčí se stejnou frekvencí jako magnetické pole, které generují magnety elektromotoru. [12] Na rozdíl od stejnosměrných motorů s komutátorem, kde rotuje střední část motoru s vinutím a statorová část s magnety je v klidu, u BLDC motorů rotuje část osazená permanentními magnety a v klidu je stator, na kterém je navinuto vinutí. Jelikož BLDC motor neobsahuje mechanický komutátor, je řízení motoru obstaráno elektronickou jednotkou. Ta postupně přepíná mezi cívkami na statoru. K tomu potřebuje znát okamžitou polohu rotoru, kterou obdrží od Hallovy sondy na statoru, hlídající natočení rotoru. Toto řešení se nejčastěji nachází v menších strojích. Místo Hallových sond lze využít také enkodérů nebo rezolverů. Pro malé stroje je ovšem toto řešení velice drahé. Motory BLDC

v drtivé většině případů již obsahují řídicí elektronickou jednotku, zajišťující chod motoru a není tudíž třeba řešit dodatečné regulátory otáček a další zařízení. Kromě toho také řídicí jednotka obstarává ochranu proti přepólování, přetížení a přehřátí motoru. Tyto ochrany jsou zabudovány v motoru. [11] Regulace rychlosti se provádí změnou frekvence sekvencování a změna hladkosti běhu se řídí pomocí změny střídy a frekvence impulsů. [14]



Obr. 1.3.1 Princip BLDC motoru [30]

1.3.3 Použití BLDC

Motory typu BLDC se využívají v aplikacích, které vyžadují použití stejnosměrného motoru s vyšší účinností a zároveň je potřeba snížit servisní intervaly. Jejich využití je velice široké. Využívají se například jako pohony manipulačních vozíků, zemědělské techniky, v elektrickém nářadí poháněném akumulátorem, v automobilovém a leteckém průmyslu a dálkově ovládaných modelech aut. BLDC motory vynikají skvělou účinností, a to hlavně oproti indukčním motorům. Hojně se také začínají využívat právě v elektrických koloběžkách, kde se používají k pohonu zdaleka nejčastěji. [11]

1.3.4 Dostupné BLDC motory

Pro zjištění parametrů prodávaných BLDC motorů, pro osazení do kola elektrické koloběžky, byla provedena rešerše různých obchodů nabízejících tyto motory. Pro srovnání bylo vybráno více motorů o různých parametrech – výkon (W), napětí (V), hmotnost (kg) a cena (Kč).

Tabulka 1.1 Porovnání dostupných BLDC motorů do výpletu kola [4]

P (W)	250	500	750	500-1000
U (V)	36	36	48	24-48
d (mm)	145	205	neuveďeno	neuveďeno
m (kg)	2,7	6,6	neuveďeno	6,5
cena (Kč)	3 410,-	3 447,-	3 729,-	4 255,-



Obr. 1.3.2 BLDC motor v náboji 250 W, 36 V [28]



Obr. 1.3.3 BLDC motor pro Xiaomi Mi Electric Scooter 2 [29]

1.3.5 Výběr motoru pro elektrickou koloběžku

Pro elektrickou koloběžku byl vybrán motor PMSM, který bude dále navrhován. Nejčastěji využívané jsou v tomto směru motory BLDC, proto byl zvolen návrh možné alternativy k těmto motorům. PMSM má oproti BLDC motoru lepší účinnost, díky které bude mít koloběžka větší dojezd.

1.4 Elektrické koloběžky

Klasické koloběžky poháněné elektrickým motorem jsou zajímavým dopravním prostředkem jak do města, tak i do lehčího terénu. Motor, napájený baterií se celou dobu stará o jízdu a po vybití baterie lze s elektrokoloběžkou jezdit stejně jako s klasickou koloběžkou odražením nohou.

Mezi výhody elektrických koloběžek patří rychlost přesunu na požadované místo. Člověk se při jízdě s nimi, na rozdíl od klasické koloběžky, nemusí namáhat.

Nevýhody tkví ve zvýšené hmotnosti, způsobené nutností zabudování kromě samotného motoru i baterie, která se vybíjí a člověk se stává závislým na dojezdu. Tuto nevýhodu ovšem stírá fakt, že koloběžku lze po vybití užívat stejně jako klasickou.

1.4.1 Typy koloběžek

Koloběžky s elektrickým pohonem se vyrábí v mnoha různých variacích.

Elektrické koloběžky do města jsou skladnější, menší a lehčí. Kolečka bývají velmi malá. Díky tomu se koloběžka lépe ovládá v místech, kde je třeba se často vyhýbat překážkám, kterých je po městě nespočet. Zároveň má koloběžka díky menším rozměrům nižší hmotnost a navíc se většina dokáže složit do praktické polohy pro snadnější transport. Výkony městských elektrokoloběžek dosahují výkonů kolem 300 W, což je pro jejich použití dostačující.

Terénní elektrické koloběžky nabývají větších rozměrů, které se už blíží jízdnímu kolu. Rám bývá také podobné konstrukce jako u jízdnicích kol. Velikost kol dosahuje od 20“ až po 28“. Díky použití větších kol je jízda v terénu příjemnější a snáze se překonávají nerovnosti, kterých je v přírodě oproti městu daleko více. Terénní koloběžky bývají rychlejší a motory mají výkon od 350 W výš.[22]

1.4.2 Dostupné elektrické koloběžky

Trh s koloběžkami poháněnými elektromotorem se neustále zvětšuje. Mezi výrobce elektrických koloběžek patří například firmy:

- Xiaomi
- Citywiel
- Kentoya
- Segway
- inSPORTline
- X-scooters
- City Boss

Tabulka 1.2 Porovnání elektrických koloběžek

	Max. rychlost (km/h)	Výkon (W)	Dojezd (km)	Hmotnost (kg)	Cena (Kč)
<i>Xiaomi Mi Electric Scooter 2 M365</i>	25	250	30	12,5	9 990
<i>Narex ESN 350</i>	29	350	25	12,5	9 387
<i>MA-MI MOUNTAIN 2019</i>	25	250	25 - 30	20	36 690
<i>X-scooters XT01 WOOD 36V Li</i>	30	1000	25	35	12 900



Obr. 1.4.1 Koloběžka Xiaomi Mi Electric Scooter 2 M365



Obr. 1.4.2 Koloběžka MA-MI MOUNTAIN 2019

1.5 Motory používané v elektrických koloběžkách

Provedenou rešerší motorů používaných v elektrických koloběžkách se zjistilo, že ve většině případů se používají motory BLDC. Jak je již známo z kapitoly 1.3 o BLDC motorech, tyto motory jsou pro použití v elektrokoloběžkách zdaleka nejvhodnější. Je to díky jejich vysoké účinnosti způsobené absencí mechanických ztrát v kluzných kontaktech. V porovnání s klasickými komutátorovými stroji, popsanými, jsou BLDC motory dražší, ovšem na druhou stranu mají mnohem delší životnost a nevyžadují častý servisní zásah. Jelikož jsou elektrokoloběžky napájeny pomocí baterie a tudíž stejnosměrného proudu, je jednodušší použít stejnosměrný motor.

Motory se využívají od výkonu 250 W až po 1 kW. Existují i silnější motory, které ovšem už nejsou pro jízdu na pozemních komunikacích povoleny.



Obr. 1.5.1 Motor 500 W vypletený v 28" ráfku [31]

1.6 Omezení provozu elektrických koloběžek

Používání elektrokol, elektrokoloběžek a dalších podobných prostředků je v současné době stále častější. Ministerstvo dopravy proto vydalo vyhlášku č. 3441/2014 Sb., která stanovuje technické požadavky na elektrokoloběžky (spadají stejně jako tříkolky či vícekolky do kategorie pod elektrokola) pro jejich provoz na pozemních komunikacích:

- maximální výkon motoru 1 kW
- maximální rychlost 25 km/h

Pokud vozidlo (v tomto případě elektrická koloběžka) nesplňuje dané podmínky, je nutné jeho provoz na komunikacích schválit. [19]

2 Návrh PMSM motoru

2.1 Určení potřebného momentu motoru

V rámci zadání práce a po domluvě s vedoucím byl jako pohon elektrické koloběžky zvolen motor PMSM s vnějším rotorem uložený do zadního kola. Konstrukce motoru s vnějším rotorem je zvolena kvůli snazší montáži přímo do výpletu kola. Jízdní parametry koloběžky byly zvoleny s ohledem na platnou legislativu Ministerstva dopravy [19]. Rozměry motoru musí být takové, aby bylo možné motor uložit do kola koloběžky. Následné výpočty byly provedeny podle [4].

Před začátkem návrhu motoru se zvolila hmotnost jezdce a přibližná celková hmotnost koloběžky i s baterií a motorem. Hmotnost motoru vychází ze závěru návrhu stroje. Při volbě hmotnosti koloběžky se vycházelo z koloběžky Yedoo Mezeq [8]:

- hmotnost osoby $m_o = 82 \text{ kg}$
- hmotnost koloběžky $m_k = 11 \text{ kg}$
- hmotnost baterie $m_b = 6 \text{ kg}$
- hmotnost motoru $m_m = 14,4 \text{ kg}$.



Obr. 2.1.1 Koloběžka Yedoo Mezeq [8]

Po sečtení všech hmotností dostaneme celkovou hmotnost soustavy jezdce i koloběžky s veškerým vybavením.

$$m_c = m_o + m_k + m_b + m_m = 82 + 11 + 6 + 14,4 = 113,4 \text{ kg} \quad (3.1)$$

Po určení hmotností se určí celkový průměr kola d_k , ve kterém bude motor uložen. Opět se vycházelo z koloběžky Yedoo Mezeq [8], která má průměr ráfku zadního kola 16 palců. V přepočtu na centimetry je to 40,64 cm. Po přičtení výšky pláště h_p vyjde výsledný průměr kola d_k .

$$d_k = 2 \cdot h_p + d_r = 2 \cdot 0,04445 + 0,4064 = 0,4953 \text{ m} \quad (3.2)$$

Pro pohon koloběžky se zvolila baterie s maximální hodnotou sdruženého napětí $U_{\max} = 48 \text{ V}$. Z napětí baterie poté určíme efektivní hodnotu sdruženého napětí U_s a fázové napětí motoru U_f .

$$U_s = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{48}{\sqrt{2}} = 33,9411 \text{ V} \quad (3.3)$$

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{33,9411}{\sqrt{3}} = 19,5959 \text{ V} \quad (3.4)$$

Při určení potřebného výkonu navrhovaného motoru je třeba si zvolit různé jízdní vlivy:

- Maximální rychlost koloběžky $v_{\max} = 30 \text{ km/h}$
- Úhel sklonu vozovky $\alpha = 0,0994838 \text{ rad}$
- Sklon vozovky $s = 10 \%$
- Rychlost protivětru $v_{pv} = 9,68 \text{ m/s}$
- Průměrná rychlost koloběžky $v_p = 20 \text{ km/h}$
- Zrychlení $a = 4 \text{ m/s}^2$
- Zrychlení z 0 – 20 km/h za 5 sekund.

Parametry vozovky byly zvoleny s ohledem na profil trati z obce Pec na rozhlednu Čerchov na Domažlicku. Rychlost větru v_{pv} byla zvolena podle stupně 5 Beaufortovy stupnice síly větru, což odpovídá čerstvému větru [10]. Zrychlení koloběžky je voleno z klidového stavu na rychlost 20 km/h. Podle platné legislativy o provozu elektrických koloběžek na pozemních komunikacích platí, že maximální rychlost $v_{max} = 25$ km/h. Pokud by se tedy koloběžka provozovala na pozemní komunikaci, musela by její rychlost být omezena na 25 km/h. Z daných jízdních vlivů lze spočítat jízdní odpory.

Valivý odpor:

$$\begin{aligned} O_f &= m_c \cdot g \cdot f_K \cdot \cos(\alpha) = 113,4 \cdot 9,81 \cdot 0,015 \cdot \cos(0,0994838) \\ &= 16,6043 \text{ N}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

kde $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je tíhové zrychlení a $f_K = 0,015$ je součinitel valivého odporu asfaltu, který byl zvolen jako průměr podle [9].

Odpor stoupání:

$$\begin{aligned} O_s &= m_c \cdot g \cdot \sin \left(\arctg \left(\frac{s}{100} \right) \right) = 113,4 \cdot 9,81 \cdot \sin \left(\arctg \left(\frac{10}{100} \right) \right) \\ &= 110,6933 \text{ N} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Odpor zrychlení:

$$O_a = m_c \cdot \vartheta \cdot a = 113,4 \cdot 1,05 \cdot 4 = 476,28 \text{ N}, \quad (3.7)$$

kde $\vartheta = 1,05$ je součinitel vlivu rotačních částí, který se pro různá vozidla volí v rozmezí 1 – 1,5. Jelikož jedinými rotačními částmi, kde by mohl vznikat vliv na odpor zrychlení, jsou ložiska, zvolila se hodnota 1,05. [15]

Odpor vzduchu:

$$\begin{aligned} O_{vz} &= \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot S_x \cdot (v_p + v_{pv})^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,564 \cdot 0,81 \cdot (5,5556 + 9,68)^2 = 66,2767 \text{ N}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

kde $\rho_{vz} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ je hustota vzduchu, $c_x = 0,564$ je součinitel vzdušného odporu a $S_x = 0,81 \text{ m}^2$ je čelní plocha lidského těla. Ta se přibližně spočítala pro člověka vysokého 182 cm a širokého v horní části trupu 50 cm a v dolní části trupu 40 cm.

Po sečtení všech jízdních odporů vyjde síla F , která musí být menší než síla motoru, jinak nedojde k rozjezdu koloběžky. Odpor zrychlení se bere v potaz při zrychlování koloběžky z klidu. Při plynulé jízdě je tento odpor v ideálním stavu nulový, proto se zvolila nula.

$$\begin{aligned} F &= O_f + O_s + O_a + O_{vz} = 16,6043 + 110,6933 + 0 + 66,2767 \\ &= 193,5743 \text{ N} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Pro vypočtení celkového momentu je třeba znát dynamický poloměr pneumatiky r_d :

$$r_d = 0,92 \cdot \frac{d_k}{2} = 0,92 \cdot \frac{0,4953}{2} = 0,2278 \text{ m} \quad (3.10)$$

Potřebný moment, který musí motor mít, aby překonal všechny jízdní odpory, je:

$$M = r_d \cdot F = 0,2278 \cdot 193,5743 = 44,1036 \text{ Nm} \quad (3.11)$$

2.2 Základní parametry stroje a jejich určení

Při návrhu stroje byly podle [3] zvoleny následující parametry:

- Počet pólů $2p = 28$
- Účinit $\cos\phi = 0,85$
- Účinnost $\eta = 85 \%$.

Při návrhu stroje se postupovalo podle [3] a [16].

Počet otáček za minutu n se vypočte:

$$n = \frac{v_p \cdot 60}{d_k \cdot \pi} = \frac{5,5556 \cdot 60}{0,4953 \cdot \pi} = 214,2203 \text{ ot/min} \quad (3.12)$$

Nyní lze spočítat potřebný výkon motoru:

$$P = \frac{M \cdot \pi \cdot n}{30} = \frac{44,1036 \cdot \pi \cdot 214,2203}{30} = 989,38 \text{ W} \quad (3.13)$$

Jelikož požadovaný výkon stroje vyšel $P = 989,38 \text{ W}$, po dohodě s vedoucím práce se jako výkon navrhovaného motoru zvolila hodnota $P = 1000 \text{ W}$.

Poté se spočte jmenovitá frekvence:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{214,2203 \cdot 14}{60} = 49,9847 \text{ Hz} \quad (3.14)$$

Zdánlivý výkon stroje:

$$S = \frac{P}{\cos\phi \cdot \eta} = \frac{1000}{0,85 \cdot 0,85} = 1384,083 \text{ VA} \quad (3.15)$$

Z výsledného příkonu se následně vypočte fázový proud:

$$I_f = \frac{S}{3 \cdot U_f} = \frac{1384,083}{3 \cdot 19,5959} = 23,5437 \text{ A} \quad (3.16)$$

Jmenovitý moment stroje je:

$$M_n = \frac{P \cdot 30}{n \cdot \pi} = \frac{1000 \cdot 30}{214,2203 \cdot \pi} = 44,577 \text{ Nm} \quad (3.17)$$

Vnitřní elektromagnetický výkon:

$$S_i = k_e \cdot S = 0,84 \cdot 1384,083 \text{ VA} \quad (3.18)$$

Koeficient k_e vychází z poměru indukovaného napětí U_i a fázového napětí U_f . Hodnota se předběžně zvolila 0,8. Po vytvoření fázorového diagramu z fázového napětí U_f , fázového proudu I_f , odporu a reaktance se pro přepočtenou hodnotu indukovaného napětí U_i spočítala nová hodnota koeficientu k_e . Po iteraci procesu byla zvolena nová hodnota koeficientu $k_e = 0,84$.

K určení délky stroje je nutno spočítat hodnotu Essonova činitele:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 60} \cdot B_\delta \cdot A \cdot k_v = \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 60} \cdot 0,8 \cdot 21000 \cdot 0,866 \\ &= 1692,235 \text{ VA/m}^3 \text{ ot}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

kde hodnota indukce ve vzduchové mezeře B_δ a hodnota obvodové proudové hustoty A byly zvoleny po dohodě s vedoucím podle [3]. Po dohodě s vedoucím práce bylo zvoleno dvouvrstvé zubové vinutí. Tento typ vinutí má činitel vinutí $k_v = 0,866$.

Jakmile je znám vnitřní elektromagnetický výkon S_i a hodnota Essonova činitele C , lze za použití výkonové rovnice předběžně spočítat délku stroje.

Výkonová rovnice:

$$S_i = C \cdot D_1^2 \cdot l \cdot n. \quad (3.20)$$

Rozměr vnějšího průměru statoru byl zvolen $D_1 = 0,33$ m aby bylo možné celý motor umístit do ráfku kola.

Délka stroje spočtená pomocí výkonové rovnice:

$$l = \frac{S_i}{C \cdot n \cdot D_1^2} = \frac{1162,63}{1692,235 \cdot 214,22 \cdot 0,33^2} = 0,02945 \text{ m} \quad (3.21)$$

Pólová rozteč statoru:

$$t_p = \frac{D_1 \cdot \pi}{2 \cdot p} = \frac{0,33 \cdot \pi}{2 \cdot 14} = 0,037 \text{ m} \quad (3.22)$$

2.3 Výpočty pro vinutí statoru

Typ statorového vinutí byl po konzultaci s vedoucím zvolen vsypávaný a dvouvrstvý (neboli $2u = 2$). Jedná se o zubové vinutí. Počet drážek na pól a fázi je $q = 0,5$.

$$q = \frac{n}{c} = \frac{1}{2} \quad (3.23)$$

Po zvolení q lze spočítat počet drážek statoru:

$$Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 14 \cdot 3 \cdot 0,5 = 42, \quad (3.24)$$

kde p je počet pólpárů a m je počet fází motoru. Jelikož se jedná o třífázový motor, $m = 3$.

Drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{D_1 \cdot \pi}{Q} = \frac{0,33 \cdot \pi}{42} = 0,02468 \text{ m.} \quad (3.25)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{42}{2 \cdot 14} = 1,5 \quad (3.26)$$

Jelikož je použito zubové vinutí, cívkový krok $y_{1d} = 1$.

Činitel zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{1}{1,5} = 0,6667 \quad (3.27)$$

Pro výpočet činitele rozlohy je třeba znát činitel kroku k_{y1} a činitel rozlohy k_{r1} .

Činitel kroku k_{y1} :

$$k_{y1} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(1 \cdot 0,6667 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,866 \quad (3.28)$$

Činitel rozlohy k_{r1} :

$$k_{r1} = \frac{\sin\left(v \cdot \frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{n \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\pi}{n \cdot 2 \cdot m}\right)} = \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{1 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{1 \cdot 6}\right)} = 1 \quad (3.29)$$

Činitel vinutí se poté spočte tímto způsobem:

$$k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} = 0,866 \cdot 1 = 0,866 \quad (3.30)$$

Počet závitů v sérii pro statorové vinutí:

$$N_s = \frac{D_1 \cdot \pi \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_f} = \frac{0,33 \cdot \pi \cdot 21000}{2 \cdot 3 \cdot 23,5437} = 154,119 \quad (3.31)$$

Hodnota počtu závitů v sérii musí být zaokrouhlené sudé číslo. Zároveň musí při výpočtu následující hodnoty počtu vodičů v drážce vyjít rovněž celé sudé číslo, proto se zvolila $N_s = 154$.

Při větším proudu procházejícím vodičem se může vodič nadměrně zatěžovat. Tomu lze pomoci rozdělením vodičů do paralelních větví. Tím pádem se sníží průměry vodičů. Po dohodě s vedoucím se rozhodlo, že cívky se nebudou dělit do paralelních větví. Bylo tedy zvoleno sériové vinutí, a proto počet paralelních větví $a = 1$.

Počet vodičů v drážce:

$$V_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 154}{14 \cdot 0,5} = 22 \quad (3.32)$$

Množství vodičů v jedné vrstvě drážky bude polovina počtu vodičů v jedné drážce, protože je použito dvouvrstvé vinutí.

$$\frac{V_d}{2} = \frac{22}{2} = 11 \quad (3.33)$$

2.4 Výpočty pro magnetický obvod statoru

Pokud se počítá magnetický obvod, je třeba přepočítat hodnoty proudové obvodové hustoty A a Essonova činitele C na skutečné hodnoty pro novou hodnotu N_s zaokrouhlenou na celé číslo.

Výpočet skutečné hodnoty proudové obvodové hustoty:

$$\begin{aligned} A_{skut} &= \frac{2 \cdot N_s \cdot m \cdot I_f}{D_1 \cdot \pi} = \frac{2 \cdot 154 \cdot 3 \cdot 23,5437}{0,33 \cdot \pi} \\ &= 20983,7663 \text{ A/m} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Výpočet skutečné hodnoty Essonova činitele:

$$\begin{aligned} C_{skut} &= \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 60} \cdot A_{skut} \cdot B_\delta \cdot k_v = \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 60} \cdot 20983,7663 \cdot 0,8 \cdot 0,866 \\ &= 1690,9268 \text{ VA/m}^3 \text{ot} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Výpočet efektivní délky stroje:

$$l_e = \frac{S_i}{D_1^2 \cdot C_{skut} \cdot n} = \frac{1162,6298}{0,33^2 \cdot 1690,9268 \cdot 214,22} = 0,02947 \text{ m} \quad (3.36)$$

Efektivní délka stroje je stále pouze předběžná. Magnetický obvod bude skládán z plechů, kvůli snížení ztrát způsobenými vířivými proudy. Jsou použity plechy SURA M350-50A tloušťky 0,5 mm. Je potřeba zjistit počet použitých plechů a následně zjistit skutečnou délku stroje, která bude násobkem počtu plechů.

$$n_{pl} = \frac{l_e}{d_{pl}} = \frac{0,02947}{0,0005} = 58,9465, \quad (3.37)$$

kde d_{pl} je již zmiňovaná tloušťka plechu 0,5 mm.

Počet plechů n_{pl} se nyní zaokrouhlí na nejbližší celé číslo. Skutečný počet plechů je tedy $n_{pl} = 59$ plechů.

Nyní již lze určit skutečnou efektivní délku stroje l_{e_skut} :

$$l_{e_skut} = n_{pl} \cdot d_{pl} = 59 \cdot 0,0005 = 0,0295 \text{ m} \quad (3.38)$$

Napětí indukované v motoru:

$$U_i = U_f \cdot k_e = 19,5959 \cdot 0,84 = 16,461 \text{ V} \quad (3.39)$$

Velikost celkového magnetického toku procházejícího strojem je:

$$\begin{aligned} \phi_c &= \frac{U_i}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot N_s \cdot k_v \cdot f = \frac{16,461}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 154 \cdot 0,866 \cdot 49,9847 \\ &= 0,000556 \text{ Wb} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Pro kontrolu lze spočítat magnetickou indukci ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \frac{\phi_c}{\frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_{e_skut}} = \frac{0,000556}{\frac{2}{\pi} \cdot 0,037 \cdot 0,0295} = 0,7993 \text{ T} \quad (3.41)$$

Zvolená magnetická indukce B_δ je 0,8 a shoduje se s předpokládanou magnetickou indukcí B_δ .

Pro zjištění výšky j_{ha} statoru je třeba nejprve spočítat magnetický tok procházející tímto jhem. Magnetický tok se dělí a jhem poté prochází polovina onoho magnetického toku. Proto magnetický tok procházející jhem je:

$$\phi_{j1} = \frac{\phi_c}{2} = \frac{0,000556}{2} = 0,0002779 \text{ Wb.} \quad (3.42)$$

Výška jha poté bude:

$$h_{j1} = \frac{\phi_{j1}}{k_{FE} \cdot l_{e_skut} \cdot B_{j1}} = \frac{0,0002779}{0,97 \cdot 0,0295 \cdot 1,4} = 0,006937 \text{ m,} \quad (3.43)$$

kde k_{FE} je koeficient plnění železa a B_{j1} je magnetická indukce ve jhu statoru, která byla zvolena po domluvě s vedoucím podle [3]. Hodnota výšky jha se následně zaokrouhlila na hodnotu $h_{j1} = 0,0069$ m.

Zvolenou indukci lze následně překontrolovat pomocí následujícího vztahu:

$$B_{j1} = \frac{\phi_{j1}}{k_{FE} \cdot l_{e_skut} \cdot h_{j1}} = \frac{0,0002779}{0,97 \cdot 0,0295 \cdot 0,0069} = 1,407 \text{ T} \quad (3.44)$$

Hodnota spočtené magnetická indukce ve jhu statoru vyšla shodně jako zvolená.

Magnetický tok procházející zubem statoru je stejný jako tok celkový, tudíž $\phi_z = 0,000556$ Wb.

Nyní lze spočítat šířku zubu:

$$b_z = \frac{\phi_z}{k_{FE} \cdot l_{e_skut} \cdot B_z} = \frac{0,000556}{0,97 \cdot 0,0295 \cdot 1,8} = 0,011 \text{ m,} \quad (3.45)$$

kde hodnota B_z je magnetická indukce v zubu statoru a byla zvolena po domluvě s vedoucím a podle [3].

Zvolená hodnota magnetické indukce v zubu statoru se dá zkontrolovat pomocí vztahu:

$$B_z = \frac{\phi_z}{k_{FE} \cdot l_{e_skut} \cdot b_z} = \frac{0,000556}{0,97 \cdot 0,0295 \cdot 0,011} = 1,766 \text{ T} \quad (3.46)$$

Hodnota magnetické indukce v zubu statoru vyšla shodně s hodnotou zvolenou, tudíž byla hodnota vybrána správně.

2.5 Výpočty pro návrh drážky statoru

Jelikož bude drážka statoru vůči statoru poměrně malých rozměrů, počítá se v řádech milimetrů.

Plocha jediného vodiče:

$$S_{cu} = \frac{I_f}{\sigma_{cu} \cdot a} = \frac{23,5437}{2,5 \cdot 1} = 9,4175 \text{ mm}^2, \quad (3.47)$$

kde σ_{cu} je proudová hustota vodiče, která byla zvolena po domluvě s vedoucím a podle [3]. Hodnota se volila pro nepřímě chlazený PMSM motor.

Když je známa plocha, je možno spočítat průměr jediného vodiče.

$$d_v = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,4175}{\pi}} = 3,4628 \text{ mm} \quad (3.48)$$

Po domluvě s vedoucím práce se došlo k závěru, že je třeba vodič, kvůli jeho příliš velkému průměru, rozdělit do vláken. Podle [16] se zvolilo 6 normalizovaných vodičů o průměru $d_v = 1,4 \text{ mm}$ a průřezu $S_1 = 1,539 \text{ mm}^2$.

Efektivní plocha:

$$S_{cu} = 6 \cdot S_1 = 6 \cdot 1,539 = 9,234 \text{ mm}^2. \quad (3.49)$$

Přepočtená hodnota proudové hustoty:

$$\sigma_{cu} = \frac{I_f}{S_{cu} \cdot a} = \frac{23,5437}{9,234 \cdot 1} = 2,5497 \text{ A/mm}^2 \quad (3.50)$$

Celkový obsah mědi ve statorové drážce je:

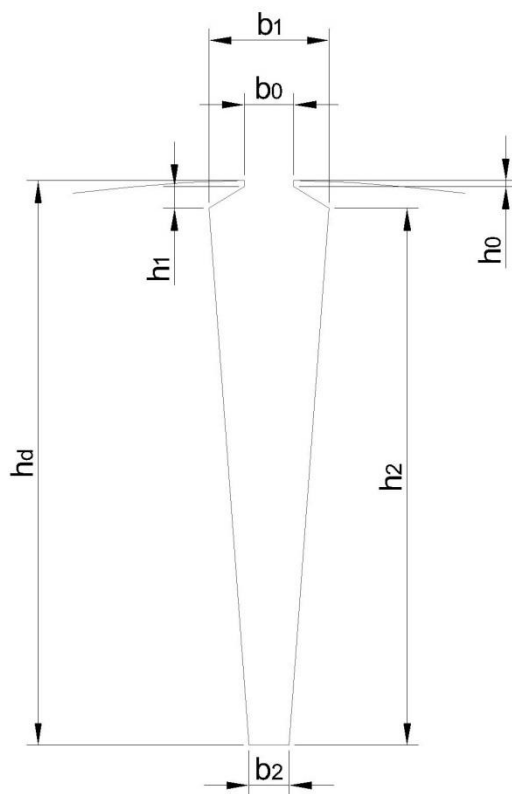
$$S_{cu c} = S_{cu} \cdot V_d = 9,234 \cdot 22 = 203,148 \text{ mm}^2. \quad (3.51)$$

2.5.1 Rozměry drážky

Před návrhem drážky byla po dohodě s vedoucím zvolena drážka typu L. Při návrhu motoru s vnějším rotorem je drážka blíže ke středu užší, než ve vzdálenosti dále od středu, kde je širší.

Tabulka 2.1 Rozměry drážky

$h0$ [mm]	0,7
$h1$ [mm]	2,4
$h2$ [mm]	60
hd [mm]	63,1
$b0$ [mm]	5,5
$b1$ [mm]	13,22
$b2$ [mm]	4,374



Obr. 2.5.1 Rozměry statorové drážky

Šířka drážky se spočte takto:

$$\begin{aligned}
 b_{1(p\u00f1v)} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1}{2} - 2 \cdot (h_0 + h_1) - Q \cdot b_z}{Q} \\
 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,33 - 2 \cdot (0,0005 + 0,0009) - 42 \cdot 0,011}{42} \\
 &= 0,01347 \text{ m},
 \end{aligned} \tag{3.52}$$

kde rozměry h_0 a h_1 jsou zvoleny předběžně. Tyto hodnoty v součtu určují výšku nástavce drážky. Po dopočtení hodnoty šířky drážky b_1 se podle [16] zvolily rozměry otevření drážky $b_0 = 5,5$ mm, výšky otevření drážky $h_0 = 0,7$ mm a výšky pólového nástavce $h_1 = 2,4$ mm.

Jelikož se b_1 počítal pouze s předběžně zvolenými parametry výšky otevření drážky h_0 a výšky pólového nástavce h_1 , je potřeba výpočet b_1 zopakovat pro nově zjištěné hodnoty.

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1 - 2 \cdot (h_0 + h_1)}{2} - Q \cdot b_z}{Q} \\
 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,33 - 2 \cdot (0,0007 + 0,0024)}{2} - 42 \cdot 0,011}{42} \\
 &= 0,01322 \text{ m},
 \end{aligned} \tag{3.53}$$

Nově spočtená hodnota se téměř shoduje s předchozí vypočtenou, proto hodnoty zvoleny z [16] zůstanou stejné.

Nyní lze spočítat rozměr dolní šířky drážky statoru:

$$\begin{aligned}
 b_2 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1 - 2 \cdot (h_0 + h_1) - 2 \cdot h_2}{2} - Q \cdot b_z}{Q} \\
 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,33 - 2 \cdot (0,0007 + 0,0024) - 2 \cdot 0,06}{2} - 42 \cdot 0,011}{42} \\
 &= 0,004374 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{3.54}$$

Nejmenší možná hodnota otevření drážky b_0 je dle [16] určena jako průměr jediného vodiče $d_v + 1,5$ mm, aby šlo vinutí do drážky bez problému nasypat.

$$d_v + 1,5 = 3,4628 + 1,5 = 4,9628 \text{ mm} \tag{3.55}$$

Předchozí vypočtená hodnota velikosti otevření drážky b_0 vyšla větší než nejnižší možná, proto ji lze použít.

Celková výška drážky statoru h_d se spočte jako součet výšky otevření drážky h_0 , výšky pólového nástavce h_1 a výšky drážky od pólového nástavce směrem ke středu h_2 , která se byla určena.

$$h_d = h_0 + h_1 + h_2 = 0,7 + 2,4 + 60 = 63,1 \text{ mm} \quad (3.56)$$

Ze zjištěných rozměrů statorové drážky lze spočítat celkovou plochu statorové drážky.

$$S_d = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_2 = \frac{13,4298 + 4,454}{2} \cdot 60 = 536,507 \text{ mm}^2 \quad (3.57)$$

Ze všech zjištěných rozměrů statorové drážky lze vypočítat činitel využití drážky, který by měl podle [3] a po dohodě s vedoucím být menší než 0,4.

$$k_w = \frac{S_{cu,c}}{S_d} = \frac{203,148}{527,814} = 0,3849 \quad (3.58)$$

Výsledná hodnota činitele využití drážky k_w vyšla menší než 0,4 a tudíž rozměry drážky vyhovují.

Pokud je známa výška statorové drážky a statorového jha, lze spočítat vnitřní průměr statoru D_v .

$$\begin{aligned} D_v &= D_1 - 2 \cdot h_d - 2 \cdot h_{j1} = 0,33 - 2 \cdot 0,0631 - 2 \cdot 0,0069 \\ &= 0,19 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.59)$$

2.6 Výpočty pro návrh rotoru s permanentními magnety

Pro rotor motoru jsou použity, stejně jako pro stator, elektromagnetické plechy SURA M350-50A o tloušťce 0,5 mm. Počet plechů, a tudíž i délka rotoru, je shodný se státorem. Po domluvě s vedoucím jsou zvoleny permanentní magnety typu N35UH.

Základní parametry zvolených magnetů (viz příloha B) jsou:

- Relativní permeabilita $\mu_r = 1,05$
- Střední koercitivita magnetu $H_c = 907$ kA/m
- Maximální povolená teplota magnetu: 180 °C.

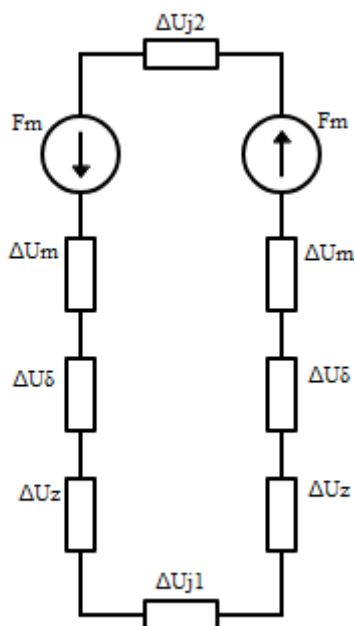
Z dosud zjištěných magnetických indukcí je třeba zjistit konkrétní hodnoty intenzity magnetického pole. Ty lze vyčíst z katalogového listu použitých elektromagnetických plechů (viz příloha A) pro vypočtenou frekvenci $f = 50$ Hz.

Pro hodnotu magnetické indukce ve jhu statoru $B_{j1} = 1,4$ T platí $H_{j1} = 481$ A/m.

Pro hodnotu magnetické indukce ve jhu rotoru $B_{j2} = 1,4$ T, která byla zvolena po domluvě s vedoucím shodná s hodnotou magnetické indukce ve jhu statoru, platí $H_{j2} = 481$ A/m.

Pro hodnotu magnetické indukce v zubu $B_z = 1,8$ T platí $H_z = 10720$ A/m.

Při výpočtu rozměrů magnetu se berou v úvahu dílčí úbytky magnetického napětí. Zjednodušený model úbytků magnetického napětí lze vidět na *Obr. 2.6.1*



Obr. 2.6.1 Náhradní schéma magnetického obvodu

Je tedy nutno vypočítat veškeré úbytky magnetického napětí v obvodu.

Výpočet úbytku napětí v zubu:

$$\Delta U_z = h_d \cdot H_z = 0,0631 \cdot 15000 = 946,5 \text{ A} \quad (3.60)$$

Pro výpočet úbytku napětí ve jhu statoru je nutno znát délku střední siločáry statorového jha:

$$l_{j1} = \pi \cdot \frac{D_v + h_{j1}}{2p} = \pi \cdot \frac{0,1899 + 0,006937}{28} = 0,02209 \text{ m} \quad (3.61)$$

Nyní lze spočítat úbytek napětí ve jhu statoru:

$$\Delta U_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 481 \cdot 0,02209 = 10,6243 \text{ A} \quad (3.62)$$

Jelikož je pro další výpočty nutné znát vnější průměr rotoru D_2 , byla tato hodnota zvolena s ohledem na podmínku, aby se motor vešel do kola koloběžky. V pozdější fázi výpočtů se hodnota přepočítala na $D_2 = 0,358$ m.

Pro výpočet délky střední siločáry l_{j2} rotoru je nutné znát šířku rotorového jha h_{j2} , která byla po dohodě s vedoucím zvolena shodná se šířkou statorového jha h_{j1} .

Nyní lze spočítat délku střední siločáry rotorového jha:

$$l_{j2} = \frac{(D_2 - h_{j2})}{2p} = \frac{(0,358 - 0,006937)}{28} = 0,03939 \text{ m} \quad (3.63)$$

Úbytek napětí v rotorovém jhu:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 481 \cdot 0,03939 = 18,9462 \text{ A} \quad (3.64)$$

Za předpokladu, že je známa permeabilita vakua $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$, lze spočítat indukci magnetického pole ve vzduchové mezeře.

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,7993}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 636042,7414 \text{ A/m} \quad (3.65)$$

Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem byla předběžně stanovena po domluvě s vedoucím na hodnotu $\delta = 0,001$ m.

Pro výpočet Carterova činitele je třeba znát γ :

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0055}{0,001}\right)^2}{5 + \frac{0,0055}{0,001}} = 2,881 \quad (3.66)$$

Pak Carterův činitel je:

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \delta \cdot \gamma} = \frac{0,02468}{0,02468 - 0,001 \cdot 2,881} = 1,1321 \quad (3.67)$$

Když je znám Carterův činitel lze přepočítat hodnotu vzduchové mezery:

$$\delta' = \delta \cdot k_c = 0,001 \cdot 1,1321 = 0,001132 \text{ m} \quad (3.68)$$

Z přepočtené hodnoty vzduchové mezery již lze spočítat úbytek napětí ve vzduchové mezeře:

$$\Delta U_\delta = H_\delta \cdot \delta' = 636042,7414 \cdot 0,001132 = 720,087 \text{ A} \quad (3.69)$$

Indukce na povrchu permanentních magnetů:

$$B_m = B_\delta = 0,7993 \text{ T} \quad (3.70)$$

Pokud je známa indukce na povrchu permanentních magnetů, je možno spočítat intenzitu magnetického pole magnetu:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{0,7993}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,05} = 605754,9918 \text{ A/m} \quad (3.71)$$

Nyní lze spočítat předběžnou výšku magnetu:

$$\begin{aligned}
 h_{m1} &= \frac{2 \cdot \Delta U_z + 2 \cdot \Delta U_\delta + \Delta U_{j1} + \Delta U_{j2}}{2 \cdot (H_c - H_m)} \\
 &= \frac{2 \cdot 676,432 + 2 \cdot 720,087 + 10,626 + 18,786}{2 \cdot (907000 - 605754,9918)} \\
 &= 4,6846 \cdot 10^{-3} \text{ m}
 \end{aligned} \tag{3.72}$$

Výška permanentního magnetu h_{m1} je stále nepřesná. Nepočítá totiž se zvětšením vzduchové mezery kvůli permanentnímu magnetu. Proto se musí několikrát použít iterace:

$$\delta' = \delta + h_{m1} \tag{3.73}$$

$$\gamma' = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta'}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta'}} \tag{3.74}$$

$$k'_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \delta' \cdot \gamma'} \tag{3.75}$$

$$\delta'' = k'_c \cdot \delta \tag{3.76}$$

Po několikátém zopakování iteračního postupu se hodnota ustálila na:

$$h_m = 4,485 \text{ mm} \tag{3.77}$$

Pokud je známa výška permanentního magnetu, lze spočítat i jeho šířku.

$$b_m = \frac{\Phi_c}{l_{e_skut} \cdot B_\delta} = \frac{0,000556}{0,0295 \cdot 0,7993} = 0,02357 \text{ m} \quad (3.78)$$

Délka rotoru byla zvolena shodná s délkou statoru: $l_r = 0,0295 \text{ m}$.

$$\begin{aligned} D_r &= D_1 + 2 \cdot h_m + 2 \cdot \delta = 0,33 + 2 \cdot 0,005372 + 2 \cdot 0,001 \\ &= 0,3427 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.79)$$

Při výpočtu hmotnosti všech magnetů je třeba znát hustotu daného magnetu $\rho_{pm} = 7500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, odečtenou z katalogového listu (viz příloha B).

$$\begin{aligned} m_{pm} &= b_m \cdot 2p \cdot h_{m1} \cdot l_r \cdot \rho_{pm} \\ &= 0,02357 \cdot 28 \cdot 0,005581 \cdot 0,0295 \cdot 7500 = 0,815 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.80)$$

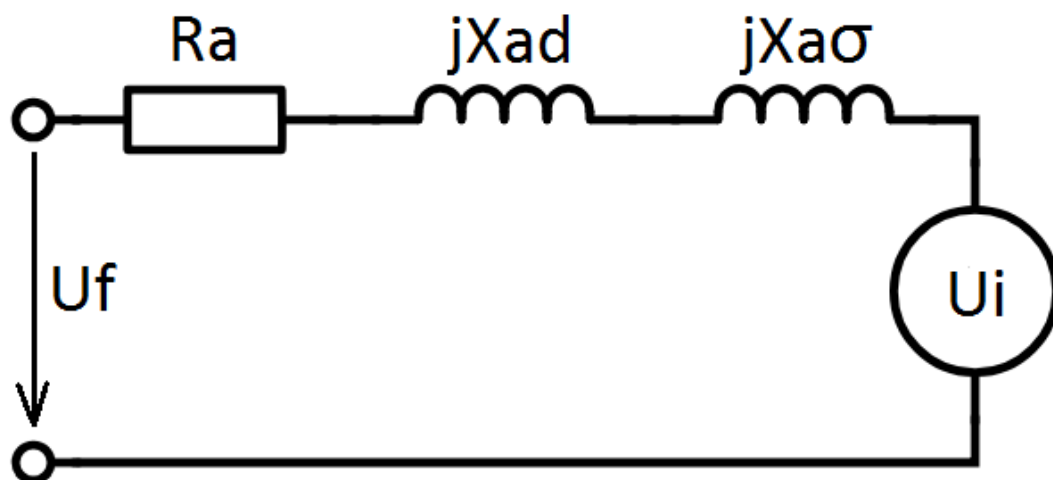
Pro kontrolu správnosti sycení jha rotoru se použije vztah:

$$B_{j2} = \frac{\phi_{j1}}{l_r \cdot \left(\frac{D_2 - D_r}{2}\right) \cdot 0,97} = \frac{0,0002779}{0,0295 \cdot \left(\frac{0,358 - 0,3427}{2}\right) \cdot 0,97} = 1,4 \text{ T} \quad (3.81)$$

Kontrolní hodnota sycení rotorového jha vyšla shodná s předem stanovenou a je proto správná.

Hodnota intenzity rotorového magnetického pole $H_{j2} = 36,4 \text{ A/m}$ byla zvolena podle katalogového listu pro elektromagnetické plechy SURA M350-50A (viz příloha A).

2.7 Výpočty pro náhradní parametry stroje



Obr. 2.7.1 Náhradní schéma motoru [1]

Hodnota délky vodiče ve statorové drážce l_v je shodná s délkou statoru $l_{e_skut} = 0,0295$ m.

Střední šířka cívky, která prochází středem drážky:

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_d)}{2p} \cdot \beta = \frac{\pi \cdot (0,33 - 0,0631)}{28} \cdot 0,6667 = 0,01996 \text{ m} \quad (3.82)$$

Jakmile je známa střední šířka cívky b_c , je možné spočítat délku čela:

$$l_\xi = 2 \cdot B + b_c \cdot K_\xi = 2 \cdot 0,005 + 0,01996 \cdot 1 = 0,02996 \text{ m} \quad (3.83)$$

Činitel K_ξ se zvolil z [16] po domluvě s vedoucím práce jako hodnota pro šablonové vinutí. Hodnota $B = 0,005$ je délka, o kterou měď vystupuje z drážky, než se zahne.

Z délky čela a délky vodiče v drážce lze spočítat délku závitu:

$$l_z = 2 \cdot l_v + 2 \cdot l_\xi = 2 \cdot 0,0295 + 2 \cdot 0,02996 = 0,1189 \text{ m} \quad (3.84)$$

Pokud je známa délka závitu, lze spočítat hmotnost měděného vinutí.

$$\begin{aligned} m_{cu} &= S_{cu} \cdot l_z \cdot \frac{V_d}{2} \cdot \rho_{cu} \cdot Q = 9,234 \cdot 0,1189 \cdot \frac{22}{2} \cdot 8960 \cdot 42 \\ &= 4,5459 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.85)$$

Odpor vinutí při 20 °C:

$$R_{a_{cu_{20^\circ C}}} = \frac{N_s \cdot l_z}{S_{cu} \cdot a} \cdot \rho_{cu_{20^\circ C}} = \frac{154 \cdot 0,1189}{9,234 \cdot 1} \cdot 1,709 \cdot 10^{-8} = 0,0339 \Omega \quad (3.86)$$

Poté je třeba spočítat hodnotu odporu vinutí při vyšší teplotě, jelikož se zvyšující se teplotou se mění i odpor. Po domluvě s vedoucím práce se zvolila třída izolace E, a proto se odpor počítá pro hodnotu teploty $T = 120 \text{ °C}$ podle [16].

K přepočtu odporu vinutí při jiné teplotě je třeba nejprve přepočítat hodnotu měrného elektrického odporu mědi.

$$\begin{aligned} \rho_{cu_{120^\circ C}} &= \rho_{cu_{20^\circ C}} \cdot (1 + \alpha_{cu} \cdot \Delta\vartheta) \\ &= 1,709 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (120 - 20)) \\ &= 2,3926 \cdot 10^{-8} \Omega/m \end{aligned} \quad (3.87)$$

Odpor měděného vinutí při 120 °C:

$$\begin{aligned} R_{a_{cu_{120^\circ C}}} &= \left(\frac{N_s \cdot l_z}{S_{cu} \cdot a} \right) \cdot \rho_{cu_{120^\circ C}} = \left(\frac{154 \cdot 0,1189}{9,234 \cdot 1} \right) \cdot 2,3926 \cdot 10^{-8} \\ &= 0,04746 \Omega \end{aligned} \quad (3.88)$$

Při výpočtu podélné reaktance X_{ad} je třeba znát magnetizační indukčnost L_{mi} . Ta se spočte pomocí efektivní šířky vzduchové mezery δ_{ef} .

$$\delta_{ef} = \frac{h_m}{\mu_r} + \delta'' = \frac{0,004485}{1,05} + 0,001037 = 0,005309 \text{ m} \quad (3.89)$$

Magnetizační indukčnost:

$$\begin{aligned} L_{mi} &= \frac{\mu_0}{\delta_{ef}} \cdot \frac{q \cdot 4}{Q} \cdot l_{eskut} \cdot t_p \cdot \left(N_s \cdot k_{v1} \cdot \frac{m}{\pi} \right)^2 \\ &= \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{0,005309} \cdot \frac{0,5 \cdot 4}{42} \cdot 0,0295 \cdot 0,03703 \\ &\quad \cdot \left(154 \cdot 0,866 \cdot \frac{3}{\pi} \right)^2 = 1,997 \cdot 10^{-4} \text{ H} \end{aligned} \quad (3.90)$$

Podélná reaktance:

$$X_{ad} = L_{mi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 1,997 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 49,9847 = 0,06272 \Omega \quad (3.91)$$

Pakliže je známa podélná reaktance X_{ad} , k výpočtu celkové reaktance je potřeba spočítat ještě rozptylová reaktance $X_{a\sigma}$. Pro její zjištění se musí spočítat rozptylová indukčnost $L_{a\sigma}$, činitel magnetické vodivosti rozptylu čel λ_ε a diferenční indukčnost L_{dif} .

Diferenční indukčnost:

$$L_{dif} = L_{mi} \cdot \tau_{dif} = 1,997 \cdot 10^{-4} \cdot 0,46 = 9,1861 \cdot 10^{-5} \text{ H} \quad (3.92)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\begin{aligned}\lambda_{\zeta} &= \frac{q}{l_{eskut}} \cdot l_{\zeta} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p \\ &= \frac{0,5}{0,0295} \cdot 0,02996 - 0,64 \cdot 0,6667 \cdot 0,037 = 0,08164\end{aligned}\quad (3.93)$$

Pro výpočet činitele drážkového rozptylu λ_d je třeba znát činitele $k'\beta$ a $k\beta$. Tyto činitele se spočítají následujícími vztahy podle [16] pro činitel zkrácení kroku $\beta = 0,6667$ až 1.

$$k'_{\beta} = \frac{1 + 3 \cdot \beta}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,6667}{4} = 0,75\quad (3.94)$$

$$k_{\beta} = \frac{1 + 3 \cdot k'_{\beta}}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,75}{4} = 0,8125\quad (3.95)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu:

$$\begin{aligned}\lambda_d &= \frac{h_2}{b_1 \cdot 3} \cdot k_{\beta} + \left(\frac{h_1 \cdot 3}{b_1 + b_0 \cdot 2} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k'_{\beta} \\ &= \frac{0,06}{0,01322 \cdot 3} \cdot 0,8125 \\ &\quad + \left(\frac{0,0024 \cdot 3}{0,01322 + 0,0055 \cdot 2} + \frac{0,0007}{0,0055} \right) \cdot 0,75 = 1,5476\end{aligned}\quad (3.96)$$

Rozptylová indukčnost:

$$\begin{aligned}
 L_{a\sigma} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot N_s^2 \cdot \frac{l_{e_{skut}}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d + \lambda_{\zeta}) + L_{dif} \\
 &= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 154^2 \cdot \frac{0,0295}{14 \cdot 0,5} \cdot (1,5476 + 0,08164) \\
 &\quad + 9,1861 \cdot 10^{-5} = 5,0111 \cdot 10^{-4} \text{ H}
 \end{aligned} \tag{3.97}$$

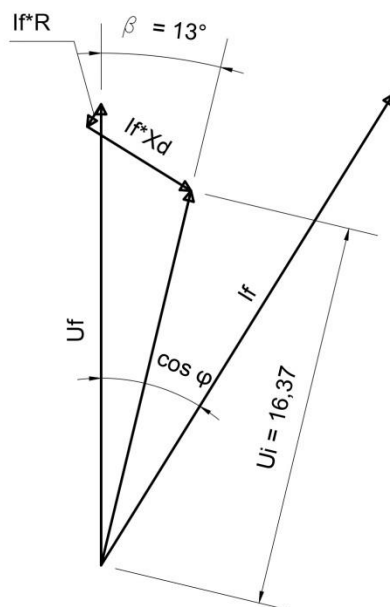
Nyní lze spočítat rozptylovou reaktanci $X_{a\sigma}$.

$$X_{a\sigma} = L_{a\sigma} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 5,0111 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 49,9847 = 0,1574 \Omega \tag{3.98}$$

Pokud je známa podélná reaktance X_{ad} i rozptylová reaktance $X_{a\sigma}$, jejich součet je roven celkové reaktanci X_d .

$$X_d = X_{a\sigma} + X_{ad} = 0,1574 + 0,06272 = 0,2201 \Omega \tag{3.99}$$

Pro zjištění činitele k_e je potřeba vytvořit fázorový diagram fázového napětí a proudu, ze kterého se zjistí indukované napětí U_i (viz Obr. 2.7.2).

Obr. 2.7.2 Fázorový diagram U_f a I_f

Po zjištění indukovaného napětí U_i již lze dopočítat činitel k_e .

$$k_e = \frac{U_i}{U_f} = \frac{16,37}{19,5959} = 0,84 \quad (3.100)$$

Z fázorového diagramu lze dále vyčíst zátěžný úhel $\beta = 13^\circ$, který udává, v jaké části momentové charakteristiky se stroj nachází. Teoreticky se se zátěžným úhlem dá pohnout až do blízkosti 90° , aniž by stroj vypadl ze synchronismu. V této hodnotě β by stroj nabýval hodnoty výkonu kolem 4kW.

2.8 Ztráty a účinnost motoru

2.8.1 Výpočet ztrát ve vinutí statoru

Jouleovy ztráty, nacházející se v měděném vinutí, jsou závislé na velikosti procházejícího proudu a na odporu daného vinutí.

$$\Delta P_j = I_f^2 \cdot m \cdot R_{acu_{120}^\circ C} = 23,5437^2 \cdot 3 \cdot 0,04746 = 78,9146 \text{ W} \quad (3.101)$$

2.8.2 Výpočet ztrát v železe

Celkové ztráty v železných částech statoru jsou určeny součtem magnetických ztrát v zubech ΔP_{Fe_z} a magnetických ztrát ve statorovém jhu $\Delta P_{Fe_{j1}}$. Pro zjištění ztrát v železných částech motoru je třeba znát hmotnosti dílčích částí stroje.

Hmotnost statorových zubů:

$$\begin{aligned} m_{fe_z} &= \rho_{fe} \cdot Q \cdot l_{e_{skut}} \cdot b_z \cdot h_z = 7650 \cdot 42 \cdot 0,0295 \cdot 0,011 \cdot 0,0631 \\ &= 6,5789 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.102)$$

Výška zubu $h_z = 0,0631$ m je shodná s výškou drážky h_d .

Hmotnost statorového jha se spočte takto:

$$\begin{aligned} m_{fe_{j1}} &= \rho_{fe} \cdot l_{e_{skut}} \cdot h_{j1} \cdot (h_{j1} + D_v) \cdot \pi \\ &= 7650 \cdot 0,0295 \cdot 0,0069 \cdot (0,0069 + 0,19) \\ &= 0,9632 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.103)$$

Součtem hmotnosti statorových zubů a hmotnosti statorového jha se zjistí celková hmotnost aktivního statorového železa:

$$m_{fe_s} = m_{fe_{j1}} + m_{fe_z} = 0,9632 + 6,5789 = 7,5421 \text{ kg} \quad (3.104)$$

Pro zjištění celkové hmotnosti stroje m_c je potřeba spočítat ještě hmotnost rotorového železa m_{fe_r} :

$$\begin{aligned}
 m_{fe_r} &= \rho_{fe} \cdot l_r \cdot \frac{D_2 - D_r}{2} \cdot \pi \cdot D_r \\
 &= 7650 \cdot 0,0295 \cdot \frac{0,355 - 0,341}{2} \cdot \pi \cdot 0,341 \\
 &= 1,6959 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{3.105}$$

Celková hmotnost stroje je součet hmotností železných částí stroje, vinutí a permanentních magnetů:

$$\begin{aligned}
 m_c &= m_{fe_r} + m_{fe_s} + m_{cu} + m_{pm} \\
 &= 1,6959 + 7,5421 + 44,5459 + 0,6841 = 14,468 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{3.106}$$

Pro výpočet magnetických ztrát v železe statorových zubů a statorového jha je potřeba znát činitele $k_{dz} = 2$ a $k_{dj} = 2$. Tyto činitele vyjadřují konstrukční nedokonalosti stroje, jako například narušení vrstvy laku a tím způsobené zkraty. Zvoleny byly podle [16].

Dále je potřeba znát ztrátová čísla pro použité elektromagnetické plechy. Pro statorový zub s magnetickou indukcí $B_z = 1,8 \text{ T}$ se zvolila hodnota $\Delta p_{1,8/50} = 5 \text{ W/kg}$.

Pro statorové jho s hodnotou magnetické indukce $B_{j1} = 1,4 \text{ T}$ se zvolila hodnota $\Delta p_{1,4/50} = 2,75 \text{ W/kg}$.

Hodnoty ztrátových čísel byly zvoleny podle katalogového listu použitých elektromagnetických plechů SURA M350-50A (viz příloha A).

Magnetické ztráty v železe statorových zubů se poté spočte takto:

$$\Delta P_{fe_z} = \Delta p_{1,8/50} \cdot k_{dz} \cdot m_{fe_z} = 5 \cdot 2 \cdot 6,5789 = 65,7892 \text{ W} \tag{3.107}$$

Magnetické ztráty ve statorovém jhu:

$$\begin{aligned}\Delta P_{fe_j1} &= \Delta p_{1,4/50} \cdot k_{dj} \cdot m_{fe_j1} = 2,75 \cdot 2 \cdot 0,9632 \\ &= 5,2977 \text{ W}\end{aligned}\quad (3.108)$$

Součtem magnetických ztrát v železe statorových zubů a magnetických ztrát ve statorovém jhu vyjdou celkové ztráty v železných částech stroje:

$$\Delta P_{fe} = \Delta P_{fe_z} + \Delta P_{fe_j1} = 65,7892 + 5,2977 = 71,087 \text{ W} \quad (3.109)$$

2.8.3 Výpočet mechanických ztrát

Pro zjištění hodnoty mechanických ztrát stroje je potřeba zjistit obvodovou rychlost stroje v .

$$v = \frac{n}{30} \cdot \frac{D_2}{2} \cdot \pi = \frac{214,2203}{30} \cdot \frac{0,355}{2} \cdot \pi = 3,9819 \text{ m/s} \quad (3.110)$$

Mechanické ztráty:

$$\begin{aligned}\Delta P_m &= k_\rho \cdot v^2 \cdot D_2 \cdot (t_p \cdot 0,6 + l_{e_skut}) \\ &= 10 \cdot 3,9819^2 \cdot 0,355 \cdot (0,03703 \cdot 0,6 + 0,0295) \\ &= 2,9109 \text{ W},\end{aligned}\quad (3.111)$$

kde koeficient $k_\rho = 10$, který zohledňuje mechanické ztráty, byl zvolen podle [3].

2.8.4 Výpočet celkových ztrát stroje a výsledné účinnosti

Celkové ztráty stroje se spočítají jako součet mechanických ztrát, ztrát v železe a ztrát ve vinutí. Ztráty v permanentních magnetech a v rotoru se předpokládají tak malé, že

se zanedbají. Jelikož se bude motor koloběžky napájet baterií, je potřeba použít PWM modulátor, který navýší ztráty o 20 %.

Celkové ztráty:

$$\begin{aligned}\Delta P &= (\Delta P_m + \Delta P_{fe} + \Delta P_j) \cdot 1,2 \\ &= (2,9109 + 71,087 + 78,9146) \cdot 1,2 = 183,495 \text{ W}\end{aligned}\quad (3.112)$$

Výsledná účinnost stroje pak bude:

$$\eta = \frac{P}{\Delta P + P} \cdot 100 = \frac{1000}{183,495 + 1000} \cdot 100 = 84,496 \% \quad (3.113)$$

3 Ověření návrhu motoru

Navržený stroj se ověřil nejprve v programu Ansys RMxprt a poté pomocí metody konečných prvků (MKP) v programu FEMM.

3.1 Ověření návrhu motoru pomocí programu Ansys RMxprt

V programu RMxprt se zvolil typ stroje – PMSM s vnějším rotorem. Poté se do programu vložily všechny navržené a vypočtené konstrukční rozměry stroje (například vnější a vnitřní rozměry rotoru a statoru, počet permanentních magnetů a jejich rozměry, rozměry statorové drážky, rozměry vzduchové mezery a délka stroje). Pak se vložily také ostatní vypočtené parametry a typy použitých materiálů. Nakonec se zadaly parametry stroje: napájecí napětí $U_{\max} = 48 \text{ V}$, výkon motoru $P = 1000 \text{ W}$, otáčky $n = 214,2203 \text{ ot/min}$, provozní teplota $T = 120 \text{ °C}$ a mechanické ztráty motoru $\Delta P_m = 2,9109 \text{ W}$.

Tabulka 3.1 Porovnání analyzovaných a spočtených hodnot

	<i>RMxpřt</i>	<i>Spočteno</i>	
U_i	39,6022	40,320	V
I_f	20,1655	23,54373	A
ΔP_{fe}	54,3407	71,08697	W
ΔP_j	45,180	78,91461	W
ΔP	102,503	183,495	W
η	90,7084	84,496	%
n	214	214,2203	ot/min
M	44,653	44,104	Nm
β	10,706	13	°

Tabulka 3.2 Ověření pro hmotnosti stroje

m_{cu}	3,53004	4,5459	kg
m_{pm}	0,684139	0,684075	kg
m_{fe_s}	7,34295	7,54215	kg
m_{fe_r}	1,67526	1,69586	kg
m_c	13,2324	14,468	kg

Tabulka 3.3 Ověření magnetické indukce v různých částech stroje

B_z	1,7738	1,7657	T
B_{j1}	1,41773	1,40744	T
B_{j2}	1,39748	1,40744	T
B_δ	0,739393	0,799275	T
B_m	0,785461	0,79927	T

Tabulka 3.4 Ověření rozměrů drážky

b_1	13,4317	13,2202	mm
b_2	4,43898	4,3736	mm

Tabulka 3.5 Ověření indukčnosti a odporu stroje

L_{mi}	0,0002124	0,0001997	H
$L_{a\sigma}$	0,0004566	0,0005011	H
$R_{a_{cu_{120^\circ C}}}$	0,037034	0,047455	Ω

Spočtené hodnoty z návrhu se liší oproti hodnotám spočteným programem RMxprt jen nepatrně. Větší rozdíl hmotnosti vinutí m_{cu} a odporu $R_{a,cu,120^\circ C}$ je způsoben tím, že RMxprt počítá čela vinutí jinak. Při porovnání rozdílu ve ztrátách ΔP je třeba zohlednit fakt, že se připočetlo 20 % ztrát, kvůli použití PWM.

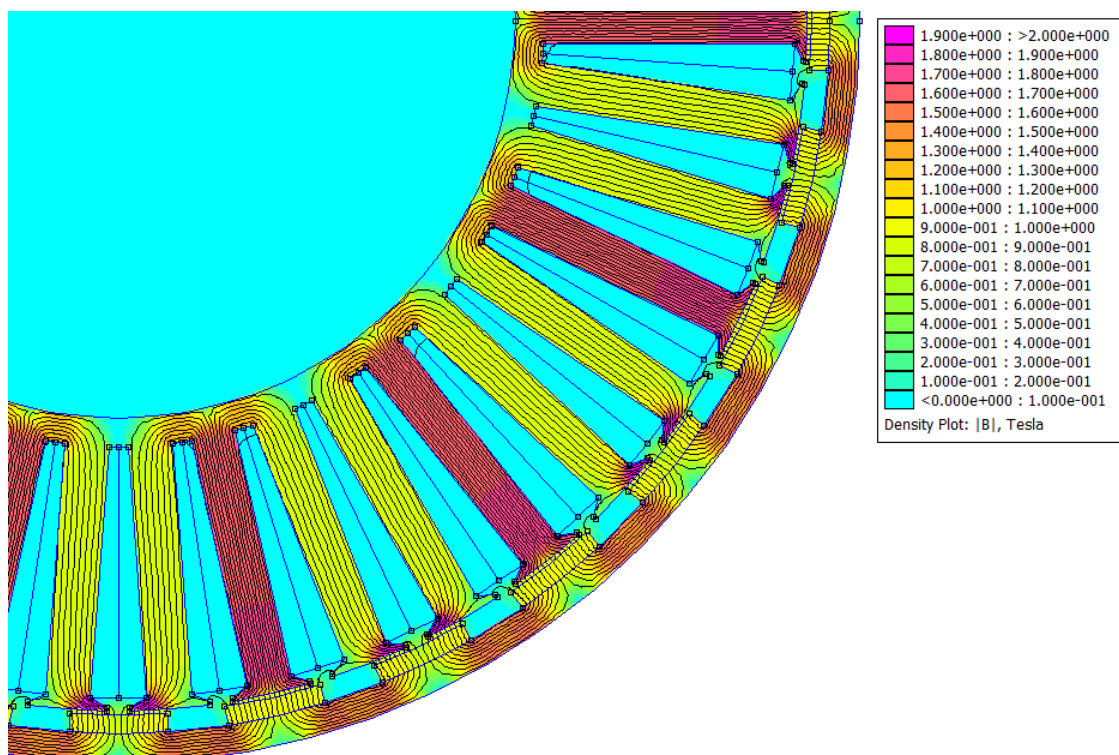
3.2 Ověření návrhu motoru pomocí MKP

Navržený a vypočtený model motoru se ověřil také pomocí metody konečných prvků v programu FEMM. Do něj se importoval 2D model motoru s přesnými rozměry statoru, rotoru, permanentních magnetů, statorové drážky, vinutí a vzduchové mezery. Poté se nadefinovaly vlastnosti materiálů statorových a rotorových plechů SURA M350-50A (viz příloha A), mědi ve vinutí a magnetů N35UH (viz příloha B) včetně směru magnetizace. Vlastnosti mědi a vzduchu byly nadefinovány z knihoven programu FEMM. Nakonec se musel určit i proud I_f procházející vinutím pro všechny fáze v daném čase:

$$1. \text{ fáze: } U = \sqrt{2} \cdot I_f = \sqrt{2} \cdot 23,5437 = 33,2959 \text{ A} \quad (3.114)$$

$$2. \text{ fáze: } V = \frac{I_f}{\sqrt{2}} = \frac{23,5437}{\sqrt{2}} = 16,6479 \text{ A} \quad (3.115)$$

$$3. \text{ fáze: } W = \frac{I_f}{\sqrt{2}} = \frac{23,5437}{\sqrt{2}} = 16,6479 \text{ A} \quad (3.116)$$



Obr. 3.2.1 Ověření magnetické indukce v programu FEMM

Na obrázku 3.2.1 vygenerovaném v programu FEMM, lze vidět hodnoty magnetické indukce pro různé části stroje. Dále jsou znázorněny siločáry procházející zuby, jhem statoru, permanentními magnety a jhem rotoru. Pro ověření sycení se zvolila konkrétní místa v zubu, jhu statoru, permanentním magnetu a jhu rotoru, ze kterých se odečetla hodnota magnetické indukce.

Tabulka 3.6 Ověření magnetické indukce v částech motoru

	výpočet	MKP
B_z	1,766	1,75261
B_{j1}	1,407	1,3943
B_{j2}	1,407	1,40747
B_m	0,8	0,847961
B_δ	0,799	0,905

Z tabulky 3.6 je patrné, že pro jednotlivá místa v motoru se indukce, zjištěná pomocí MKP, shoduje s indukcí spočítanou při návrhu stroje. Magnetická indukce není ve všech místech stejná, odečetla se ze středu zubu, jha, magnetu a vzduchové mezery.

4 Vytvoření 3D modelu

Na základě návrhu stroje byl vytvořen 3D model PMSM motoru pro elektrokoloběžku. Model vychází z navrženého konstrukčního řešení.

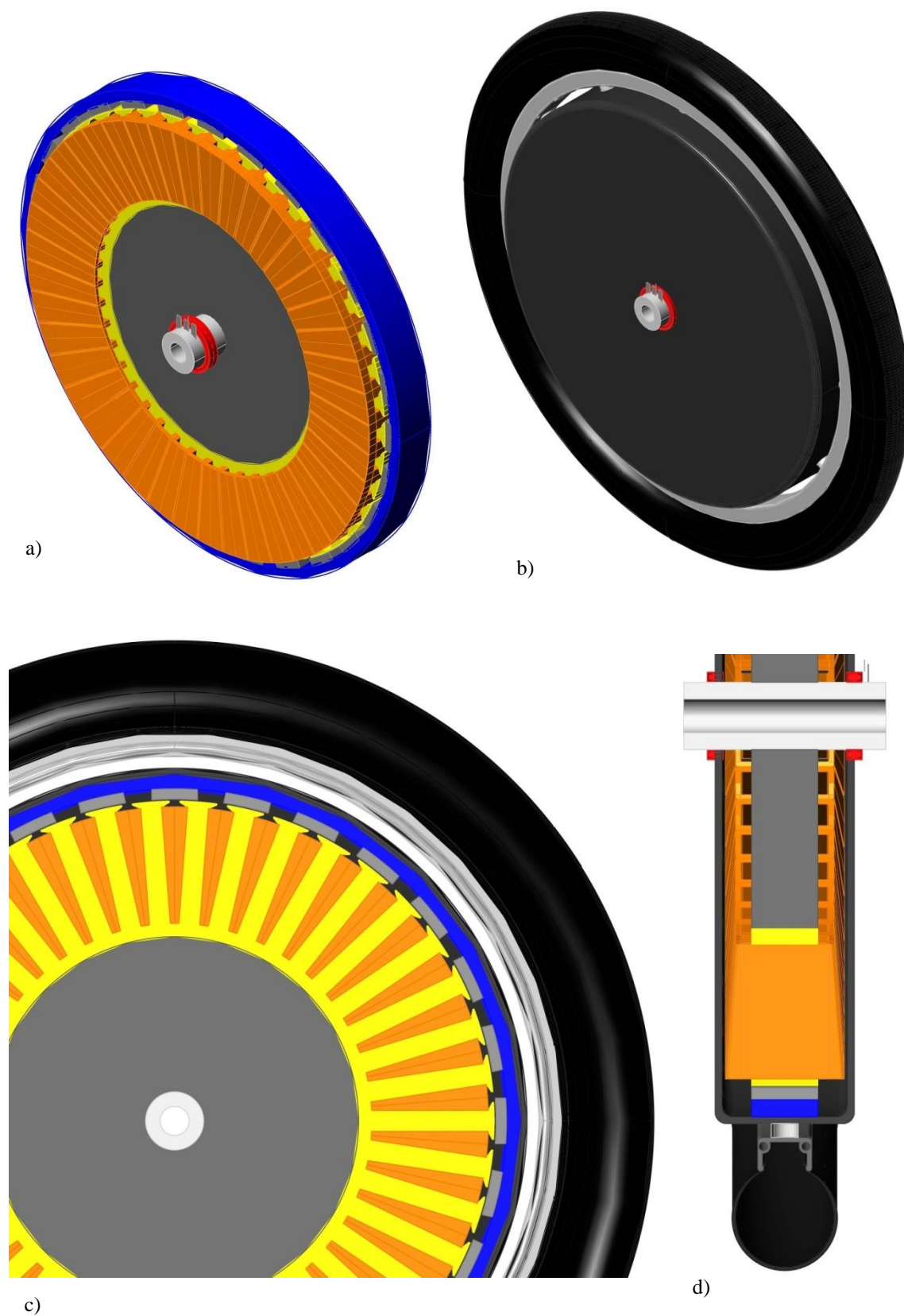
Rozměry stroje jsou totožné se spočtenými hodnotami v návrhu stroje. Stator je pro lepší přehlednost vybarven žlutou barvou. Rotor je modrý. Ložiska jsou červená. Permanentní magnety jsou šedivé. Vinutí je oranžové.

Stator je nalisován na nemagnetickou plastovou středovou výplň, jež je statorem obklopena. Skrze tento střed je nalisována dutá hřídel, pomocí které je motor pevně spojen s vidlicí koloběžky. Stator, středová výplň a hřídel jsou tudíž vzájemně napevno spojeny a nevykonávají pohyb. Na statoru je v drážkách navinuto vinutí. Na konci hřídele jsou vyvedeny tři ploché kontakty. K nim je skrze dutou hřídel a skrze středovou výplň přivedeno vinutí. Pomocí těchto kontaktů se motor připojí k PWM regulátoru.

Rotor, na kterém jsou připevněny permanentní magnety, je pohyblivou částí stroje. Na něj je pevně připevněn kryt motoru, který dále obklopuje vnější stranu ložisek a je k nim připevněn. Kryt motoru je tudíž, společně se statorem, pohyblivou částí stroje. Ráfek nosící plášť je s krytem motoru pevně spojen na deseti místech.

Jelikož je motor použit v elektrické koloběžce, která jezdí venku při působení různých povětrnostních vlivech, má kryt motoru stupeň krytí IP 55 [26]. Odolá tak působení tryskající vody aniž by se dostala dovnitř krytu.

3D model byl vytvořen v programu progeCAD. Nejedná se o reálný model, jde pouze o orientační návrh.



Obr. 4.2.1 a) Model motoru bez krytu, b) Model motoru s krytem, c) Příčný řez motorem, d) Podélný řez motorem



Obr. 4.2.2 a) Render motoru bez krytu, b) Render motoru s krytem

5 Kalkulace ceny motoru

V rámci zadání se zpracoval výpočet přibližné ceny motoru. Cena je pouze orientační. Nebere se v potaz práce na výrobě stroje ani marže výrobce, ale čistě jen cena materiálu.

5.1 Cena statorových a rotorových plechů

Na základě telefonické domluvy s technikem firmy EXMONT Energo a. s., která se mimo jiné zabývá výrobou elektromotorů a generátorů, se došlo k závěru, že cena požadovaného plechu M350-50A o tloušťce 0,5 mm při tomto počtu kusů je přibližně 100 Kč za plech. Při sériové výrobě motoru by bylo možné získat množstevní slevu až 50 %. Pro zvolené rozměry plechu se obrábění provádí pomocí laseru. Rozměry plechu jsou zvoleny jako vnější průměr rotoru D_2 . Při použití celkově 59 plechů je tedy výsledná cena za plechy přibližně $cena_{pl} = 5900$ Kč.

5.2 Cena vinutí

V návrhu stroje je použit normalizovaný vodič o průměru $d_v = 1,4 \text{ mm}$. Podle [21] se cena lakovaného vinutí s tímto průměrem pohybuje kolem 688 Kč za 0,5 kg. Hmotnost vinutí pro navržený motor vyšla $m_{cu} = 4,5459 \text{ kg}$. Celková cena vinutí pro navržený motor tedy bude:

$$cena_{cu} = \frac{cena_{cu_vzor}}{m_{cu_vzor}} \cdot m_{cu} = 6\,255,16 \text{ Kč} \quad (3.117)$$

5.3 Cena permanentních magnetů

Při zjišťování cen permanentních magnetů se berou v potaz hlavně jejich rozměry a počet. Počet permanentních magnetů je roven počtu pólů motoru $2p = 28$. Pro zjištění ceny se vzal jako vzor permanentní magnet N35UH podle [20] o rozměrech (viz tabulka 5.1)

Tabulka 5.1 Porovnání ceny permanentních magnetů pro různé rozměry

	<i>vzor</i>	<i>návrh</i>	
<i>výška h_m</i>	4	4,49	<i>mm</i>
<i>šířka b_m</i>	26	23,57	<i>mm</i>
<i>délka l_m</i>	26	29,5	<i>mm</i>
<i>V</i>	2704	3121,96	<i>mm</i>
<i>cena</i>	54	62,35	<i>Kč</i>

Cena se porovná na základě zjištěného objemu vzorového magnetu

$$V_{vzor} = h_m \cdot b_m \cdot l_m = 4 \cdot 26 \cdot 26 = 2704 \text{ mm}^3 \quad (3.118)$$

$$\begin{aligned} V_{pm} &= h_m \cdot b_m \cdot l_m = 4,49 \cdot 23,57 \cdot 29,5 \\ &= 3121,96 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (3.119)$$

Cena požadovaného magnetu se pak spočte:

$$\begin{aligned} cena_{pm} &= \frac{cena_{vzor}}{V_{vzor}} \cdot V_{pm} = \frac{54}{2704} \cdot 3121,96 \\ &= 62,35 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (3.120)$$

Cena za všechny permanentní magnety:

$$cena_{pm_celk} = cena_{pm} \cdot 2p = 62,35 \cdot 28 = 1\,745,8 \text{ Kč} \quad (3.121)$$

5.4 Celková cena motoru

Výsledná cena motoru je součtem cen všech potřebných komponent k výrobě motoru.

$$\begin{aligned} cena_{celk} &= cena_{pl} + cena_{cu} + cena_{pm_celk} \\ &= 5900 + 6255,16 + 1745,8 = 13\,900,98 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (3.122)$$

Výsledná celková cena bere v úvahu skutečnost, že se vyrábí pouze jeden motor. Při sériové výrobě by cena motoru mohla být skoro poloviční.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout synchronní motor s permanentními magnety (PMSM) určený pro pohon koloběžky. Uložení motoru se předpokládá v zadním kole s rozměrem ráfku 16“. Rozměry a hmotnost vychází z koloběžky Yedoo Mezeq [8].

V kapitole 2 se vypočítal elektromagnetický návrh PMSM pro koloběžku. Na počátku se zvolily jízdní parametry reálné trati z obce Pec na rozhlednu Čerchov na Domažlicku. Z tohoto profilu trati se zvolil, mimo jiné, úhel stoupání, který musí koloběžka překonat. Spočetla se hmotnost celé koloběžky včetně jezdce, baterie a hmotnosti již navrhnutého elektromotoru. Pro všechny jízdní parametry se vypočítaly jízdní odpory, pomocí kterých se zjistil potřebný výkon $P = 1000 \text{ W}$, který musí motor vydat pro jejich překonání.

Po zjištění potřebného výkonu P , se v kapitole 2.2 spočítaly základní parametry stroje: počet otáček $n = 214,22 \text{ ot/min}$, fázový proud $I_f = 23,54 \text{ A}$ a předběžná délka stroje $l = 29,45 \text{ mm}$, která se později přepočítala s ohledem na použití elektrotechnických plechů SURA M350-50A o tloušťce 0,5 mm na hodnotu $l_{e_skut} = 29,5 \text{ mm}$. Poté se spočetly potřebné rozměry pro vinutí stroje, ze kterých se zjistil počet závitů $N_s = 154$. Dále se s ohledem na velikost ráfku zvolil vnější průměr statoru $D_1 = 0,33 \text{ m}$. Vnitřní průměr statoru se dopočítal na hodnotu $D_v = 0,19 \text{ m}$. Použitý vodič se musel rozdělit do svazku 6 normalizovaných vodičů s průměrem $d_v = 1,4 \text{ mm}$. Spočítaly se veškeré rozměry statorové drážky. Při návrhu rotoru se použily permanentní magnety N35UH se spočítanými rozměry výšky $h_m = 4,485 \text{ mm}$ a šířky $b_m = 23,57 \text{ mm}$. Délka magnetů je shodná s délkou rotoru a statoru $l_{e_skut} = 29,5 \text{ mm}$. Vnitřní průměr rotoru je $D_r = 0,3427 \text{ m}$ a vnější průměr je $D_2 = 0,355 \text{ m}$. Dále se spočítaly náhradní parametry stroje, ztráty v motoru a výsledná účinnost stroje $\eta = 84,496 \%$. Návrh se počítal podle [3] a [16].

V další části se návrh motoru ověřil nejprve v programu RMXprt a poté pomocí metody konečných prvků (MKP). Při ověření v RMXprt se lišily ztráty, protože RMXprt nepočítá do ztrát použití PWM regulátoru. Odchyly v hmotnosti stroje jsou způsobeny jiným způsobem výpočtu čel vinutí. Tím pádem se lišil i výsledný odpor. Simulace pomocí MKP v programu FEMM ověřila sycení rotorového a statorového jha, magnetů, vzduchové mezery a statorových zubů.

Po dokončení návrhu motoru se vytvořil 3D model motoru, který znázorňuje všechny součásti motoru, včetně krytu motoru a jeho upevnění do ráfku kola. V kapitole je popsáno, jak je motor, umístěný v koloběžce konstrukčně řešen.

V poslední části se provedla kalkulace ceny motoru, kde se zohlednily všechny části stroje. Byla zjištěna cena jednotlivých komponent a přepočítána na navržený model. Po součtu všech cen vyšla cena jednoho motoru 13 900,98 Kč.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 9788070434444.
- [3] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [4] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory: hnací charakteristika: brzdění: odpruženost: říditelnost, ovladatelnost: stabilita*. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [5] Elektrokoloběžka MA-MI MOUNTAIN 2019 | MAMIBIKE. *Elektrokoloběžky MAMI bike - unikátní česká koloběžka* [online]. Copyright © 2020 [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <https://www.mamibike.cz/produkt/elektrokolobezka-ma-mi-mountain-2019/>
- [6] Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část) - Časopis Elektro - Odborné časopisy. *Odborné časopisy* [online]. Copyright © 2014 [cit. 09.05.2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>
- [7] HENDERSHOT, J. R. a T.J.E MILLER. *Design of Brushless Permanent - Magnet Motors*. Oxford: Oxford univerzity press, 2011. Magna physics publications. ISBN 978-0-19-859389-8.
- [8] Koloběžka pro dospělé Yedoo Mezeq | Yedoo. [online]. Dostupné z: <https://www.yedoo.eu/cs/produkt/mezeq-0fVmNu>
- [9] Odpor valivý – autolexicon.net. [online]. Copyright © 2020 [cit. 11.05.2020]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/odpor-valivy/>
- [10] Směr a rychlost větru. Portál ČHMÚ : Home [online]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/opss/pocasicko/vysvetlivky_vitr.html
- [11] BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu - Časopis Elektro - Odborné časopisy. *Odborné časopisy* [online]. Copyright © 2014 [cit. 12.05.2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [12] Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory - ElektroPrůmysl.cz. informace ze světa průmyslu a elektrotechniky - ElektroPrůmysl.cz [online]. Copyright © 2011 [cit. 12.05.2020]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/bezkartacove-stejnosmerne-blcdc-motory>
- [13] Střídavý DC (BLDC) motor - konstrukce a práce. Webstarsnet [online]. Copyright © 2019 Bilindhirori [cit. 13.05.2020]. Dostupné z: <https://webstarsnet.com/cs/23-brushless-dc-blcdc-motor-construction-and-working.html>
- [14] El. motory a jejich řízení - základní přehled - 1.díl | Automatizace.HW.cz. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. Copyright © 1997 [cit. 13.05.2020]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/el-pohony-mereni-a-regulace/el-motory-a-jejich-rizeni-zakladni-prehled.html>
- [15] Úvod [online]. Copyright © [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2779/4_TVO_J%C3%ADzdn%C3%AD%20odpory.pdf
- [16] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [17] Hustota materiálů a látek - Portál pro strojní konstruktéry. Portál pro strojní konstruktéry [online]. Copyright © 2013 [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hustota-materialu-a-latek>

- [18] [online]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html>
- [19] Ministerstvo dopravy ČR - Ministerstvo. Ministerstvo dopravy ČR - Domovská stránka [online]. Copyright © 2020 Ministerstvo dopravy ČR [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: [https://www.mdcz.cz/Ministerstvo/Zadost-o-poskytnuti-informace-\(1\)/Poskytnute-informace/Provoz-kolobezky-s-elektrickym-pohonem,-tzv-elekt?fbclid=IwAR2rMnMuu7SSIheJ9bVnGUyZlhacrAR1hEs3ntV3mptayw3TfFsyaKreYw](https://www.mdcz.cz/Ministerstvo/Zadost-o-poskytnuti-informace-(1)/Poskytnute-informace/Provoz-kolobezky-s-elektrickym-pohonem,-tzv-elekt?fbclid=IwAR2rMnMuu7SSIheJ9bVnGUyZlhacrAR1hEs3ntV3mptayw3TfFsyaKreYw)
- [20] MAGNET NH0845 26x26x4 N35UH. Neomag [online]. Dostupné z: <http://neomag.cz/cz/katalog/neodymove-magnety/hranoly/magnet-nh085-26-x-26-x-4-n35uh/?fbclid=IwAR0VI6W0Moqqy2GMqTqIiTw57Xy9apYYowOI0KzixI1d6Lkvpag6JDk6m4>
- [21] Drát pro vinutí s jednou vrstvou laku 1,4mm 0,5kg -65-200°C. VP Centrum elektronika - součástky, baterie, cestovní adaptéry [online]. Copyright © 2020 [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: https://www.vpcentrum.eu/drat-pro-vinuti-s-jednou-vrstvou-laku-1-4mm-0-5kg-65-200-c?gclid=CjwKCAjw_qb3BRAVEiwAvwq6VoLFXExtYU3e83x5hmECN1Ey2Ujx-gPwpzXCdZidk4qqjdE2DWeVhoCLEkQAvD_BwE
- [22] Jak vybrat elektrickou koloběžku. Alza.cz - největší obchod s počítači a elektronikou | Alza.cz [online]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/sport/jak-vybrat-elektrickou-kolobezku?fbclid=IwAR0-1K0vXijJ04Vd3cZ1WmnDm2dlHNM7dDITkFZA8hwcY2-skjpbKlgoyqs>
- [23] Xiaomi koloběžka Mi Electric Scooter - černá - Xiaomi Store. [online]. Copyright ©2020 PRG Trading Group s.r.o., provozovatel obchodu Xiaomi [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <https://xiaomi-store.cz/cs/kolobezky/594-xiaomi-kolobezka-mi-electric-scooter-cerna-6970244526823.html>
- [26] Stupeň krytí IP - ochrana proti vodě a průniku předmětů | Anténa.cz. ANTÉNA - Antény, satelity a TV rozvody s 30letou tradicí [online]. Dostupné z: <https://www.antena.cz/stupen-kryti-ip-ochrana-proti-vode-a-pruniku-predmetu-c570/>

Přílohy

Příloha A – Katalogový list pro elektrotechnické plechy SURA® M350-50A

Typical data for SURA® M350-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,08	36,4	0.06	0.17	0,48	2.02	8.34
0,2	0,09	0,20	48,1	0.24	0.62	1,75	7.15	29.0
0,3	0,18	0,36	56,1	0.50	1.30	3,62	14.7	60.1
0,4	0,30	0,54	63,2	0.81	2.15	6,02	24.6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1.18	3.17	8,96	37.2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1.60	4.36	12,5	53.1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2.08	5.73	16,6	72.7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2.62	7.31	21,5	96.9	474
0,9	1,16	1,94	106	3.21	9.09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3.88	11.1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4.61	13.4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5.43	16.0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6.37	18.9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7.53	22.3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8.99	26.6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					

Loss at 1.5 T, 50 Hz, W/kg	3,29
Loss at 1.0 T, 50 Hz, W/kg	1,39
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,58
H = 5000 A/m, T	1,67
H = 10000 A/m, T	1,78

Coercivity (DC), A/m	45
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42

Yield strength, N/mm ²	320
Tensile strength, N/mm ²	460
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HV5 (VHN)	160

RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher



Příloha B – Katalogový list pro permanentní magnety N35UH



N35UH

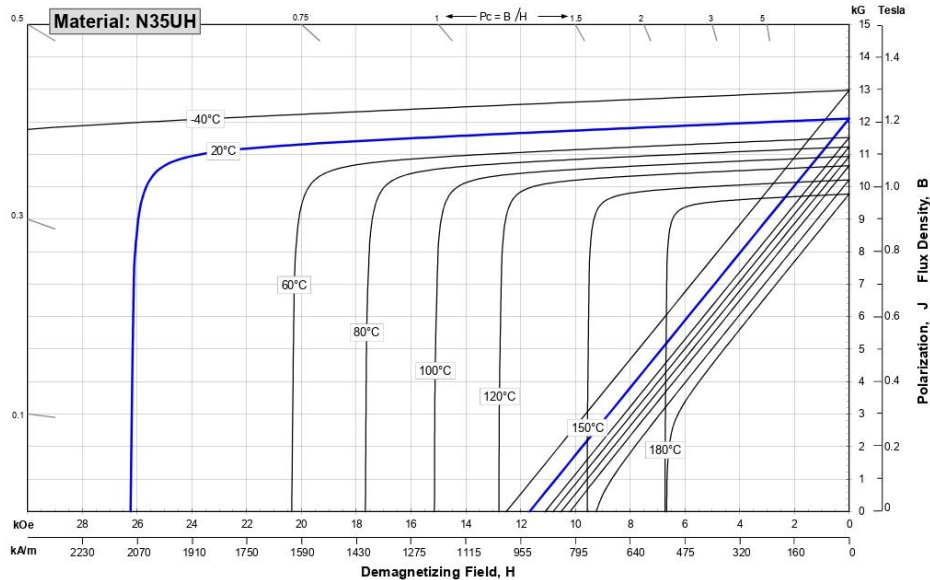
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
Br , Residual Induction	Gauss	11,700	12,100	12,500
	mT	1170	1210	1250
H_{oB} , Coercivity	Oersteds	10,800	11,400	12,000
	kA/m	860	907	955
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	25,000		
	kA/m	1,990		
BHmax , Maximum Energy Product	MGOe	33	36	38
	kJ/m ³	263	283	302

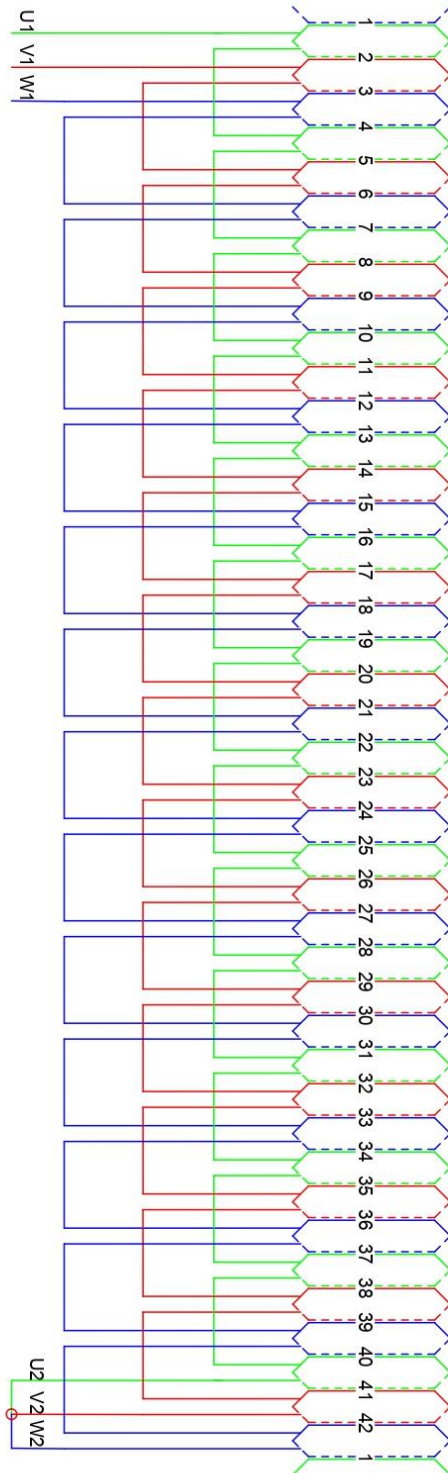
Characteristic	Units	Thermal Properties	
		C //	C ⊥
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾	of Induction, α(Br)	%/°C	-0.120
	of Coercivity, α(Hc)	%/°C	-0.465
	Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C x 10 ⁻⁶	7.5
Thermal Conductivity	W / (m · K)		7.6
Specific Heat ⁽³⁾	J / (kg · K)		460
Curie Temperature, T _c	°C		310
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300
		MPa	285
	Density	g/cm ³	7.5
	Hardness, Vickers	Hv	620
Electrical Resistivity, ρ	μΩ · cm		180

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 180 °C
(2) Between 20 and 200 °C (3) Between 20 and 140 °C

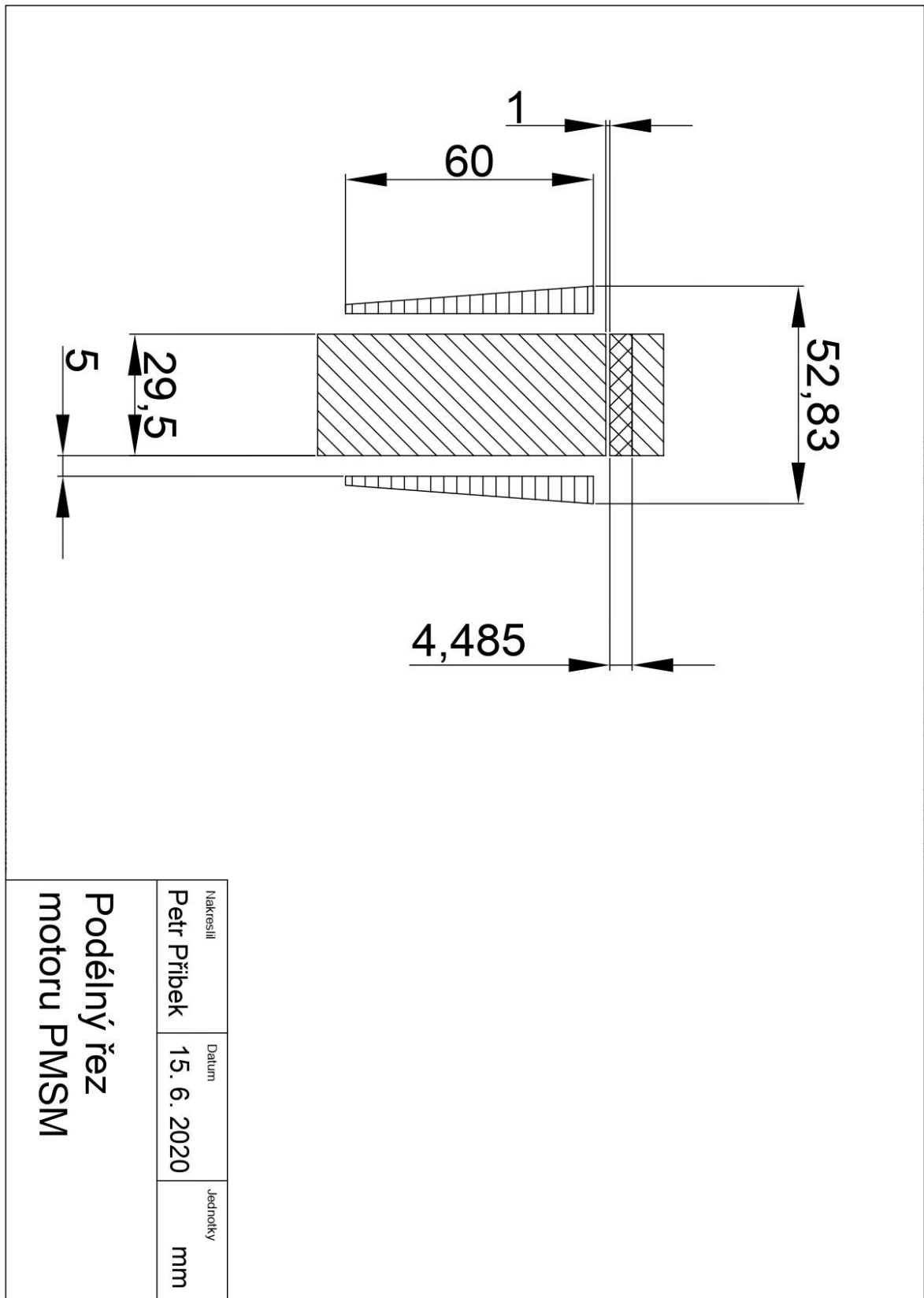


Notes The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size. Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.

Příloha C – Konstrukční schéma uspořádání vinutí



Příloha D – Konstrukční výkres motoru - podélný řez



Příloha E – Konstrukční výkres motoru – příčný řez

