

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh synchronního motoru s permanentními magnety pro
pohon elektromobilu**

Autor: Bc. Vladimír Krajánek

Vedoucí práce: Ing. Karel Hruška, PhD.

2016

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW, apod.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Plzni dne

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Karlu Hruškovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady, vstřícnost a především trpělivost při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Vladimír KRAJÁNEK
Osobní číslo: E14N0138P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Průmyslová elektronika a elektromechanika
Název tématu: Návrh synchronního motoru s permanentními magnety pro pohon elektromobilu
Zadávající katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu.
2. Volba konceptu - přenos momentu, způsob chlazení, atp.
3. Návrh elektromotoru s permanentními magnety podle zvolené koncepce.
4. Ověření návrhu pomocí FEM analýzy.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

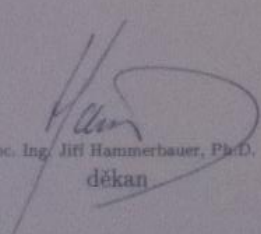
1. Kopylov, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů. SNTL, Praha, 1988.
2. Vidlička, M.: Permanentní magnety.
3. Hanselman, D. C.: Brushless Permanent Magnet Motor Design. McGraw-Hill, USA, 1994. ISBN 978-0070260252.
4. Salminen, P.: Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motor for Low Speed Applications. LUT, Lappeenranta, Finsko, 2004. ISBN 951-764-983-5.
5. Reece, A. B. J., Preston, T. W.: Finite Element Method in Electrical Power Engineering. Oxford University Press, Velká Británie, 2000. ISBN 978-0-19-856504-8.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá základními principy funkce synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM), popisuje jednotlivé druhy konstrukce PMSM, dále se zaměřuje na jednotlivé typy hybridních pohonů a okrajově se věnuje popisu hybridních automobilů a elektromobilů.

Hlavním bodem projektu je elektromagnetický návrh synchronního motoru s permanentními magnety v náboji kola. Pro návrh byly použity neodymové magnety (NdFeB). Ověření vypočítaných hodnot bylo provedeno metodou konečných prvků v programu FEMM.

KLÍČOVÁ SLOVA

Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM), povrchově uložené permanentní magnety, NdFeB, vnější rotor, elektromobil, hybridní automobil, Toyota Prius, FEMM, AutoCAD

ABSTRACT

The masters' thesis deals with basic principles of synchronous permanent magnet motor (PMSM), describes the different types of PMSM construction, it focuses on the different types of hybrid drives and marginally deals with the description of hybrid cars and electric vehicles.

The main point of the project is the electromagnetic design of a synchronous motor with permanent magnets in the wheel hub. For the design were used Neodymium magnets (NdFeB). Verification of the calculated values was carried out by finite element method in FEMM.

KEY WORDS

Synchronous motor with permanent magnets (PMSM), surface mounted permanent magnets, NdFeB, outer rotor, electric car, hybrid car, Toyota Prius, FEMM, AutoCAD

SEZNAM ZKRATEK

A	Obvodová proudová hustota	[A/m]
A_{skut}	Skutečná obvodová proudová hustota	[A/m]
a	Počet paralelních větví	[-]
B	Magnetická indukce	[T]
B_{δ}	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
B_{j1}	Magnetická indukce ve jhu statoru	[T]
B_{j2}	Magnetická indukce ve jhu rotoru	[T]
B_{PM}	Magnetická indukce permanentního magnetu	[T]
B_z	Magnetická indukce v zubu statoru	[T]
b_c	Střední šířka cívký	[m]
b_M	Šířka permanentního magnetu	[m]
b_{PL}	Tloušťka plechového svazku	[m]
b_z	Šířka zubu statoru	[m]
C	Essonův činitel	[VA/m ³ ot]
C_{skut}	Skutečná hodnota Essonova činitele	[VA/m ³ ot]
cos φ	Účinitel	[-]
D_1	Vnitřní průměr statoru	[m]
D_2	Vnitřní průměr rotoru	[m]
D_e	Vnější průměr statoru	[m]
D_v	Průměr dílčího vodiče	[mm]
f	Frekvence	[Hz]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
H_c	Koercitivní intenzita magnetického pole	[A/m]
H_{j1}	Intenzita magnetického pole jha statoru	[A/m]
H_{j2}	Intenzita magnetického pole jha rotoru	[A/m]

H_{PM}	Intenzita magnetického pole magnetu	[A/m]
H_{δ}	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	[A/m]
h_d	Výška statorové drážky	[m]
h_{j1}	Výška jha statoru	[m]
h_{j2}	Výška jha rotoru	[m]
h_{m1}	Výška magnetu	[m]
h_z	Výška statorového zubu	[m]
I_a, I_b, I_c	Hodnota proudu v jednotlivých fázích	[A]
I_c	Proud procházející jednou cívkou	[A]
I_d	Proud procházející drážkou	[A]
I_f	Jmenovitá hodnota fázového proudu	[A]
J	Proudová hustota ve vodiči	[A/mm ²]
J_{skut}	Skutečná proudová hustota	[A/mm ²]
k_C	Carterův činitel	[-]
k_d	Činitel plnění drážky	[-]
k_E	Činitel udávající poměr indukovaného napětí ku jmenovitému	[-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[-]
k_m	Činitel mechanických ztrát	[-]
k_{r1}	Činitel rozlohy	[-]
k_{tz}	Činitel zvýšení ztrát vlivem technologie zpracování plechů	[-]
k_v	Činitel pro danou harmonickou	[-]
k_{y1}	Činitel kroku	[-]
$k_{\beta}, k_{\beta'}$	Činitel pro určení rozptylů	[-]
k_{σ}	Činitel rozptylu	[-]
$L_{a\sigma}$	Rozptylová indukčnost	[H]
L_{dif}	Diferenční indukčnost	[H]

L_{μ}	Magnetizační indukčnost	[H]
l	Délka stroje	[m]
l_c	Střední délka cívky	[m]
$l_{\check{c}}$	Délka čela vinutí	[m]
l_d	Délka drážky	[m]
l_e	Efektivní délka stroje	[m]
l_{e_skut}	Skutečná efektivní délka stroje	[m]
l_{j1}	Délka střední siločáry jha statoru	[m]
l_{j2}	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
l_M	Délka magnetu	[m]
l_v	Déla vyložení čel	[m]
M_n	Jmenovitý točivý moment	[Nm]
m	Počet fází	[-]
m'	Matematický počet fází	[-]
m_j	Hmotnost statorového jha	[kg]
m_z	Hmotnost statorových zubů	[kg]
N_s	Počet závitů v sérii	[-]
N_c	Počet závitů cívky	[-]
N_i	Počet cívkových stran se stejným úhlem odklonu	[-]
N_p	Počet dílčích vodičů	[-]
N_{p_skut}	Skutečný počet dílčích vodičů	[-]
n	Jmenovité otáčky stroje	[ot/min]
n_d	Počet vodičů v drážce	[-]
n_{pl}	Počet plechů statorového svazku	[-]
O_d	Obvod drážky	[m]
$O_{\check{c}}$	Obvod čel	[m]

P_n	Jmenovitý výkon stroje	[W]
p	Počet pólpárů	[-]
p_i	Izolace vodiče	[mm]
Q	Počet drážek statoru	[-]
Q_p	Počet drážek na pól	[-]
Q_f	Počet drážek na pól a fázi	[-]
R_{Cu_n}	Odpor vinutí při pracovní teplotě	[Ω]
r_a	Poměrná hodnota odporu vinutí	[p.u.]
S_c	Plocha cívký v drážce	[mm ²]
S_d	Plocha drážky	[mm ²]
S_i	Vnitřní elektromagnetický výkon	[VA]
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon	[VA]
S_v	Optimální plocha vodiče	[mm ²]
S_{v_skut}	Skutečná optimální plocha vodiče	[mm ²]
S_{1V}	Průřez jednoho vodiče	[mm ²]
t_d	Drážková rozteč	[m]
$t_{d(1/2)}$	Šířka cívký	[m]
t_p	Pólová rozteč statoru	[m]
U_{DC}	Jmenovité napětí baterií	[V]
U_f	Fázové napětí	[V]
U_i	Indukované napětí	[V]
U_m	Magnetické napětí	[V]
U_s	Sdružené napětí	[V]
v_2	Obvodová rychlost rotoru	[m/s]
$X_{a\sigma}$	Rozptylová reaktance	[Ω]
X_{ad}	Podélná reaktance	[Ω]

X_d	Synchronní reaktance	[Ω]
x_d	Poměrná hodnota synchronní reaktance	[p.u.]
y_{1d}	Krok vinutí v počtu drážek	[-]
y_1	Přední cívkový krok	[-]
y_2	Zadní cívkový krok	[-]
Z_n	Jmenovitá impedance	[Ω]
α_δ	Činitel pólového krytí	[-]
α_M	Činitel mechanického pólového krytí	[-]
β	Činitel zkrácení kroku	[-]
γ_{Cu}	Měrná elektrická vodivost mědi	[S/m]
ΔP	Celkové ztráty	[W]
ΔP_{Fe}	Celkové ztráty v železe	[W]
ΔP_j	Ztráty v železe ve jhu	[W]
ΔP_z	Ztráty v železe v zubech	[W]
$\Delta P_{j\check{c}}$	Jouleovy ztráty v čelech statoru	[W]
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_{PM}	Ztráty v permanentních magnetech	[W]
ΔP_{PWM}	Ztráty při uvažování napájení z PWM	[W]
ΔU_{j1}	Úbytek magnetického napětí statorového jha	[A]
ΔU_{j2}	Úbytek magnetického napětí rotorového jha	[A]
ΔU_m	Úbytek magnetického napětí	[A]
ΔU_z	Úbytek magnetického napětí statorového zubu	[A]
ΔU_δ	Úbytek magnetického napětí ve vzduchové mezeře	[A]
Δp_p	Ztrátové číslo plechů	[W/kg]
δ	Velikost vzduchové mezery	[m]
δ'	Vzduchová mezera zvětšená o Carterův činitel	[mm]

δ_{ef}	Efektivní velikost vzduchové mezery	[mm]
η	Účinnost	[-; %]
$\lambda_{\check{c}}$	Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel	[-]
λ_d	Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu	[-]
μ_r	Relativní permeabilita	[-]
μ_0	Permeabilita vakua	[H/m]
χ_{Cu}	Rezistivita mědi	[Ω/m]
ρ_{Fe}	Hustota železa	[kg/m ³]
τ_{dif}	Činitel diferenčního rozptylu	[-; %]
Φ_H	Hlavní magnetický tok	[Wb]
Φ_{j1}	Magnetický tok jhem statoru	[Wb]
Φ_{j2}	Magnetický tok jhem rotoru	[Wb]
Φ_S	Statorový magnetický tok	[Wb]
Φ_z	Magnetický tok zubem statoru	[Wb]
2p	Počet pólů	[-]
2u	Počet vrstev vinutí v drážce	[-]
$b_1, b_2, b_0,$ h_1, h_2, h_0	Rozměry drážky	[mm]

OBSAH

1. ÚVOD	3
2. SYNCHRONNÍ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY	4
2.1. Úvod	4
2.2. Konstrukce statoru	5
2.3. Konstrukce rotoru	6
2.4. Motor s vnějším rotorem	8
2.5. Výhody a nevýhody PMSM.....	9
3. AUTOMOBIL S ELEKTRICKÝM POHONEM	10
3.1. Vývoj elektromobilů	10
3.2. Vývoj hybridních automobilů	11
3.3. Dělení hybridních automobilů.....	13
3.4. Sériový hybridní pohon	14
3.5. Paralelní hybridní pohon	14
3.6. Kombinovaný hybridní pohon	15
3.7. Toyota Prius.....	17
3.7.1. Konstrukce hybridního pohonu	18
3.8. BMW i3.....	22
3.9. Tesla Model S	23
3.10. Lexus LC 500h	25
4. VOLBA KONCEPTU A NÁVRH PMSM.....	27
4.1. Volba konceptu.....	27
4.2. Návrh PMSM.....	29
4.2.1. Zadané parametry stroje	29
4.2.2. Výpočet základních parametrů.....	29
4.2.3. Návrh vinutí statoru.....	31
4.2.4. Výpočet magnetického obvodu stroje	36
4.2.5. Návrh statorové drážky	38
4.2.6. Dimenzování permanentních magnetů.....	41
4.2.7. Výpočet odporu vinutí.....	45
4.2.8. Výpočet parametrů náhradního schématu	46
4.2.9. Výpočet ztrát a účinnosti stroje.....	50
5. Ověření návrhu metodou konečných prvků.....	52

5.1. Simulace v programu FEMM	52
5.2. Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře	54
5.3. Moment stroje.....	55
6. Závěr	57
7. Použitá literatura.....	59
8. Seznam obrázků, tabulek a grafů	66
9. Přílohy.....	68

1. ÚVOD

Synchronní motory s permanentními magnety (též PMSM) jsou v oblasti trakčních pohonů novou hnací jednotkou. Expanze tohoto typu motoru pro účely trakce byla umožněna především zdokonalením technologie výroby permanentních magnetů (převážně NdFeB a SmCo) s magnetickou indukcí kolem 1T. Aplikace PMSM se začaly ve větší míře objevovat převážně v hybridních pohonech osobních vozidel. V současné době se oblast použití PMSM stále rozšiřuje a můžeme se s nimi setkat například v pohonech kolejových vozidel určených pro městskou dopravu nebo pro železniční provoz. Hlavními přednostmi PMSM jsou velký výkon v malém objemu, tichý provoz, vysoká účinnost a dobré dynamické parametry.

Diplomová práce se zabývá obecným popisem PMSM z pohledu konstrukce, vlastností a parametrů. Jedním z hlavních konstrukčních prvků určujících výkon a dynamické vlastnosti je provedení rotoru stroje. V současnosti probíhá vývoj nových magnetických materiálů, který výrazně posouvá hranice v oblasti konstrukce PMSM.

Druhá část diplomové práce je zaměřena na historii, popis a rozdělení hybridních pohonů. Alternativní pohony automobilů se v poslední době stále častěji dostávají do popředí zájmů, jedná se tak o jedno z nejrychleji se rozvíjejících odvětví automobilového průmyslu. V současnosti důležitost hybridních pohonů roste se zvyšujícím se objemem nebezpečných emisí v ovzduší a zároveň s ubývajícím zásobami ropy. V závěru druhé části diplomové práce jsou pospány hybridní automobily a elektromobily předních světových značek.

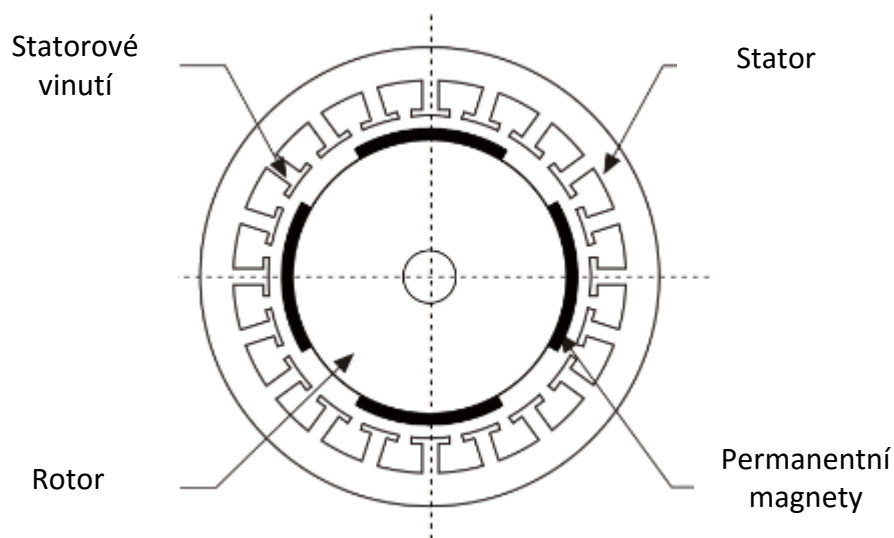
Třetí část diplomové práce je věnována elektromagnetickému návrhu synchronního stroje s permanentními magnety, pro který byl zvolen sériově vyráběný automobil se spalovacím motorem. Jeho pohonná jednotka byla "přepracována" na dva elektromotory v nábojích kol. Příčný řez stroje, pilové schéma i konstrukční provedení vinutí je navrženo v programu AutoCAD. Dále bylo provedeno ověření elektromagnetického návrhu metodou konečných prvků v programu FEMM. Ze simulace byly získány hodnoty a průběhy magnetické indukce ve vzduchové mezeře, momentu stroje a indukovaného napětí.

2. SYNCHRONNÍ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY

2.1. Úvod

V posledních letech se výrazně rozšiřuje oblast použití synchronních strojů, zvláště pak synchronních strojů s permanentními magnety. Pro magnetické pole rotoru je užito namísto budícího vinutí permanentních magnetů. Tento typ stroje se stává běžnou pohonnou jednotkou v mnoha aplikacích, např.: servopohony, dopravní technika, hodinové strojky, atd.

Stator synchronních motorů s permanentními magnety (dále jen PMSM) je konstrukčně velmi podobný statoru asynchronního stroje. Stator je tvořen vinutím a elektrotechnickými plechy staženými do svazku. Elektrotechnické plechy jsou od sebe navzájem izolovány lakem nebo chemickou vrstvou a jejich tloušťka bývá nejčastěji 0,35 mm, 0,5 mm nebo 0,65 mm. Pokud je vnější průměr větší než šířka plechu, musí se plechový svazek skládat z několika segmentů. Segmenty se v každé následující vrstvě překládají o polovinu nebo o třetinu. Statorové svazky se ukládají na žebra, která jsou součástí kostry. Kostra PMSM může být odlévaná nebo svařovaná. Vyobrazená konstrukce (Obr.3) zobrazuje hlavní části stroje. Vnější kruh představuje statorový elektrotechnický plech na jehož vnitřním obvodu jsou vytvořeny drážky, ve kterých je umístěno vinutí (na obrázku není znázorněno). Vnitřní kruh reprezentuje rotor, na jehož povrchu jsou umístěny permanentní magnety.



Obr. 1: Konstrukce PMSM

Při volbě plechů je nutné znát velikost magnetické indukce ve statoru a ztrátové číslo plechu Δp [W/kg], aby nedocházelo k velkým ztrátám v železe. Důležité je zvolit vhodně šířku zubu a drážky, aby nedošlo k přílišnému nárůstu ztrát v železe a zvýšení magnetického odporu obvodu.

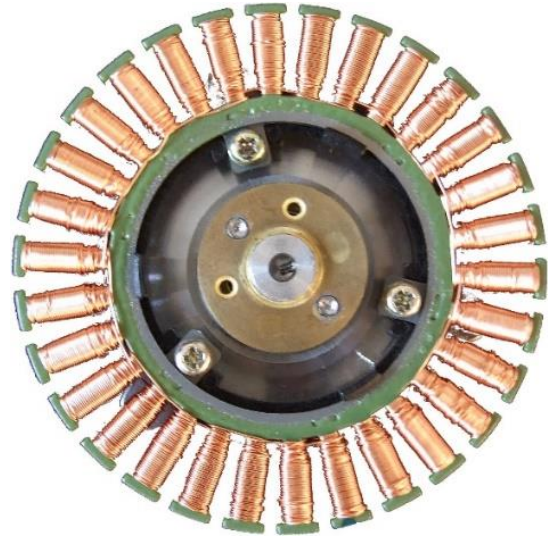
2.2. Konstrukce statoru

Statorové vinutí PMSM je tvořeno cívkami z měděných izolovaných vodičů, které se vkládají do drážek statoru. Vnitřní plocha drážky je vybavena tzv. vyložením – izolací, zvyšující dostatečnou elektrickou pevnost izolačního systému vůči kostře stroje a zároveň mechanicky chrání vodiče před poškozením. U otevřených a polouzavřených drážek je vinutí v drážce zajištěno proti vypadnutí drážkovým klínem. Po vložení cívek do statoru se vinutí zalévá epoxidem, který má lepší tepelnou vodivost než vzduch a umožňuje tak lepší chlazení a zároveň zlepšuje dielektrické vlastnosti izolace. Ve vinutí vznikají Jouleovy ztráty, které jsou úměrné odporu vodiče a kvadrátu protékajícího proudu. Nejčastěji se používá postupné a koncentrické vinutí.

Postupné vinutí je uloženo v drážkách v jedné nebo častěji ve dvou vrstvách. Jednotlivé závitů zabírají s různým magnetickým tokem, proto se v nich indukuje napětí fázově posunuté. Čela vinutí se vzájemně překrývají, takže je délka čel (neaktivní část) zpravidla delší než je délka vinutí v drážce (aktivní část). To značně navyšuje ztráty ve vinutí (oteplování stroje) a spotřebu materiálu. Cívky se do drážek vtahují pomocí protahovačky, čímž je navíjení poměrně jednoduché a levné. Z důvodu zlepšení účinnosti stroje a snížení jeho hluku potlačením parazitního reluktančního momentu je otevření drážky co nejmenší.

Koncentrické (též zubové) vinutí je navinuté v jedné nebo ve více polohách na železném nebo neželezném jádře. U tohoto typu vinutí zabírá každý závit se stejným magnetickým tokem, takže se v každém závitě indukuje stejné napětí. Cívky třífázového zubového vinutí se vždy navíjejí okolo jednoho zubu a v porovnání s jinými druhy vinutí lze získat těsně přiléhající čela vinutí s velmi dobrým odvodem tepla do statoru. Vlivem vysokého plnění měděným vodičem a malými čely vinutí se motory stávají kompaktnějšími. Tuto techniku lze lépe automatizovat než dosavadní techniku vtahování do drážek. U segmentových statorů se předem připravené cívky

mohou nasouvat přímo na jednotlivé zuby. V případě jednodílných svazků plechů se využívá technika jehlového navíjení vodičů. Výhodou je možnost vynechání mezifázové izolace u vyšších napětí, protože v čelech vinutí i uvnitř drážek spolu nemají cívky žádný kontakt. Stroje s tímto typem vinutí mají vyšší účinnost a menší rozměry pro stejný výkon než stroje s rozloženým vinutím.



Obr. 2: Postupné a koncentrické vinutí

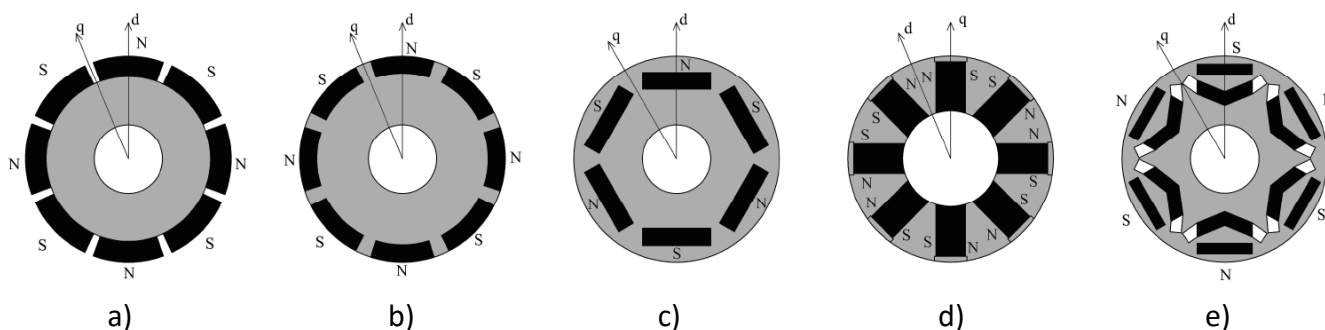
2.3. Konstrukce rotoru

Pro vytvoření statického magnetického pole se používají magnety, které nepotřebují budící stejnosměrný proud. Tyto magnety se dají připevnit na povrch rotoru nebo mohou být uloženy pod povrchem rotoru. Ve speciálních případech mohou být permanentní magnety různě prostorově natočeny (radiálně, axiálně, tangenciálně, atd.). Póly permanentních magnetů jsou tvořeny dílčími segmenty. Rozměry těchto segmentů jsou v rozmezí desetin, maximálně jednotek centimetrů. Permanentní magnety jsou vyráběny ze speciálních slitin, nejčastěji SmCo (samarium - kobalt), NdFeB (neodym – železo - bor) a AlNiCo (hliník – nikl - kobalt). Magnetická indukce těchto magnetů je v rozmezí od 0,8 T do 1,2 T. Existují dva hlavní technologické postupy při výrobě rotorů. Při malosériové výrobě se magnety magnetují před umístěním na rotor. To však komplikuje usazování magnetů na rotor vlivem působení magnetických sil. Druhou možností je umísťovat magnety v nezmagnetizovaném stavu a až poté je zmagnetizovat. Toto se

používá pouze v hromadné výrobě, jelikož je zapotřebí specializovaných technologií a prostředků. Zabudování permanentních magnetů do rotoru je možné několika způsoby.

Některé ze způsobu provedení:

- a) Magnety umístěné na povrchu rotoru
- b) Magnety zapuštěné v povrchu rotoru
- c) Magnety umístěné uvnitř rotoru
- d) Radiálně uložené magnety
- e) Dvojitá vrstva magnetů umístěných uvnitř rotoru



Obr. 3: Umístění permanentních magnetů

Konstrukční provedení rotoru PMSM lze rozdělit do dvou základních skupin a to na rotor s povrchovými magnety a rotor s vnitřními magnety. Konstrukčně nejjednoduššími a nejčastěji používanými jsou stroje s povrchově uloženými magnety. Toto řešení poskytuje velkou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře stroje, protože procházející magnetický tok není ovlivňován dalším materiálem mezi permanentním magnetem a vzduchovou mezerou. Nevýhodou tohoto konstrukčního řešení je malá mechanická pevnost, kterou lze dodatečně zvýšit omotáním rotoru s permanentními magnety skelnou bandáží a její impregnací, která chrání magnety proti mechanickým vlivům.

Rotor s vloženými magnety má permanentní magnety uloženy v mělkých drážkách na vnějším obvodu rotoru. Rotorový magnetický obvod může být vyroben ze skládaných ocelových plechů i z jednolitého materiálu. Tento způsob uspořádání je mechanicky pevnější v porovnání s rotorem s magnety na povrchu. Magnety uloženy v mělkých drážkách jsou velmi dobře chráněny proti odstředivým silám. Indukované napětí motoru je nižší z důvodu většího

rozptylového magnetického toku do železa rotoru než při použití permanentních magnetů na povrchu rotoru.

Konstrukce rotoru s vnořenými magnety je mechanicky velmi pevná a proto se využívá pro vysokootáčkové aplikace. Toto uspořádání je konstrukčně náročnější na výrobu v porovnání s ostatními rotory. U vnitřně uložených magnetů dochází k rozptylu magnetického toku, navíc jsou magnety uvnitř rotoru mechanicky i magneticky chráněny proti pulzacím pole ve vzduchové mezeře. V některých provedeních motorů se používá dvou nebo více vrstev umístění magnetů na pól, čímž dojde k zvýšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře a jsou vhodné pro stroje s předpokládanou potřebou odbuzování.

Konstrukční řešení PMSM pro trakci lze rozdělit do dvou základních skupin:

- motory s vnitřním rotorem (klasická koncepce), kde se rotor otáčí uvnitř statoru
- motory s vnějším rotorem, kde rotor s magnety obepíná stator

2.4. Motor s vnějším rotorem

Motory s vnějším rotorem se uplatňují v kolových pohonech, kde rotor s permanentními magnety obepíná třífázový stator. Tento typ konstrukce se využívá v aplikacích, ve kterých je motor integrován přímo do konstrukce kola. Stator je spojen s osou kola, rotor je součástí kola. Principy napájení a řízení motorů s vnějším rotorem jsou stejné jako u motorů s vnitřním rotorem. Výhodou motorů s vnějším rotorem oproti klasickému provedení je vyšší dosažitelný moment, který motor vytvoří při zachování stejného objemu. Nevýhodou je horší odvod tepelných ztrát z vnitřního prostoru stroje.



Obr. 4: PMSM s vnějším rotorem

2.5. Výhody a nevýhody PMSM

Specifická konstrukce PMSM má oproti asynchronním strojům a klasickým synchronním strojům s budícím vinutím celou řadu výhod, i nevýhod:

Výhody

- rotor neobsahuje vinutí
- není nutné rotor před rozběhem stroje nabudit
- není potřeba budícího zdroje a odpadá problém s přívodem budícího proudu
- vyšší účinnost stroje
- velký výkon v relativně malém objemu
- možnost konstrukce pomaluběžného stroje s dostatečným výkonem
- konstrukce motorů, které nepotřebují převodovku

Nevýhody

- technologicky složitější výroba
- složitější a dražší opravy
- menší robustnost
- vysoká cena stroje díky permanentním magnetům
- problematické odbuzování
- vysoká teplotní závislost magnetických vlastností permanentních magnetů
- stálá přítomnost budícího pole v motoru
- problematika zkratu, může dojít až k demagnetizaci magnetu
- nestálost permanentních magnetů (koroze)

3. AUTOMOBIL S ELEKTRICKÝM POHONEM

3.1. Vývoj elektromobilů

Elektromobil je automobil, který je poháněn elektrickým motorem a jako zdroj energie využívá akumulátory. První elektromobil byl sestaven v Nizozemí roku 1835, tedy přibližně 50 let před vznikem prvního automobilu se spalovacím motorem. Jako první na světě překonal rychlost 100 km/s Belgičan Camille Jenatzy, který s elektromobilem La Jamais Contente (česky Věčně spokojená) dosáhl rychlosti 105 km/h. Vozidlo vážilo 1450 kg a mělo tvar torpéda.



Obr. 5: Elektromobil La Jamais Contente

Na začátku 20. století jezdilo v USA více elektromobilů než automobilů se spalovacím motorem. Důvodem bylo, že elektromobily poskytovaly komfort a snadné ovládání na rozdíl od klasických automobilů, které se musely startovat klikou, byly velmi hlučné a poruchové. Zlom ve vývoji elektromobilů nastal po vynálezu startéru roku 1912 Charlesem Ketteringem a zahájením sériové výroby automobilu "T" firmou Ford v letech 1908 - 1927. Automobily se spalovacím motorem v té době vytlačily elektromobily především svou spolehlivostí, větším dojezdem a nízkou pořizovací cenou (pro porovnání: cena Fordu T byla 1000 USD, cena elektromobilu 1750 USD). K prvním elektromobilům vyrobeným v českých zemích patří elektromobil Františka Křížníka z roku 1895. Elektromobil byl poháněn stejnosměrným motorem o výkonu 3,5 kW, napájený olověnými akumulátory se 42 články.

Oživení přišlo v 90. letech 20. století, kdy se v Evropě začaly vyrábět elektromobily značek Citroën, Fiat, Peugeot, Renault a dalších. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně je provozovaly zejména velké podniky a instituce. V roce 1990 ustanovuje Kalifornie mandát zvýhodňující elektromobily s nulovými emisemi (ZEV) a ještě téhož roku představují světoví výrobci automobilů elektrizovanou řadu vozidel. Jedná se především o modely GM EV-1, Ford Ranger EV nebo Toyota RAV4 EV. Legislativa zvýhodňující elektromobily byla pod nátlakem automobilek v krátké době nakonec zrušena. Zájem o elektromobily opět opadl a to až do roku 2008, kdy se jejich počty začaly opět zvyšovat, zejména vlivem rostoucích cen ropy, znečištěním ovzduší a vlivem globálního oteplování.

3.2. Vývoj hybridních automobilů

První skutečný hybridní vůz, který kombinuje víc pohonů, tedy spalovací motor a elektromotor vynalezl Ferdinand Porsche v roce 1898. Porsche použil zážehový motor o výkonu 2,6 kW k pohonu dynama, které nabíjelo několik akumulátorů. Energie z akumulátorů byla přivedena do dvou elektromotorů, které byly umístěny v nábojích přední poháněné nápravy. Vozidlo nepotřebovalo žádnou převodovku nebo řetěz a mělo vysokou účinnost, vážilo 1700 kg a jeho maximální rychlost byla 35 km/h. Později se objevila i varianta 4x4 se čtyřmi elektromotory.



Obr. 6: Hybridní vůz Semper Vivus

Začátkem 20. století začaly společnosti General Electric v Americe a Siemens v Německu vyrábět a prodávat hybridní automobily. Hybridy se společně s elektromobily staly velmi

oblíbeným dopravním prostředkem. V roce 1915 společnost Woods Motor Vehicle vytvořila systém pohonu tzv. “ Dual Power“, jednalo se o hybridní pohon využívající při nízkých rychlostech elektromotor s připojením spalovacího motoru při vyšších rychlostech. Další vývoj hybridů zastavila nízká cena ropy, vylepšení a zvýšení účinnosti spalovacích motorů, vynález elektrického startéru, vznik a rozmach výrobních linek.

V druhé polovině 60. let se znečištění ovzduší ve Spojených státech dostalo na tak vysokou úroveň, že Americký kongres v roce 1966 přijal první zákon, který měl situaci zlepšit. Hlavní příčinou zhoršení smogové situace byl zejména rozmach osobní automobilové dopravy a proto firma General Motors začala v témže roce experimentovat s hybridní technologií pro osobní automobily. Jedním z prvních hybridů firmy General Motors byl model GM 512, který měl dvouválcový zážehový motor, elektromotor a akumulátory. Čistě na elektřinu mohl jet maximální rychlostí 20 km/h a v kombinaci se spalovacím motorem byla maximální rychlost 64 km/h.

Nejúspěšnějším hybridním automobilem současnosti je bezesporu Toyota se svým modelem Prius. Do roku 2010 se prodalo tohoto modelu ve všech verzích přes 2 miliony vozů a proto se řadí mezi nejprodávanější hybridní automobil v historii.



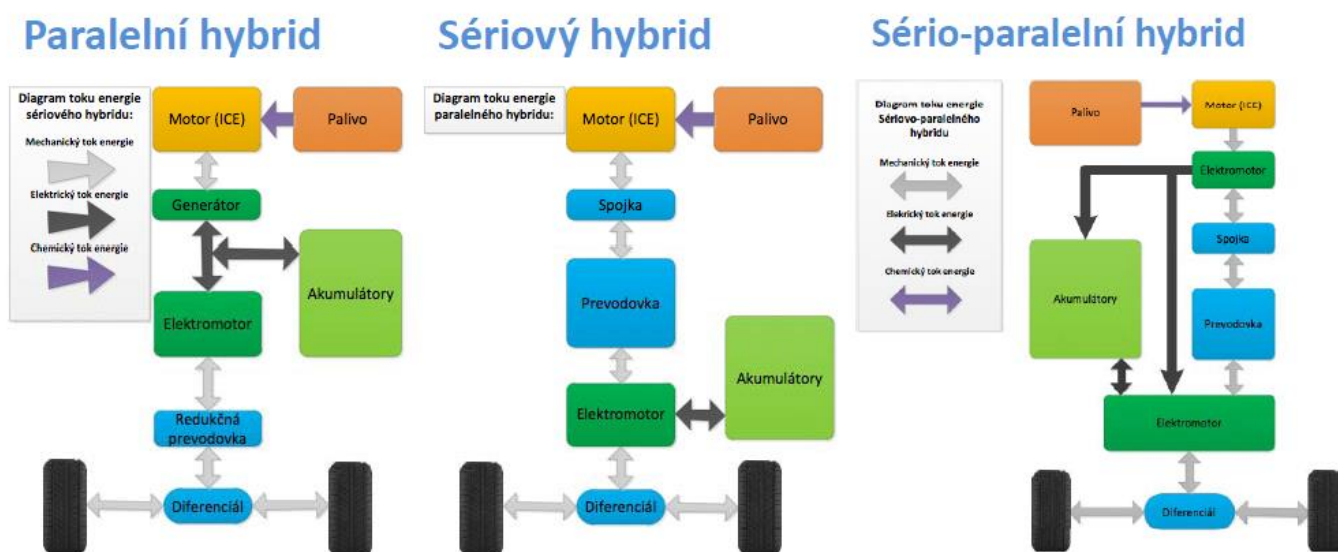
Obr. 7: Toyota Prius 4. generace

3.3. Dělení hybridních automobilů

Hybridní pohon je pohon, který má dva poháněcí zdroje. Jako nejvýhodnější se jeví kombinace spalovacího motoru s elektromotorem. V současné době se s výhodou využívá kombinace maloobjemového zážehového motoru s elektromotorem, který pracuje jako motor nebo jako generátor. Elektromotor se používá především při rozjezdech a nízkých rychlostech, kdy spalovací motor spotřebovává nejvíce paliva. Naopak při jízdě z kopce nebo při brzdění pracuje elektromotor jako generátor, tím brzdí vozidlo a současně vyrobenou energií dobíjí akumulátory. Každá automobilka preferuje svoji vlastní hybridní technologii s cílem o dosažení co nejvyššího prodeje.

Hybridní pohony můžeme rozdělit na tři základní skupiny:

- Sériový hybridní pohon
- Paralelní hybridní pohon
- Kombinovaný hybridní pohon



Obr. 8: Blokové schéma hybridních pohonů

3.4. Sériový hybridní pohon

Sériový hybrid má konstrukční uspořádání velmi podobné jako elektromobil. U této koncepce je spalovací motor a elektromotor spojen za sebou. Spalovací motor se zde používá pouze jako generátor energie, která se pak přivádí do elektromotoru, případně do akumulátorů. Sériový pohon se používá všude tam, kde není cílem vysoký jízdní výkon. Proto je určen k jízdě na menší vzdálenosti, například k jízdě po městě. Pokud je nutné zvýšit výkon automobilu kvůli rychlé akceleraci, odebírá pohonný systém energii jak z generátoru, tak z baterií. Zvýšení efektivity a výkonu vozidla můžeme dosáhnout použitím více elektromotorů, například v nábojích kol vozu. Umístění elektromotoru do náboje kola má řadu výhod. Odpadá nutnost použití převodovky, řetězů, rozvodovky a dalších mechanických částí pohonu. Tím dojde ke snížení mechanických ztrát a zvětšení prostoru pro posádku nebo baterie. Sériový hybrid dosahuje nejvyšší účinnosti při provozu ve městě a při nízkých rychlostech. Jedním z představitelů sériových hybridních pohonů je například Chevrolet Volt.

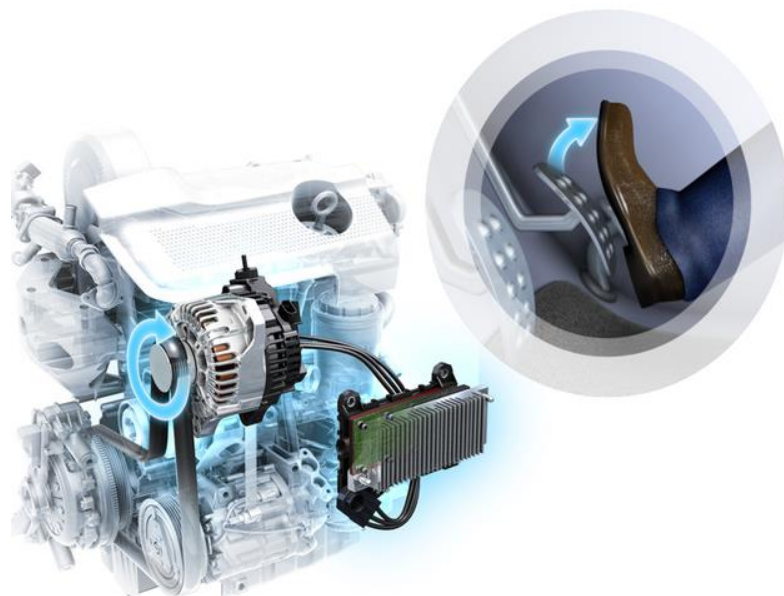
3.5. Paralelní hybridní pohon

Paralelní hybrid je tvořen klasickým spalovacím motorem, převodovkou a elektromotorem. Může pracovat ve dvou režimech - v režimu motor a v režimu generátor. Hlavní rozdíl od sériového hybridu je ve spojení spalovacího motoru a elektromotoru pomocí převodovky. Většina paralelních hybridů je vybavena mechanickou spojkou na hřídeli, mohou tak pracovat buď v čistě elektrickém režimu nebo je může pohánět pouze zážehový motor. Oba motory mohou pracovat paralelně a k pohonu lze využít oba najednou pro zvýšení celkového výkonu automobilu, například k rychlému zvýšení rychlosti při předjíždění. U paralelního hybridního pohonu byl startér a alternátor nahrazen elektromotorem. Automobily využívající tento typ pohonu obvykle při zastavení vypínají spalovací motor a při rozjezdu ho opět nastartují. V případě, kdy se jedná o pomalý rozjezd nebo o popojíždění v koloně, pohon zůstane v elektrickém režimu a spalovací motor se nenastartuje. Výhodou paralelních hybridů je vyšší účinnost než u sériových hybridních pohonů. Mezi zástupce paralelních pohonů patří Honda Insight nebo Toyota Prius.

3.6. Kombinovaný hybridní pohon

Kombinovaný hybridní pohon lze rozdělit na dvě skupiny a to na přepínatelné pohony a pohony s dělením výkonu. Automobil s tímto typem pohonu může pracovat jako paralelní nebo sériový hybridní pohon v závislosti na tom, pro jakou dopravní situaci je daný typ pohonu vhodnější. Jednotlivé komponenty jsou propojeny pomocí spojek. Vhodným režimem přepínání se volí jednotlivé typy hybridního pohonu. Obecně se dá říci, že na krátké vzdálenosti a pomalou rovnoměrnou jízdu (do cca 50 km/h) je automobil poháněn pouze elektromotorem. V případě, že dojde k vybití baterií nebo je potřeba zvýšit rychlost, dojde k nastartování spalovacího motoru, který se tak stane primárním pohonem automobilu. Elektromotor se následně využívá k zvýšení celkového výkonu automobilu nebo při přebytku kinetické energie při brzdění jako generátor k nabíjení akumulátorů.

Do skupiny automobilů s hybridním pohonem se také dají zařadit automobily s funkcí Stop&Start. Princip této funkce spočívá v tom, že jakmile dojde k poklesu rychlosti vozidla pod určitou hodnotu, řidič zařadí neutrální, spalovací motor se vypne a vozidlo se zastaví. Jakmile dojde k uvolnění brzdového pedálu a sešlápnutí spojky, motor se automaticky nastartuje. Úspora paliva při použití tohoto systému se pohybuje v rozmezí od 5 % do 9 %.



Obr. 9: Systém Stop&Start

- **Micro hybrid** - Tento pojem začala mezi prvními používat automobilka PSA Peugeot Citroën. Jedná se o pokročilý Stop&Start systém. Po prvním manuálním nastartování řidičem, počítač neustále vyhodnocuje podmínky, které rozhodují o aktivaci Stop&Start systému. Mezi podmínky pro aktivaci systému patří například teplota motoru, míra nabití baterií nebo třeba tlak v brzděném okruhu. Zajímavostí je, že pokud lze bezpečně vypnout motor, stane se tak již při rychlosti 20 km/h.
- **Mild hybrid** - Mezi zástupce této skupiny patří Honda Jazz Hybrid, Honda Civic Hybrid. Hlavní rozdíl od plného hybridu spočívá v tom, že je využit menší spalovací motor (3-válcový), kterému asistuje elektromotor. Ten se plně roztočí pouze tehdy, když řidič vyžaduje silné zrychlení nebo naopak brzdí. Pak elektromotor pracuje jako generátor a dobíjí akumulátory. Elektromotor je přímo spojen se spalovacím motorem, bez kterého nedokáže fungovat.
- **Plný hybrid** - Toyota Prius je dokonalým příkladem pojmu “plný hybrid”. Jedná se o paralelní hybridní automobil, který má velký spalovací motor doplněný o menší elektromotor napájený z akumulátorů. Samotný elektromotor může pohánět samostatně jednu nápravu (čistě elektrický pohon do rychlosti 50 km/h až 60 km/h) nebo ve spolupráci se spalovacím motorem (hybridní pohon).
- **Plug-in hybrid** - Jedná se o typ “plného hybridu”, který lze připojit do zásuvky nebo dobíjecí stanice a přímo dobíjet jeho baterie. Hlavní výhodou tohoto typu hybridu jsou větší baterie, díky kterým dokáže automobil jet déle pouze na elektřinu.

3.7. Toyota Prius

První model Toyoty Prius se na trhu objevil již v roce 1997 jako celosvětově první sériově vyráběný hybridní automobil. Prius je “plný” hybrid což znamená, že může jet určitou vzdálenost pouze na baterie. Je jedním z nejznámějších a nejrozšířenějších hybridních vozidel na světě.

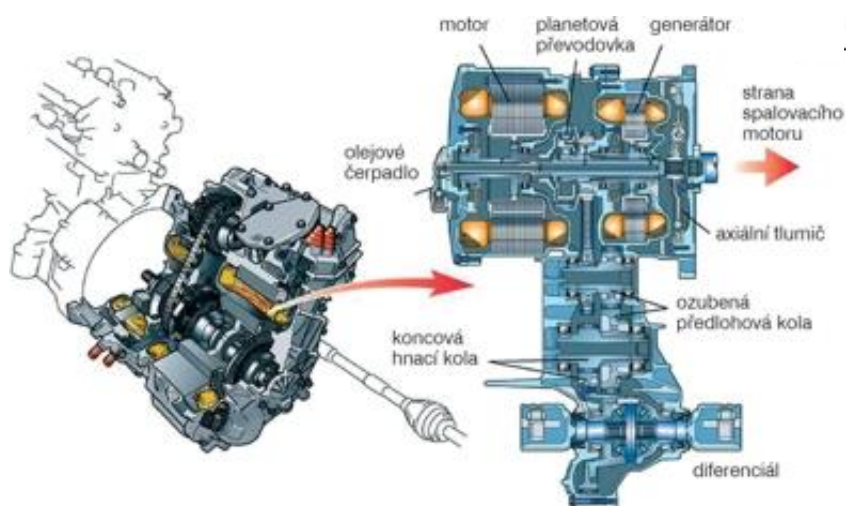
V roce 2015 automobilka Toyota představila již 4. generaci tohoto modelu.

Typ motoru	Řadový zážehový čtyřválec
Rozvodový mechanismus	16 ventilů DOHC, VVT-i
Zdvihový objem	1798 cc
Maximální výkon motoru	73/5200 kW/min ⁻¹
Typ elektromotoru	PMSM
Maximální výkon elektromotoru	60 kW
Maximální točivý moment elektromotoru	207 Nm
Jmenovité napětí elektromotoru	650 V
Typ akumulátorů	Lithium-iont baterie
Jmenovité napětí akumulátorů	207 V
Kapacita akumulátorů	21,5 Ah
Celkový výkon hybridního pohonu	100 kW
Kombinovaná spotřeba paliva	2,1 l/100 km
Součinitel aerodynamického odporu Cd	0,24
Typ převodovky	Planetová převodovka e-CVT
Zrychlení z 0 km/h na 100 km/h	11,4 s
Maximální rychlost	180 km/h
Emise CO ₂ kombinované	49 g/km
Celková hmotnost vozidla	1840 kg
Objem palivové nádrže	45 l

Tab. 1: Základní parametry Toyoty Prius 4. generace

3.7.1. Konstrukce hybridního pohonu

Hybridní pohon Toyoty Prius se skládá z elektromotoru (PMSM), generátoru (alternátor), spalovacího motoru a převodového ústrojí. Elektromotor pohání kola vozidla a rekuperuje kinetickou energii při brzdění. Generátor vyrábí elektrickou energii z energie spalovacího motoru a pracuje současně jako startér. Převodové ústrojí je vlastně planetové soukolí s dalšími převody, čelními ozubenými koly, které spojují všechny části bez potřeby spojky.



Obr. 10: Elektromotor, generátor a převodové ústrojí Toyoty Prius

Elektromotor i generátor je synchronní motor s permanentními magnety, který je chlazen vodou. Konstrukce obou strojů je velmi podobná a oba stroje potřebují pro správnou funkci složitou řídicí elektroniku. Při návrhu PMSM se konstruktéři zaměřili na tři hlavní body: zpevnění mechanické pevnosti rotoru, snížení ztrát v železe a efektivní využití reluktančního točivého momentu. Obecně lze říci, že je preferován velký počet pólů, vysoká mechanická pevnost rotoru a menší objem magnetů. Z hlediska nízkých ztrát v železe a kompatibilitě s předchozími systémy byl zvolen osmipólový rotor.

Podle rovnice (2) lze navrhnout PMSM, který vytváří převážně reluktanční moment tak, že rozdíl příčné (L_q) a podélné (L_d) indukčnosti bude co možná největší. Zvýšení indukčnosti v příčném směru slouží také k zvýšení celkového výkonu stroje. Z hlediska magnetického návrhu motoru toho lze dosáhnout maximalizováním indukčnosti (permeanci) v příčném směru a co

možná nejmenší indukčnosti (permeanci) v podélném směru. Minimální indukčnost v podélném směru je v souladu s požadovanou schopností odbuzování.

$$M = 2p * \varphi_m * i_q + 2p * (L_d - L_q) * i_d * i_q \quad (1)$$

kde:

$2p$ = počet pólů

φ_m = spřažený magnetický tok od permanentních magnetů

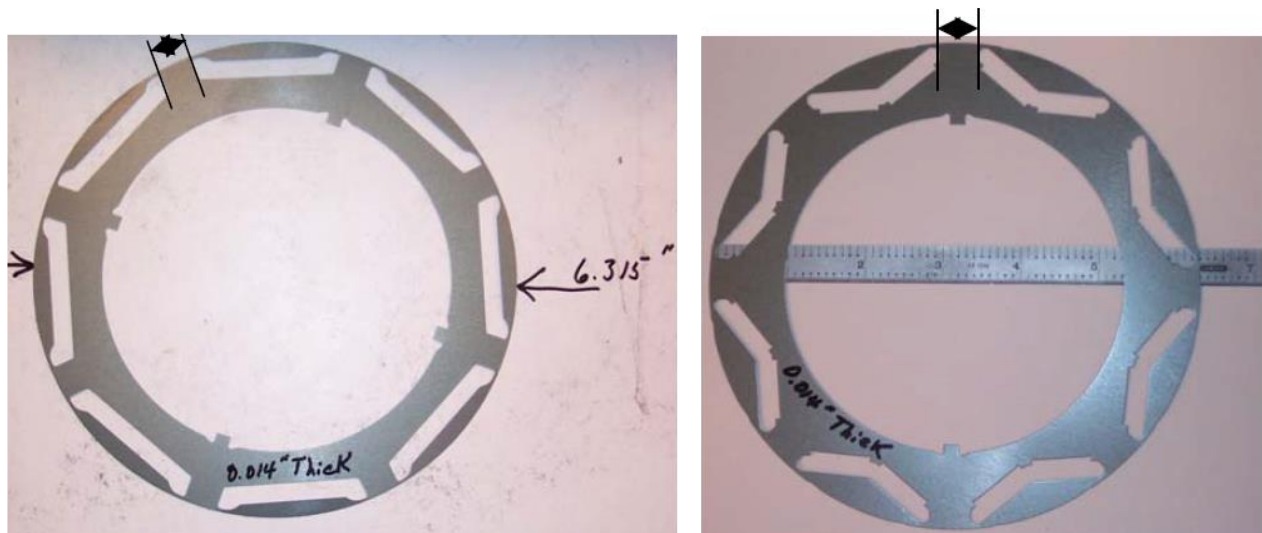
L_d = podélná indukčnost

L_q = příčná indukčnost

i_d = proud v podélném směru

i_q = proud v příčném směru

Jako jeden ze způsobů návrhů s cílem maximalizovat indukčnost v příčném směru je umístit bariéry magnetického toku podél vektoru potenciálové vrstevnice, kterou lze získat z FE analýzy. U železných rotorů to je ve směru excitace proudu v příčném směru.



Obr. 11: Děrování statorového plechu model 2003 a 2004

Dalším důležitým parametrem při návrhu rotoru je šířka můstku mezi drážkami pro uložení permanentních magnetů. Můstek mezi dvěma po sobě následujícími drážkami musí být navržen tak, aby byla zajištěna mechanická pevnost rotoru. Nicméně můstek představuje bariéru pro magnetický tok tvořený permanentními magnety, proto je nutné navrhnout šířku můstku, tak aby byla zachována mechanická pevnost a aby nedocházelo k omezení průchodu magnetického toku. Na Obr. 15 je znázorněno děrování rotorového plechu pro modely z roku 2003 a 2004. Novější model děrování má větší šířku plechu v příčném směru oproti modelu z roku 2003. Nový způsob děrování rotorového plechu společně s vnitřně uloženými permanentní magnety v tzv. "V" umístění napomáhá k zvýšení indukčnosti v příčném směru.

Snaha Toyoty o zvýšení výkonu elektromotoru, ale také o zmenšení rozměrů vedla k tomu, že elektromotor má v porovnání s předchozím modelem (Toyota Prius 2003 a 2004) stejný průřez vodičů a počet drážek statoru, ale odlišné zapojení vodičů vinutí. Verze z roku 2003 měla paralelní vinutí, verze z roku 2004 sériové vinutí. Při použití sériového vinutí došlo ke zvýšení momentu motoru, protože pro daný proud a dvojnásobný počet závitů cívky v interakci s konstantním magnetickým tokem permanentních magnetů se zvýšil moment motoru z 305 Nm na 400 Nm [39]. Díky sériovému vinutí se délka statorového jádra zmenšila o 5 mm. Na druhou stranu, sériové vinutí vyžaduje dvojnásobnou velikost napájecího napětí v porovnání s paralelním vinutím. V oblasti nízkých otáček je hodnota zpětného indukovaného napětí nízká a proto je napájecí napětí 200 V pro pohon plně dostačující. Pro provoz PMSM ve vysokých otáčkách je nutné, aby měnič zvýšil napětí z 200 V na 500 V.

Stator	
Počet drážek	48
Vnější poloměr jha	134,6 mm
Vnitřní poloměr jha	116,5 mm
Vnitřní vrtání statoru	81 mm
Délka plechového svazku	83,6 mm
Výška můstku	1 mm
Šířka můstku	2 mm
Hloubka drážky	32,5 mm
Zkosení drážky	0,001 mm
Střední šířka drážky	3,1 mm
Šířka konce drážky	6,1 mm
Rotor	
Velikost vzduchové mezery	0,75 mm
Šířka rotorového plechu	0,35 mm
Počet pólů	8
Průměr hřídele	55,3 mm
Délka hřídele	101,6 mm
Vnější poloměr rotoru	80,2 mm
Vzdálenost magnetů od středu	70,3 mm
Délka magnetu	18 mm
Tloušťka magnetu	6,5 mm
Úhel mezi magnety	145 °

Tab. 2: Rozměry PMSM Toyota Prius

3.8. BMW i3

BMW i3 je první sériově vyráběný elektromobil tohoto druhu, pro mnichovskou automobilku znamená úspěšné dovršení dlouholetého vývoje nejrůznějších prototypů.

Už zvenčí zaujme automobil kromě vajíčkovitého tvaru karoserie, výjimečně úzkými pneumatikami na vysokých kolech. Za účelem snížení celkové hmotnosti vozu je jeho spodní část vyrobena z hliníku a kabinu tvoří kompozitní materiál na bázi karbonu. Díky této inovaci je hmotnost vozidla i s bateriemi 1195 kg. Jiné jsou i proporce karoserie, všechny agregáty jsou soustředěny vzadu a baterie jsou umístěny v podlaze vozidla. Trakční elektromotor (PMSM) o výkonu 125 kW a točivém momentu 250 Nm se nachází v zadní části pod kufrem vozidla. Pomocí jednostupňové převodovky a diferenciálu jsou poháněna kola zadní nápravy. Elektromotor je vybaven cizím chlazením, a proto je v předním nárazníku vozidla umístěn kapalinový chladič zajišťující optimální teplotu elektromotoru. Baterie (lithium - iontové) se skládají z 96 článků v celkem 8 modulech o napětí 360 V. Výrobcem baterií je Samsung SDI a celková kapacita je 21,6 kWh, i když elektromobil využije maximálně 18,8 kWh. Dobíjení může probíhat z klasické jednofázové zásuvky, přičemž 80 % kapacity baterie dosáhne přibližně za 8 hodin a ze zásuvky odebere 22,3 kWh. Průměrná spotřeba vozidla se pohybuje kolem 12 – 13 kWh/100 km. Dojezdová vzdálenost se značně liší podle místa provozu. Při provozu na dálnici a maximální rychlosti do 130 km/h zvládne elektromobil ujet pouze 80 km až 90 km. Dojezd ve městě činí až 140 km. Další předností BMW i3 ve srovnání s konkurencí je jeho akcelerace. Zrychlit z 0 na 100 km/h zvládne během 7,2 sekund a jeho maximální rychlost je 150 km/h.



Obr. 12: BMW i3

3.9. Tesla Model S

Tesla Model S je čtyřdvéřový plně elektrický liftback sedan od firmy Tesla Motors. Poprvé byl představen v roce 2009 na Motor Show ve Frankfurtu jako prototyp. Prodávat se začal v červnu roku 2012 ve Spojených Státech. Za rok 2013 prodala společnost Tesla Motors přes 22 tisíc kusů Modelu S. V červnu 2015 překročil globální kumulativní prodej 75 tisíc kusů.



Obr. 13: Tesla Model S

Velmi zajímavá je konstrukce baterií sloužících k pohonu a napájení tohoto elektromobilu. Pohonné baterie jsou skládány podobně jako například baterie do notebooků a základní stavební jednotkou jsou Li-Ion články typu 18650 (tzn. článek válcového tvaru s průměrem 18 mm a délkou 65 mm). V aktuálních modelech Tesly Model S jsou používány baterie o kapacitě 70 kWh nebo 85 kWh. Hmotnost baterie je 540 kg a jejich celkové napětí je 400 V. Baterie obsahuje celkem 7104 kusů Li-Ion článků typu 18650 v 16 modulech zapojených v sérii. Každý modul obsahuje 6 skupin zapojených do série, přičemž každá skupina je složená ze 74 článků zapojených paralelně. Výrobce článků je Panasonic a jedná se o modifikované Li-Ion články s nikl-kobalt-hliníkovou katodou, které jsou levnější na výrobu a váhově lehčí než běžné články stejné velikosti. Výdrž baterie je garantována na 8 let a nelimitovaný nájezd kilometrů, mimo přirozený úbytek kapacity baterie.

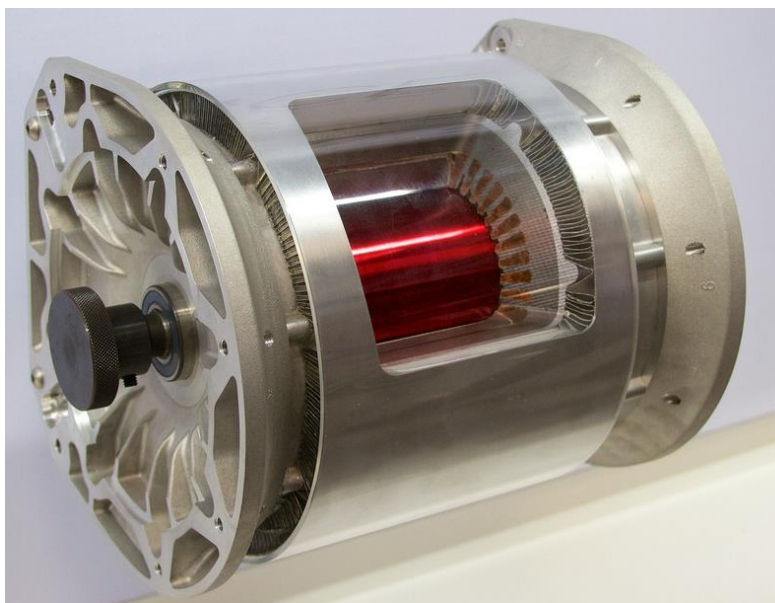
Standardní nabíječ vyžaduje zdroj 120 VAC nebo 240 VAC maximálně 10 kW. Speciální 120 kW rychlonabíjecí stanice během 30 minut "natankují" 320 km dojezdu, přičemž 85 kWh baterii plně nabijí během hodiny. Dojezd modelu Tesla Model S dle metodiky EPA je s touto

baterií cca 426 km. Baterie je u Tesly Modelu S umístěna v podlaze pod kabinou a chrání ji 6mm štít z titanu a hliníkové slitiny.



Obr. 14: Uložení bateriových modulů Tesly Model S

Tesla jako jedna z mála automobilek montuje do svých elektromobilů asynchronní motor. Varianta Tesly Model S P85 má vodou chlazený třífázový asynchronní elektromotor o výkonu 310 kW. S takovým výkonem dokáže Model S P85 zrychlit z 0 na 100 km/h během 4,3 sekund a dosahuje maximální rychlosti 210 km/h. Tyto parametry jsou v poměru k jeho hmotnosti 2100 kg velmi dobré. Motor včetně veškeré řídicí elektroniky je uložen v zadní nápravě, kterou pohání.



Obr. 15: Asynchronní motor Tesly Model S

3.10. Lexus LC 500h

Automobilka Lexus v návaznosti na světovou premiéru kupé LC 500 V8 představila svůj zbrusu nový model LC 500h na mezinárodním autosalonu 2016 v Detroitu. Nové kupé je světovou novinkou v podobě vícestupňového hybridního pohonu, který je příští generací hybridních ústrojí navržených speciálně pro výkonné sportovní modely.

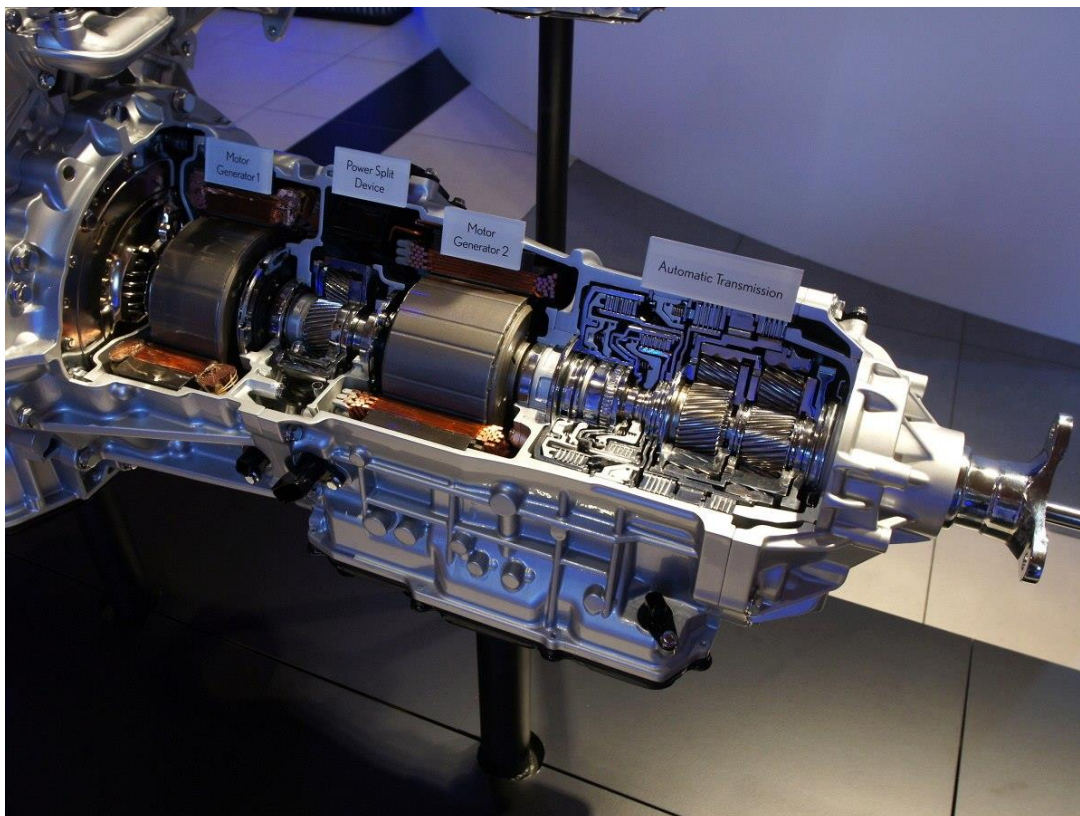


Obr. 16: Lexus LC 500h

Základem pohonného ústrojí je 3,5 litrový vidlicový šestiválec s proměnným časováním VVT-i. Motor je podčtvercové konstrukce (94 x 83 mm) o výkonu 220 kW při 6600 otáčkách a hnacím momentu 348 Nm. Hybridní systém “Multistage Hybrid“ tedy vícestupňový hybrid je navržen pro sportovní automobily a výkonná auta značky Lexus. K zážehovému motoru přidává elektromotor o výkonu necelých 45 kW a lithium-iontové články s napětím 310 V, které váží 50 kg. Celkový výkon hybridního pohonu je tak 264 kW.

Na výstupu z klikové hřídele nalezneme motorgenerátor číslo 1. Za ním se nachází planetová převodovka, která slouží jako dělič výkonu. Dále se v soustrojí nachází motorgenerátor číslo 2, který je schopen přenášet mechanickou energii přímo na kola. Tato sestava je stejná u všech hybridů koncernu Toyota. Lexus LC 500h se od ostatních hybridů firmy liší u motorgenerátoru číslo 2 tím, že je napojen na čtyřstupňovou automatickou převodovku firmy Aisin. Doposud si celé ústrojí muselo vystačit s jedním převodem pro celý rozsah rychlostí, výstup určovala jen práce celého systému sdruženého okolo planetové převodovky. Proto mají

hybridy Toyota a Lexusu na svůj výkon relativně nižší maximální rychlost v porovnání s konkurencí. To se teď však změní.



Obr. 17: Hybridní systém "Multistage Hybrid"

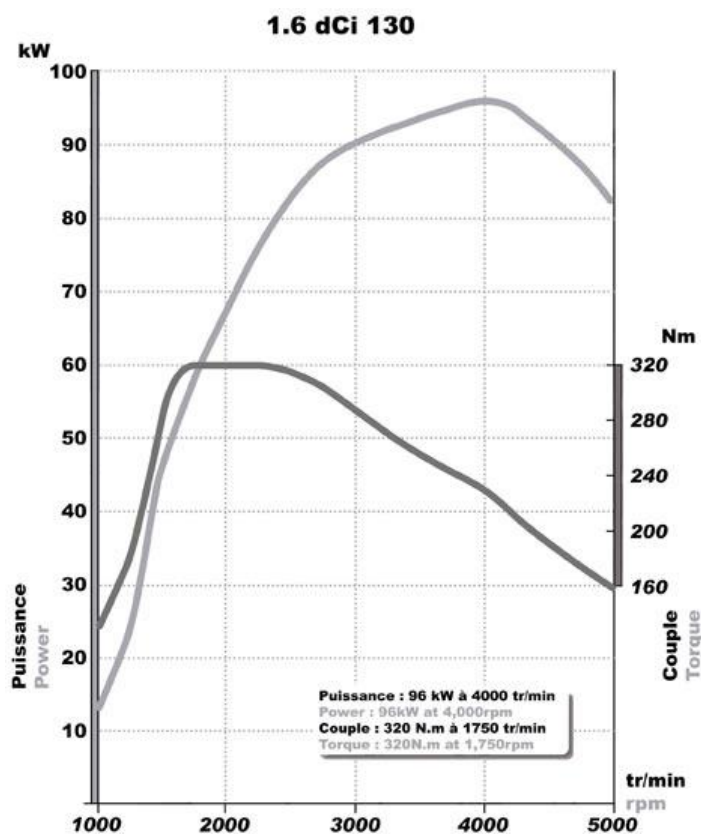
Nové řešení umožní jízdu v čistě elektrickém režimu rychlostí až 140 km/h namísto dosavadních 100 km/h. Při v rychlosti 230 km/h může spalovací motor díky nové převodovce točit jen nízké otáčky. Systém bude také nucen při požadavku na náhlé zrychlení vytočit spalovací motor do maximálních otáček jako doposud a zároveň přitom bude sestava umět přenášet vyšší maximální výkony. Vůbec poprvé v historii hybridů Toyota a Lexusu bude nové soustrojí umět na zadní kola přenést takovou sílu, že je doslova "utrhne" od asfaltu. Lexus LC 500h by měl při prudkém rozjezdu být schopen "pálit" pneumatiky a dokonce i driftovat. To doposud nebylo možné, protože přenášený točivý moment a zvolený konečný převod, toto neumožňoval.

4. VOLBA KONCEPTU A NÁVRH PMSM

4.1. Volba konceptu

Ve své diplomové práci jsem se rozhodl pro návrh PMSM v náboji kola. Jde o motor pro individuální pohony kol, kdy PMSM je nedílnou konstrukční součástí kola. Proto je rotor s permanentními magnety pevně spojen s kolem a obepíná stator s třífázovým vinutím, který prochází osou kola a je s ní pevně spojen. Tyto motory se používají pro výkony od stovek wattů pro pohon lehkých jednostopých vozidel až po desítky kilowattů pro individuální pohon kol nízkopodlažních tramvají a elektromobilů.

V rámci návrhu přepracovávám pohonný systém Renaultu Kadjar 1,6 dCi / R9M ze spalovacího motoru na elektromotor. Napájení bude z baterií se jmenovitým napětím 360 V DC, které cca odpovídá 3 x 270 V AC. Vybral jsem si naftovou motorizaci s maximálním výkonem 96 kW s 17“ ráfky.



Obr. 18: Charakteristika spalovacího motoru Renault Kadjar

Návrh PMSM na stejný maximální výkon jako má spalovací motor je technicky neproveditelné z důvodu vysokého mechanického namáhání os a ložisek elektromotoru. Protože je spalovací motor provozován převážně v oblasti konstantního momentu (viz. Obr.:18), byl jmenovitý výkon elektromotoru určen jako průměr maximálního a minimálního výkonu při konstantním momentu tzn. cca 60 kW. Hnaná bude pouze zadní náprava, proto jmenovitý výkon jednoho elektromotoru bude 30 kW. Po konzultaci s vedoucím práce jsem zvolil provozní rychlost vozidla 100 km/h a velikost ráfku R17 215/60, kde R je typ konstrukce kostry - v našem případě radiální. Nominální průměr příslušného disku v palcích je 17, nominální šířka ráfku je 215 milimetrů a 60 je poměr nominální výšky pneumatiky k nominální šířce v procentech. Průměr ráfku je tedy 431,8 mm a výška pneumatiky doporučená výrobcem automobilu je 129 mm.

Výpočet otáček:

$$v = \frac{100 * 10^3}{3600} = 27,78 \text{ m/s} \quad (1)$$

$$n = \frac{v}{o} = \frac{27,78}{0,2167} = 12,819 \text{ ot/s} \Rightarrow 769,112 \text{ ot/min} \quad (2)$$

kde v je provozní rychlost vozidla (100 km/h) a o je obvod kola včetně pneumatiky ($o = 2167 \text{ mm}$)

Pro návrh PMSM jsem vycházel z jmenovité hodnoty otáček $n = 800 \text{ ot/min}$ a po konzultaci s vedoucí práce byla zvolena hodnota napájecí frekvence $f = 200 \text{ Hz}$.

4.2. Návrh PMSM

4.2.1. Zadané parametry stroje

Jmenovitý výkon	$P_n = 30$	<i>kW</i>
Jmenovité napětí baterií	$U_{DC} = 360$	<i>V DC</i>
Sdružené napětí	$U_s = 270$	<i>V</i>
Jmenovité otáčky	$n = 800$	<i>ot/min</i>
Počet fází	$m = 3$	
Frekvence	$f = 200$	<i>Hz</i>
Způsob provedení stroje	<i>IM 9019</i>	
Typ chlazení stroje	<i>IC 3A1W7</i>	
Stupeň krytí	<i>IP 54</i>	

Po konzultaci s vedoucím práce jsem předběžně zvolil hodnotu účinníku a účinnosti stroje.

Účinník	$\cos \varphi = 0,9$	
Účinnost	$\eta = 92$	<i>%</i>

4.2.2. Výpočet základních parametrů

Zdánlivý výkon:

$$S_n = \frac{P}{\cos \varphi * \eta} = \frac{30\,000}{0,9 * 0,92} = 36\,231,88 \text{ VA} \quad (3)$$

Počet pólpárů:

$$p = \frac{60 * f}{n} = \frac{60 * 200}{800} = 15 \quad (4)$$

Počet pólů:

$$2p = 30 \quad (5)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{270}{\sqrt{3}} = 155,88 \text{ V} \quad (6)$$

Velikost fázového proudu:

$$I_f = \frac{S}{U * \sqrt{3}} = \frac{36\,231,88}{270 * \sqrt{3}} = 77,48 \text{ A} \quad (7)$$

Jmenovitý točivý moment stroje:

$$M_n = \frac{P * 30}{\pi * n} = \frac{30\,000 * 30}{\pi * 800} = 358,1 \text{ Nm} \quad (8)$$

Velikost průměru induktu ve vzduchové mezeře (vrtání statoru) jsem po předchozí domluvě s vedoucím zvolil:

$$D_1 = 360 \text{ mm}$$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi * D_1}{2p} = \frac{\pi * 0,36}{30} = 0,0377 \text{ m} \quad (9)$$

Výpočet vnitřního elektromagnetického výkonu:

$$S_i = S_n * k_E = 36\,231,88 * 0,86 = 31\,159,42 \text{ VA} \quad (10)$$

kde koeficient k_E udává poměr indukovaného napětí ku fázovému napětí stroje. Po konzultaci s vedoucím práce jsem jeho hodnotu zvolil $k_E = 0,86$.

Pro další výpočty je nutné předběžně zvolit velikost obvodové proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Tyto hodnoty jsem zvolil následovně:

$$B_\delta = 0,9 \text{ T}$$

$$A = 63\,000 \text{ A/m}$$

Dále je nutné pro určení délky stroje vypočítat hodnotu Essonova činitele:

$$C = \frac{\pi^2}{60 * \sqrt{2}} * A * B_{\delta} * k_v = \frac{\pi^2}{60 * \sqrt{2}} * 63\,000 * 0,9 * 0,866 = 5\,713,27 \text{ VA/m}^3 \text{ot} \quad (11)$$

velikost činitele vinutí k_v určuji v následující kapitole.

Předběžná délka stroje je vypočtena z výkonové rovnice:

$$l = \frac{S_i}{C * D_1^2 * n} = \frac{31\,159,42}{5\,713,27 * 0,36^2 * 800} = 0,0526 \text{ m} \quad (12)$$

4.2.3. Návrh vinutí statoru

Jelikož jsem se rozhodl pro návrh PMSM v náboji kola kde jsem limitován šířkou ráfku, zvolil jsem zubové vinutí, které má počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{1}{2} \quad (13)$$

Dále volím dvouvrstvé vinutí, tedy:

$$2u = 2 \quad (14)$$

Počet drážek:

$$Q = 2p * m * q = 30 * 3 * \frac{1}{2} = 45 \quad (15)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{45}{30} = 1,5 \quad (16)$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$Q_f = 2p * q = 30 * \frac{1}{2} = 15 \quad (17)$$

Cívkový krok y_{1d} volím dle celočíselné velikosti Q_p (1 nebo 2), tedy:

$$y_{1d} = 1$$

Činitel zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{1}{1,5} = 0,667 \quad (18)$$

Pro určení činitele vinutí je nutné určit velikost činitele kroku pro první harmonickou jako:

$$k_{y1} = \sin \beta * \frac{\pi}{2} = \sin 0,667 * \frac{\pi}{2} = 0,866 \quad (19)$$

Velikost činitele rozlohy:

$$k_{r1} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2 * m})}{n * \sin(\frac{\pi}{2 * m})} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2 * 3})}{1 * \sin(\frac{\pi}{2 * 3})} = 1 \quad (20)$$

Výsledná velikost činitele vinutí je:

$$k_{v1} = k_{y1} * k_{r1} = 0,866 * 1 = 0,866 \quad (21)$$

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2u * y_{1d} + 1 = 2 * 1 + 1 = 3 \quad (22)$$

Velikost proudu drážkou určím jako:

$$I_d = \frac{\pi * D_1 * A}{Q} = \frac{\pi * 0,36 * 63\,000}{45} = 1\,583,36 \text{ A} \quad (23)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{I_d}{a_{\approx} * I_f} = \frac{1\,583,36}{1 * 77,48} = 20,44 \quad (24)$$

Počet vodičů v drážce pro dvouvrstvé vinutí musí nabývat sudých hodnot, proto volím velikost:

$$n_d = 20.$$

Počet závitů cívky:

$$N_c = \frac{n_d}{2u} = \frac{20}{2} = 10 \quad (25)$$

Počet závitů v sérii:

$$N_s = \frac{Q}{m * 2 * a_{\approx} * 2u * N_c} = \frac{45}{3 * 2 * 1 * 2 * 10} = 150 \quad (26)$$

Pro zlomková vinutí lze činitel vinutí vypočítat z Tingleyho schématu, kde počet řádků schématu je dán počtem pólů stroje a počet sloupců schématu odpovídá součinu počtu fází s čitatelem počtu drážek na pól a fázi. Na Obr. 19 uvádím Tingleyho schéma pro první 4 póly. Celé Tingleyho schéma viz. Příloha 1.

	fáze	A	C'	B
pól		A'	C	B'
1	+	1		3
		2		4
2	-		5	
			6	
3	+	7		9
		8		10
4	-		11	
			12	

Obr. 19: Tingleyho schéma pro první 4 póly stroje

Výpočet činitele vinutí pro 1. až 11. harmonickou (pro úplnost zde znova uvádím výpočet pro 1. harmonickou):

$$k_{v1} = \frac{\sum n * N_i * \cos v\varphi_i}{n} = \frac{6 * \cos \frac{\pi}{6}}{6} = 0,866 \quad (27)$$

$$k_{v5} = \frac{\sum n * N_i * \cos v\varphi_i}{n} = \frac{6 * \cos 5 * \frac{\pi}{6}}{6} = -0,866 \quad (28)$$

$$k_{v7} = \frac{\sum n * N_i * \cos v\varphi_i}{n} = \frac{6 * \cos 7 * \frac{\pi}{6}}{6} = -0,866 \quad (29)$$

$$k_{v11} = \frac{\sum n * N_i * \cos v\varphi_i}{n} = \frac{6 * \cos 11 * \frac{\pi}{6}}{6} = 0,866 \quad (30)$$

kde N_i je počet cívkových stran se stejným úhlem odklonu od osy fáze φ_i .

Pro další výpočty je nutné znát velikost činitele diferenčního rozptylu. Činitel udává vliv vyšších harmonických v magnetickém poli vzduchové mezery. Činitel diferenčního rozptylu lze určit z Görgešova obrazce (Příloha 2). K určení hodnoty τ_{dif} jsem použil zdroj [44] a jeho velikost je:

$$\tau_{dif} = 0,462$$

Z důvodu zaokrouhlení hodnoty n_d na nejbližší sudé číslo, je nutno přepočítat obvodovou proudovou hustotu A , Essenův činitel C i efektivní délku stroje l .

Velikost skutečné hodnoty obvodové proudové hustoty A je:

$$A_{skut} = \frac{N_s * 2 * m * I_f}{\pi * D_1} = \frac{150 * 2 * 3 * 77,48}{\pi * 0,36} = 61\,653,3 \text{ A/m} \quad (31)$$

Skutečná hodnota Essonova činitele:

$$C_{skut} = \frac{\pi^2}{60 * \sqrt{2}} * A * B_{\delta} * k_v = \frac{\pi^2}{60 * \sqrt{2}} * 61\,653,3 * 0,9 * 0,866 \quad (32)$$
$$= 5\,591,1 \text{ VA/m}^3 \text{ot}$$

Skutečná efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S_i}{C * D_1^2 * n} = \frac{31\,159,42}{5\,591,1 * 0,36^2 * 800} = 0,04824 \text{ m} = 48,24 \text{ mm} \quad (33)$$

Z důvodu složení statorového svazku z plechů o tloušťce 0,5 mm, je nutno délku stroje přepočítat na počet plechů a pak na skutečnou délku stroje.

Počet plechů statorového svazku:

$$n_{pl} = \frac{l}{0,5} = \frac{48,24}{0,5} = 96,49 \quad (34)$$

Počet plechů musí být číslo celé, proto volím:

$$n_{pl} = 97$$

Skutečná délka stroje je tedy:

$$l_{skut} = n_{pl} * 0,5 = 48,5 \quad (35)$$

Skutečný proud procházející jednou cívkou:

$$I_c = \pi * D_1 * A_{skut} = \pi * 0,36 * 61\,653,3 = 69\,728,29 \text{ A} \quad (36)$$

Skutečný proud procházející drážkou:

$$I_d = \frac{I_c}{Q} = \frac{1\,583,36}{45} = 1\,549,52 \text{ A} \quad (37)$$

4.2.4. Výpočet magnetického obvodu stroje

Magnetický obvod statoru i rotoru bude složen z plechů m330-50a (viz. Příloha 5).

Ve statorových plechách budou vyraženy radiální chladicí kanály.

Hlavní magnetický tok:

$$\Phi_H = \alpha_\delta * B_\delta * t_p * l_{skut} = \frac{2}{\pi} * 0,9 * 0,0377 * 0,0485 = 0,00105 \text{ Wb} \quad (38)$$

Velikost indukovaného napětí:

$$U_i = 4,44 * \Phi_H * f * N_s * k_{v1} = 4,44 * 0,00105 * 200 * 150 * 0,866 = 120,88 \text{ V} \quad (39)$$

Magnetický obvod statoru

Hodnota statorového magnetického toku:

$$\Phi_S = (1 - k_\sigma) * \Phi_H = (1 - 0,154) * 0,00105 = 0,886 * 10^{-3} \text{ Wb} \quad (40)$$

kde k_σ je činitel rozptylu. Jeho hodnotu jsem volil stejnou pro stator i rotor.

$$k_\sigma = 0,154$$

Magnetický tok jhu statoru:

$$\Phi_{j1} = \frac{1}{2} * \Phi_S = \frac{1}{2} * 0,000886 = 0,443 * 10^{-3} \text{ Wb} \quad (41)$$

Velikosti magnetické indukce v zubu a ve jhu statoru jsem zvolil následovně:

$$B_z = 1,5 \text{ T}$$

$$B_{j1} = 1,1 \text{ T}$$

Šířka zubu statoru:

$$b_z = \frac{\Phi_s}{B_z * k_{Fe} * l_{skut}} = \frac{0,886 * 10^{-3}}{1,5 * 0,97 * 0,0485} = 0,01255 \text{ m} \quad (42)$$

kde k_{fe} je činitel plnění železa. Jeho velikost volím:

$$k_{fe} = 0,97$$

Šířku zubu b_z volím:

$$b_z = 0,0126 \text{ m} = 12,6 \text{ mm}$$

Hodnota magnetické indukce pro zvolenou šířku zubu je:

$$B_z = \frac{\Phi_s}{b_z * k_{Fe} * l_{skut}} = \frac{0,886 * 10^{-3}}{0,0126 * 0,97 * 0,0485} = 1,495 \text{ T} \quad (43)$$

Výška jha statoru:

$$h_{j1} = \frac{\Phi_{j1}}{B_{j1} * k_{Fe} * l_{skut}} = \frac{0,443 * 10^{-3}}{1,1 * 0,97 * 0,0485} = 0,00856 \text{ m} \quad (44)$$

Výšku jha statoru h_{j1} volím:

$$h_{j1} = 0,0086 \text{ m}$$

Hodnota magnetické indukce pro zvolenou výšku jha statoru:

$$B_{j1} = \frac{\Phi_{j1}}{h_{j1} * k_{Fe} * l_{skut}} = \frac{0,443 * 10^{-3}}{0,0086 * 0,97 * 0,0485} = 1,095 \text{ T} \quad (45)$$

Magnetický obvod rotoru

Magnetický tok jha rotoru:

$$\Phi_{j2} = \frac{1}{2} * \Phi_H = \frac{1}{2} * 0,00105 = 0,524 * 10^{-3} \text{ Wb} \quad (46)$$

Velikosti magnetické indukce ve jhu rotoru jsem zvolil následovně:

$$B_{j2} = 1,1T$$

Výška jha rotoru:

$$h_{j2} = \frac{\Phi_{j2}}{B_{j2} * k_{Fe} * l_{skut}} = \frac{0,524 * 10^{-3}}{1,1 * 0,97 * 0,0485} = 0,0101 m \quad (47)$$

Výšku jha rotoru h_{j2} volím:

$$h_{j2} = 0,01 m$$

Hodnota magnetické indukce pro zvolenou výšku jha rotoru:

$$B_{j2} = \frac{\Phi_{j2}}{h_{j2} * k_{Fe} * l_{skut}} = \frac{0,524 * 10^{-3}}{0,01 * 0,97 * 0,0485} = 1,113 T \quad (48)$$

4.2.5. Návrh statorové drážky

Zvolil jsem polouzavřenou drážku typu L, aby byla šířka zubu statoru konstantní.

Drážková rozteč:

$$t_d = \frac{\pi * (D_1 - 2 * (h_0 + h_1))}{Q} = \frac{\pi * (360 - 2 * (1 + 0,2))}{45} = 24,965 mm \quad (49)$$

Šířka drážky:

$$b_1 = t_d - b_z = 24,965 - 12,6 = 12,365 mm \quad (50)$$

Po konzultaci s vedoucím práce, volím proudovou hustotu ve vodiči J následovně:

$$J = 10 A/mm^2$$

Hodnota optimální plochy vodiče:

$$S_V = \frac{I_f}{J} = \frac{77,48}{10} = 7,75 \text{ mm}^2 \quad (51)$$

Volba vodiče:

$$D_v = 1,6 \text{ mm}$$

$$\rho_i = 0,071 \text{ mm}$$

kde D_v je průměr vodiče a ρ_i izolace vodiče (v mém případě stupeň 2 = dvojitá izolace).

Výpočet plochy jednoho vodiče:

$$S_{V1} = \pi * \left(\frac{D_v}{2}\right)^2 = \pi * \left(\frac{1,6}{2}\right)^2 = 2,011 \text{ mm}^2 \quad (52)$$

Počet vodičů:

$$N_P = \frac{S_V}{S_{V1}} = \frac{7,75}{2,011} = 3,85 \quad (53)$$

Volím počet vodičů:

$$N_{P_skut} = 4$$

Skutečná hodnota optimální plochy vodiče je:

$$S_{V_skut} = N_{P_skut} * S_{V1} = 4 * 2,011 = 8,042 \text{ mm}^2 \quad (54)$$

Skutečná hodnota proudové hustoty ve vodiči:

$$J_{skut} = \frac{I_f}{a_{\approx} * N_{P_skut} * S_{V1}} = \frac{77,48}{1 * 4 * 2,011} = 9,633 \text{ A/mm}^2 \quad (55)$$

Plocha cívký:

$$S_C = N_{p_skut} * N_C * \pi * \left(\frac{D_U}{2}\right)^2 = 4 * 10 * \pi * \left(\frac{1,671}{2}\right)^2 = 87,72 \text{ mm}^2 \quad (56)$$

Plochu cívký S_c volím:

$$S_c = 88 \text{ mm}^2$$

Činitel plnění drážky:

$$k_d = 0,5$$

Plocha drážky:

$$S_d = \frac{2u * S_c}{k_d} = \frac{2 * 88}{0,5} = 352 \text{ mm}^2 \quad (57)$$

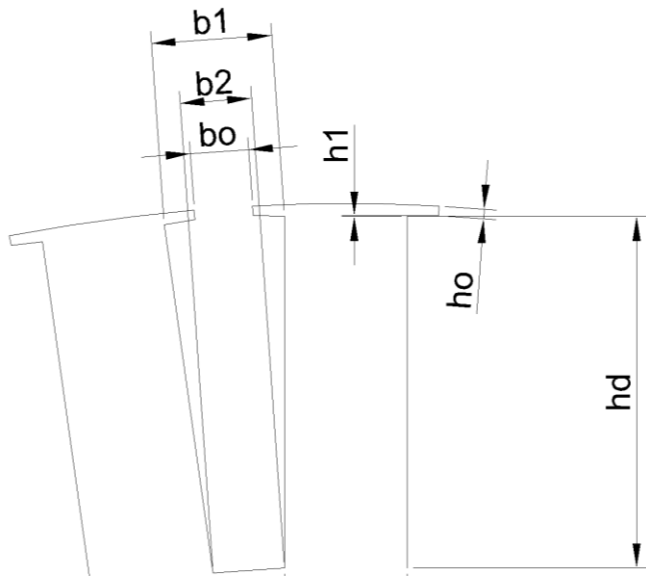
Šířka zubu je funkcí hloubky drážky tedy $b_z = f(h_d)$ a b_z je konstanta, zvolil jsem hloubku drážky h_d a následně jsem dopočítal zbylé parametry drážky.

Hloubka drážky:

$$h_d = 36 \text{ mm}$$

Šířka dna drážky:

$$b_2 = \frac{S_d * 2}{h_d} - b_1 = \frac{352 * 2}{36} - 12,37 = 7,19 \text{ mm} \quad (58)$$



Obr. 20: Geometrie drážky

b_0	[mm]	1
b_1	[mm]	12,37
b_2	[mm]	7,19
h_0	[mm]	1
h_1	[mm]	0,2
h_d	[mm]	36

Tab. 3: Rozměry drážky

4.2.6. Dimenzování permanentních magnetů

Z katalogu použitých plechů (viz. Příloha 5) jsem odečetl intenzity magnetického pole pro jednotlivé magnetické indukce ve jhu statoru B_{j1} , jhu rotoru B_{j2} a zubu statoru B_z .

$$B_{j1} = 1,1 \text{ T} \text{ tomu odpovídá } H_{j1} = 155 \text{ A/m}$$

$$B_{j2} = 1,1 \text{ T} \text{ tomu odpovídá } H_{j2} = 155 \text{ A/m}$$

$$B_z = 1,5 \text{ T} \text{ tomu odpovídá } B_z = 1066 \text{ A/m}$$

Parametry permanentních magnetů (viz. Příloha 6):

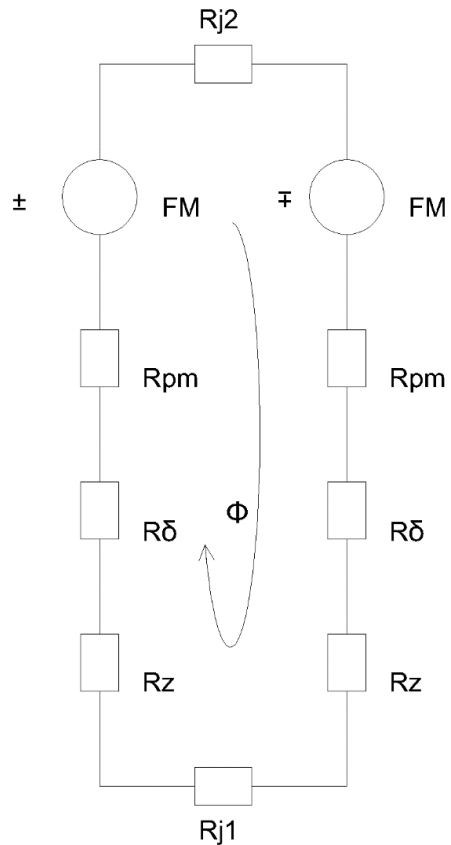
Koercivita magnetů $H_c = 899\,000 \text{ A/m}$

Teplotní pokles remanence $\alpha(B_r) = -0,12 \text{ \%/}^\circ\text{C}$

Teplotní pokles koercivity $\alpha(H_c) = -0,605 \text{ \%/}^\circ\text{C}$

Relativní permeabilita $\mu_r = 1,051$

Teplotní třída $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 21: Náhradní schéma magnetického obvodu

Vypočet intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře:

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{0,9}{4\pi * 10^{-7}} = 716\,197,24 \text{ A/m} \quad (59)$$

Délka siločáry v zubu statoru:

$$h_z = h_d + h_1 + h_o = 36 + 1 + 0,1 = 37,2 \text{ mm} \quad (60)$$

Délka střední siločáry ve jhu statoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi * (D_1 - 2 * h_z * h_{j1})}{Q} = \frac{\pi * (360 - 2 * 37,2 * 8,6)}{45} = 19,34 \text{ mm} \quad (61)$$

Úbytek napětí ve statorovém jhu:

$$\Delta U_{j1} = H_{j1} * l_{j1} = 155 * 0,01934 = 2,997 A \quad (62)$$

Úbytek napětí ve statorovém zubu:

$$\Delta U_z = H_z * h_z = 1066 * 0,0372 = 39,655 A \quad (63)$$

Délka střední siločáry ve jhu rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi * \frac{D_e}{2}}{2p} = \frac{\pi * \frac{388}{2}}{30} = 20,316 \text{ mm} \quad (64)$$

Úbytek napětí v rotorovém jhu:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} * l_{j2} = 155 * 0,020316 = 3,149 A \quad (65)$$

Pro další výpočty je nutné určit úbytek napětí ve vzduchové mezeře. K tomu je potřeba určit hodnotu Carterova činitele, který zohledňuje vliv drážkování na magnetickou vodivost vzduchové mezery.

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{6}{1}\right)^2}{5 + \frac{6}{1}} = 3,2727 \quad (66)$$

Carterův činitel:

$$k_c = \frac{t_d}{td - \gamma * \delta} = \frac{24,965}{24,965 - 3,2727 * 1} = 1,151 \quad (67)$$

Přepočítaná velikost vzduchové mezery:

$$\delta' = k_c * \delta = 1,151 * 1 = 1,151 \text{ mm} \quad (68)$$

Úbytek napětí ve vzduchové mezeře:

$$\Delta U_{\delta} = H_{\delta} * \delta' = 716\,197,24 * 1,151 = 824,25\text{ A} \quad (69)$$

Šířka permanentního magnetu:

$$b_m = \alpha_m * t_p = 0,7 * 0,0376 = 0,02639\text{ m} \quad (70)$$

Šířku permanentního magnetu zaokrouhluji na:

$$b_m = 26,4\text{ mm}$$

Magnetická indukce permanentních magnetů:

$$B_{PM} = \frac{\Phi_H}{b_m * l_{skut}} = \frac{0,00105}{0,0264 * 0,0485} = 0,818\text{ T} \quad (71)$$

Intenzita magnetického pole permanentních magnetů:

$$H_{PM} = \frac{B_{PM}}{\mu_r * 4 * \pi * 10^{-7}} = \frac{0,818}{1,051 * 4 * \pi * 10^{-7}} = 619\,494,2\text{ A/m} \quad (72)$$

Předběžná výška permanentních magnetů:

$$\begin{aligned} h_{m1} &= \frac{\Delta U_{j1} + \Delta U_{j2} + 2 * (\Delta U_{\delta} + \Delta U_z)}{2 * (H_c + H_{PM})} = \frac{2,997 + 3,149 + 2 * (824,25 + 39,66)}{2 * (889\,000 + 619\,494,2)} \\ &= 0,00311\text{ mm} \end{aligned} \quad (73)$$

Pro přesnější zjištění výšky magnetu, používám následující iterační postup:

$$\delta'' = h_{m1} + \delta = 3,11 + 1 = 4,11\text{ mm} \quad (74)$$

$$\gamma' = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta''}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta''}} = \frac{\left(\frac{6}{4,11}\right)^2}{5 + \frac{6}{4,11}} = 0,3302 \quad (75)$$

$$k'_c = \frac{t_d}{t_d - \gamma' * \delta''} = \frac{24,965}{24,965 - 0,3302 * 4,11} = 1,0155 \quad (76)$$

$$\delta'' = k'_c * \delta = 1,0155 * 1 = 1,0155 \text{ mm} \quad (77)$$

$$\Delta U'_\delta = H_\delta * \delta'' = 716\,197,24 * 1,0155 = 727,27 \text{ A} \quad (78)$$

Výška permanentního magnetu:

$$h_{m1} = \frac{\Delta U_{j1} + \Delta U_{j2} + 2 * (\Delta U_\delta + \Delta U_z)}{2 * (H_c + H_{PM})} = \frac{2,997 + 3,149 + 2 * (727,27 + 39,66)}{2 * (889\,000 + 619\,494,2)} \quad (79)$$

$$= 0,00276 \text{ mm}$$

Po konzultaci s vedoucím jsem zvolil výšku permanentního magnetu h_m :

$$h_m = 3 \text{ mm}$$

Celkový rozměr magnetu je:

$$h_m \times b_m \times l_m = 3 \times 26,4 \times 48,5 \text{ mm}$$

4.2.7. Výpočet odporu vinutí

Šířka cívky:

$$t_d \left(\frac{1}{2} \right) = \frac{\pi * (D_1 - 2 * (h_0 + h_1) - h_d)}{Q} = \frac{\pi * (360 - 2 * (1 + 0,1) - 36)}{45} \quad (80)$$

$$= 22,45 \text{ mm}$$

Určení délky čela:

$$l_{\zeta} = 2 * l_v + \pi * \frac{t_d \left(\frac{1}{2}\right)}{2} = 2 * 5 + \pi * \frac{22,45}{2} = 45,27 \text{ mm} \quad (81)$$

kde l_v je délka vyložení. Její hodnotu jsem po konzultaci zvolil následovně:

$$l_v = 5 \text{ mm}$$

Střední délka cívky:

$$l_c = 2 * (l_{skut} + l_{\zeta}) = 2 * (48,5 + 45,27) = 187,53 \text{ mm} \quad (82)$$

Celková délka vinutí:

$$l_f = N_s * l_c = 150 * 187,53 = 28\,130,22 \text{ mm} = 28,13 \text{ m} \quad (83)$$

Odpor vinutí při teplotě 20 °C:

$$R_{Cu_{20}} = \frac{1}{\gamma_{Cu}} * \frac{l_f}{S_v} = \frac{1}{58,6 * 10^6} * \frac{28,13}{8,042 * 10^{-6}} = 0,0597 \, \Omega \quad (84)$$

Kde χ_{Cu} je rezistivita mědi při teplotě 20 °C.

Odpor vinutí při teplotě 120 °C:

$$R_{Cu_{120}} = \frac{1}{\gamma_{Cu}} * \frac{l_f}{S_v} = \frac{1}{41,87 * 10^6} * \frac{28,13}{8,042 * 10^{-6}} = 0,0836 \, \Omega \quad (85)$$

4.2.8. Výpočet parametrů náhradního schématu

Výpočet jmenovité hodnoty impedance:

$$Z_n = \frac{U_f}{I_f} = \frac{155,885}{77,48} = 2,012 \, \Omega \quad (86)$$

Poměrná hodnota odporu vinutí:

$$r_a = \frac{R_{Cu_{120}}}{Z_n} = \frac{0,0836}{2,012} = 0,0415 \quad (87)$$

Určení efektivní šířky vzduchové mezery:

$$\delta_{ef} = \delta' * \frac{h_m}{\mu_r} = 1,151 * \frac{3}{1,051} = 4,005 \text{ mm} \quad (88)$$

Výpočet magnetizační indukčnosti:

$$\begin{aligned} L_\mu &= t_p * l_{skut} * \frac{\mu_0}{\delta_{ef}} * \frac{4 * q}{Q} * \left(\frac{m}{\pi} * N_S * k_{v1} \right)^2 = \\ &= 0,0377 * 0,0485 * \frac{4 * \pi * 10^{-7}}{0,004} * \frac{4 * \frac{1}{2}}{45} * \left(\frac{3}{\pi} * 150 * 0,8663 \right)^2 \\ &= 0,393 * 10^{-3} \text{ H} \end{aligned} \quad (89)$$

Podélná reaktance:

$$X_{ad} = 2 * \pi * L_\mu = 2 * \pi * 0,0393 * 10^{-3} = 0,4933 \ \Omega \quad (90)$$

Činitelé charakterizující zkrácení kroku statorového vinutí:

$$k'_\beta = \frac{1}{4} * (1 + 3 * \beta) = \frac{1}{4} * (1 + 3 * 0,667) = 0,75 \quad (91)$$

$$k_\beta = \frac{1}{4} * (1 + 3 * \beta') = \frac{1}{4} * (1 + 3 * 0,75) = 0,8125 \quad (92)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_d}{3 * b_1} * k'_\beta + \left(\frac{3 * h_1}{b_1 + 2 * b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) * k_\beta = \\ &= \frac{36}{3 * 12,365} * 0,75 + \left(\frac{3 * 0,2}{12,365 + 2 * 6} + \frac{1}{6} \right) * 0,8125 = 0,9369 \end{aligned} \quad (93)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\begin{aligned}\lambda_{\xi} &= 0,34 * \frac{q}{l_{skut}} * (l_{skut} - 0,64 * \beta * t_p) = \\ &= 0,34 * \frac{\frac{1}{2}}{0,0485} * (0,0485 - 0,64 * 0,667 * 0,0377) = 0,11\end{aligned}\quad (94)$$

Výpočet diferenční indukčnosti:

$$L_{dif} = L_{\mu} * \tau_{dif} = 0,393 * 10^{-3} * 0,462 = 0,1814 * 10^{-3} H \quad (95)$$

Určení rozptylové indukčnosti:

$$\begin{aligned}L_{a\sigma} &= 2 * \mu_0 * \frac{l_{skut}}{p * q} * N_s^2 * (\lambda_d + \lambda_{\xi}) + L_{dif} \\ &= 2 * 4 * \pi * 10^{-7} * \left(\frac{0,0485}{15 * \frac{1}{2}} \right) * N_s^2 * (0,9369 + 0,11) + 0,1814 * 10^{-3} \\ &= 0,277 * 10^{-3} H\end{aligned}\quad (96)$$

Rozptylová reaktance:

$$X_{a\sigma} = 2 * \pi * f * L_{a\sigma} = 2 * \pi * 200 * 0,277 * 10^{-3} = 0,3482 \Omega \quad (97)$$

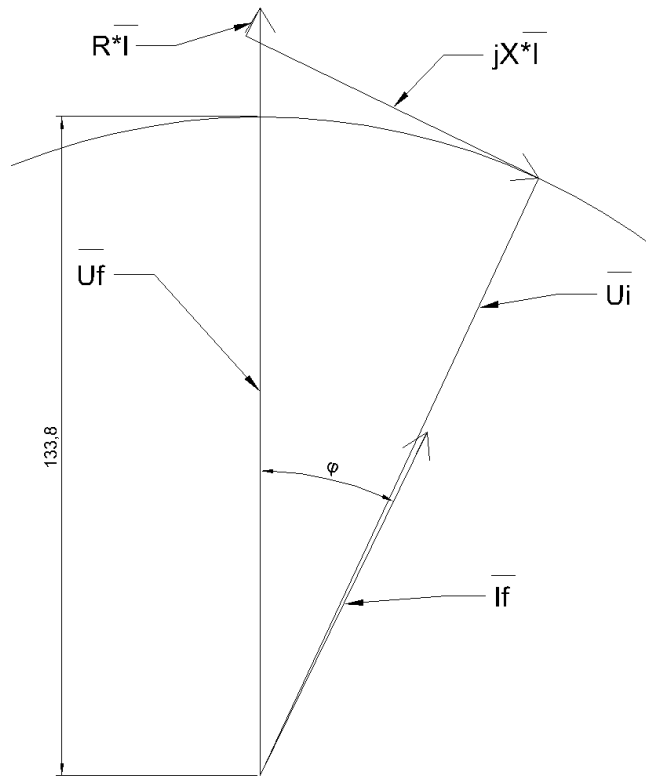
Celková synchronní reaktance:

$$X_d = X_{ad} + X_{a\sigma} = 0,4933 + 0,3482 = 0,8415 \Omega \quad (98)$$

Celková synchronní reaktance v poměrných jednotkách:

$$x_d = \frac{X_d}{Z_n} = \frac{0,8415}{2,012} = 0,4183 \quad (99)$$

Nakreslením fázorového diagramu lze ověřit, zda koeficient k_e byl zvolen správně. Fázor indukovaného napětí U_i by měl mít totožný směr jako fázor jmenovitého proudu I_f . Na Obr.22 je patrné, že se hodnota koeficientu k_e téměř neliší od zvolené hodnoty.



$$k_e = U_i / U_f = 133,8 / 155,89 = 0,858$$

Obr. 22: Fázorový diagram

4.2.9. Výpočet ztrát a účinnosti stroje

Výpočet Jouleových ztrát:

$$\Delta P_{j1} = m * R_{Cu120} * I_f^2 = 3 * 0,08356 * 77,48 = 1\,504,76\,W \quad (100)$$

Ztráty v železe

Hmotnost zubů:

$$\begin{aligned} m_z &= \rho_{Fe} * (h_d + h_1 + h_0) * l_{skut} * b_z * Q \\ &= 7\,650 * (0,036 + 0,001 + 0,0002) * 0,0485 * 0,0126 * 45 = 7,826\,kg \end{aligned} \quad (101)$$

Kde ρ_{Fe} je hustota železa. Jeho hodnota je:

$$\rho_{Fe} = 7\,650\,kg/m^3$$

Ztráty v železe pro zuby statoru:

$$\Delta P_z = \Delta p_p * k_{tz} * m_z = 26,6 * 1,7 * 7,826 = 353,88\,W \quad (102)$$

Kde Δp_p je ztrátové číslo plechu (viz. Příloha 5) a k_{tz} je činitel zvýšení ztrát vlivem technologie zpracování plechů. Jeho hodnotu jsem po konzultaci s vedoucím zvolil následovně:

$$k_{tz} = 1,7$$

Výpočet hmotnosti jha statoru:

$$\begin{aligned} m_j &= \rho_{Fe} * (\pi * (D_1 - h_d) * l_{skut} * h_{j1}) \\ &= 7\,650 * (\pi * (0,36 - 0,036) * 0,0485 * 0,0086) = 3,248\,kg \end{aligned} \quad (103)$$

Ztráty v železe pro jho statoru:

$$\Delta P_j = \Delta p_p * k_{tz} * m_j = 13,4 * 1,7 * 3,248 = 73,986\,W \quad (104)$$

Celkové ztráty v železe:

$$P_{Fe} = \Delta P_z + \Delta P_j = 353,88 + 73,986 = 427,87\,W \quad (105)$$

Mechanické ztráty

Obvodová rychlost rotoru:

$$v_2 = \left(\frac{\pi * n}{30}\right) * \frac{D_1}{2} = \left(\frac{\pi * 800}{30}\right) * \frac{0,36}{2} = 15,08 \text{ m/s} \quad (106)$$

Vnitřní průměr rotoru:

$$D_2 = D_1 + (2 * \delta) = 360 + (2 * 1) = 362 \text{ mm} \quad (107)$$

Určení mechanických ztrát stroje:

$$\begin{aligned} \Delta P_{mech} &= k_m * D_2 * (l_{skut} + 0,6 * t_p) * v_2^2 = \\ &= 7 * 0,362 * (0,0485 + 0,6 * 0,0377) * 15,08^2 = 40,98 \text{ W} \end{aligned} \quad (108)$$

Kde k_m je činitel mechanických ztrát. Po konzultaci s vedoucím práce jeho velikost volím:

$$k_m = 7$$

Ztráty v permanentních magnetech:

$$\Delta P_{PM} = \frac{1}{3} * \Delta P_{j1} = \frac{1}{3} * 1\,504,76 = 501,59 \text{ W} \quad (109)$$

Celkové ztráty stroje:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{PM} = 1\,504,76 + 427,87 + 40,98 + 501,59 \\ &= 2\,475,2 \text{ W} \end{aligned} \quad (110)$$

Ztráty způsobené napájením z PWM:

$$\Delta P_{PWM} = 1,2 * \Delta P = 1,2 * 2\,475,2 = 2\,970,24 \text{ W} \quad (111)$$

Celková účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_{PWM}} * 100 = \frac{30\,000}{30\,000 + 2\,475,2} * 100 = 90,99 \% \quad (112)$$

5. Ověření návrhu metodou konečných prvků

5.1. Simulace v programu FEMM

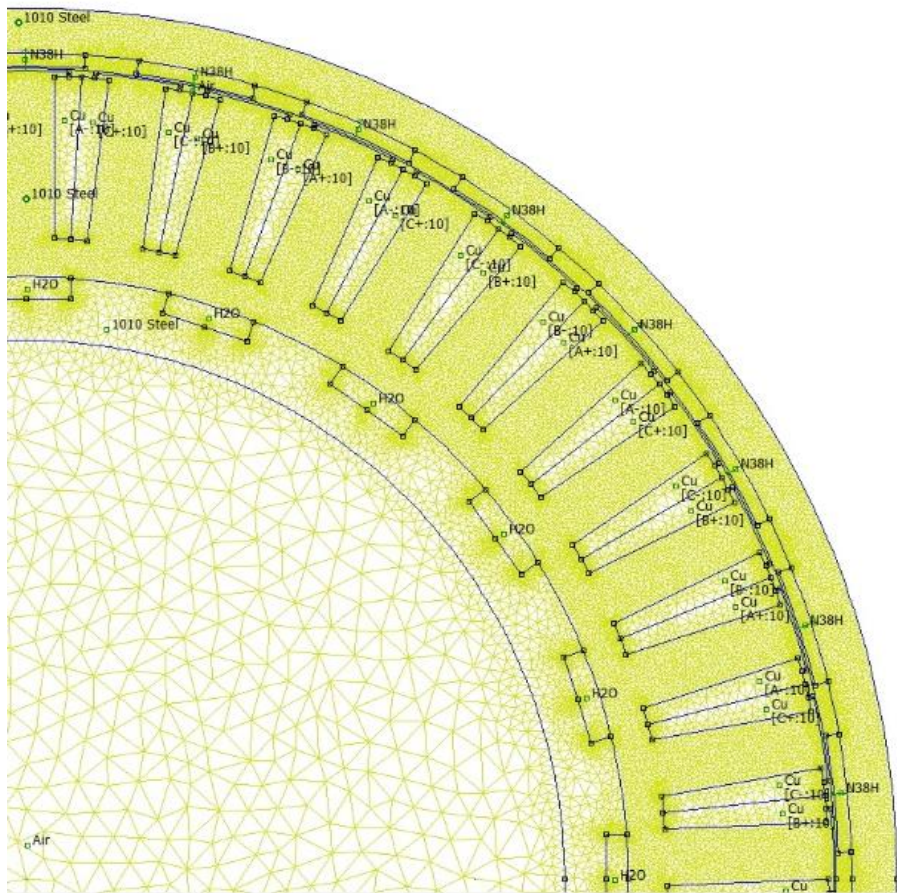
V programu AutoCAD byl vytvořen dvourozměrný výkres PMSM (viz. Příloha 7), který byl následně importován do programu FEMM. Dále jsem nadefinoval materiálové vlastnosti jednotlivých částí motoru, použité permanentní magnety a hodnoty proudů protékající vinutím.

Velikost proudu ve fázi A byla dána výpočtem:

$$I_a = \sqrt{2} * I_f = \sqrt{2} * 77,48 = 109,57 \text{ A} \quad (113)$$

Ve zbývajících fázích byla velikost proudu zvolena následovně:

$$I_b = I_c = \frac{I_a}{2} = \frac{109,57}{2} = 54,78 \text{ A} \quad (114)$$



Obr. 23: Část PMSM s nadefinovanou sítí mesh

Parametry permanentních magnetů jsem nedefinoval dle katalogu výrobce (viz. Příloha 6).

Relativní permeabilita magnetu:

$$\mu_r = 1,051$$

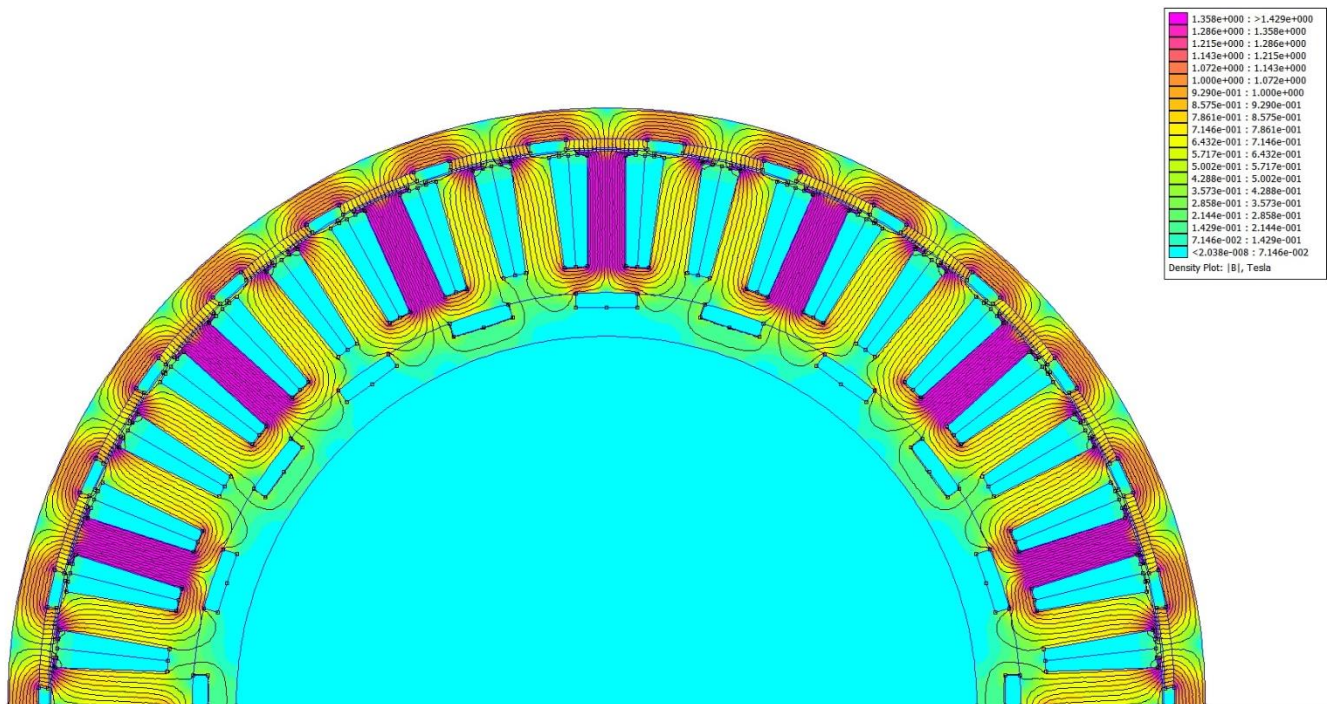
Koercivita magnetu:

$$H_c = 899\,000\text{ A/m}$$

Parametry vody v chladících kanálech a vzduchu ve vzduchové mezeře byly zvoleny následovně:

$$\mu_r = 1$$

Elektrodynamické plechy jsem zvolil stejné pro stator i rotor. Parametry plechů jsou brány z materiálové knihovny programu FEMM (Steel 1010) s definovanou tloušťkou $0,5\text{ mm}$ a činitelem plnění $0,97$.

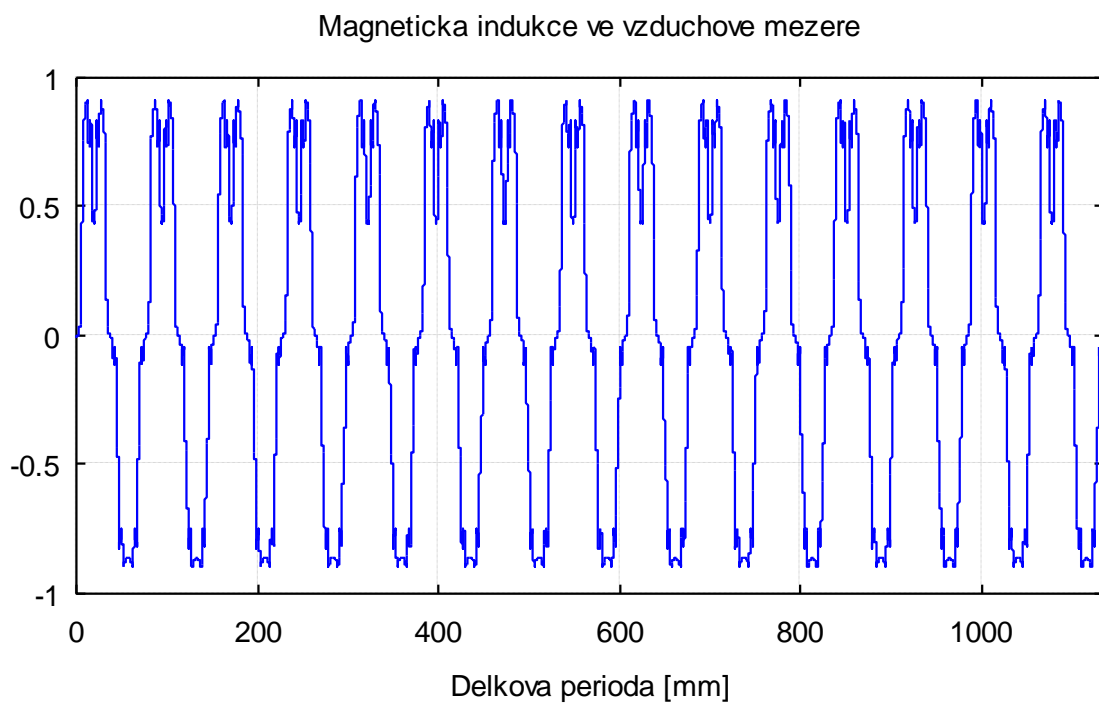


Obr. 24: Kompletní simulace rozložení magnetického pole

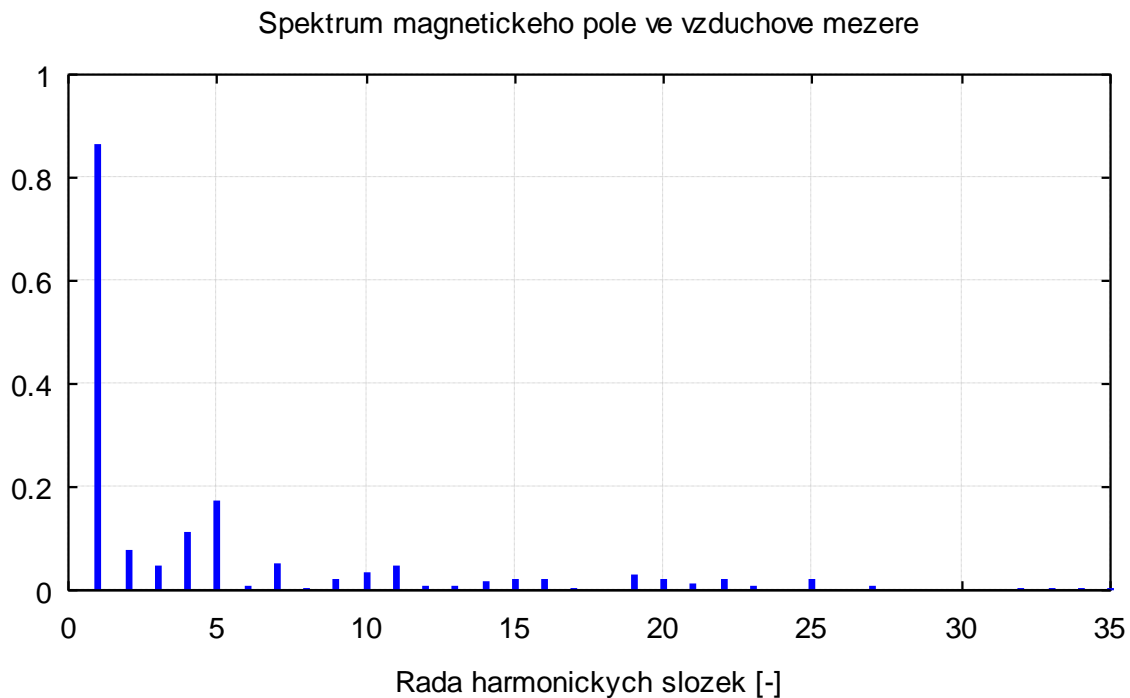
Hodnoty magnetické indukce ve jhu statoru se pohybují v rozmezí $0,23\text{ T} - 1,03\text{ T}$. Způsobený rozdíl je dán zvětšením statorového jha o chladící kanály. Statorový zub je sycen magnetickou indukcí $1,43\text{ T}$ což odpovídá hodnotě vypočtené z návrhu stroje. Velikost indukce v rotorovém jhu je v rozsahu $0,32\text{ T} - 1,02\text{ T}$, kde hodnota $1,02\text{ T}$ odpovídá vypočtené hodnotě z elektromagnetického návrhu.

5.2. Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře byla simulována pomocí vložené osy do vzduchové mezery PMSM. Velikost B_δ odpovídá zvolené hodnotě 0,9 T. Data získaná z programu FEMM byla dále zpracována pomocí FFT (Rychlá Fourierova Transformace) pro získání spektra vyšších harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Z obr. 26 je patrná základní harmonická ($B = 0,9$ T) a také pátá harmonická, která má velikost cca. 0,18 T. Zubové harmonické ($\nu = 23$ a 25) jsou minimální.



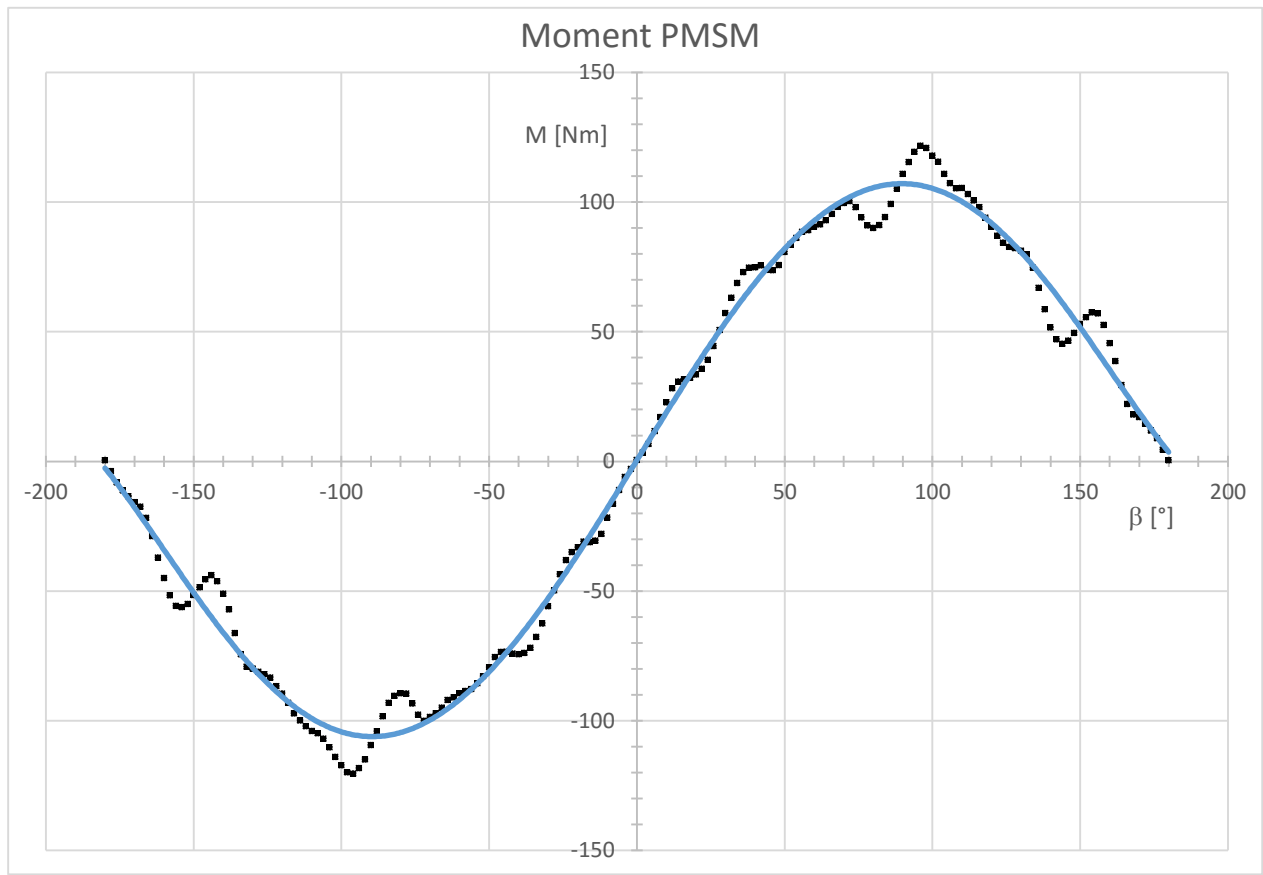
Obr. 25: Průběh B_δ ve vzduchové mezeře



Obr. 26: FFT magnetického pole ve vzduchové mezeře

5.3. Moment stroje

Pro výpočet momentové charakteristiky PMSM jsem použil Lua skript (na CD) od vedoucího diplomové práce. Skript pro výpočet momentu funguje velmi podobně jako pro zjištění magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Liší se pouze v zadání počtu poloh pro které probíhá výpočet momentu stroje, proto jsem zvolil 180 poloh po obvodu PMSM. Pro otočení stroje na danou polohu je nutné použít práci se skupinami, z tohoto důvodu byl stator zahrnut do jedné skupiny. Při výpočtu momentu metodou konečných prvků není uvažována změna účinníku ani změna velikosti proudu ve statoru.



Obr. 27: Průběh momentu stroje

6. Závěr

Tato diplomová práce se věnuje tématu synchronních motorů s permanentními magnety (PMSM) pro účely pohonů automobilové techniky.

První část je zaměřena na základní principy funkce a obecný popis PMSM. Následuje podrobnější popis konstrukce statoru včetně nejčastěji používaných druhů vinutí. Dále pojednává o konstrukci rotorů a způsobu umístění permanentních magnetů.

Druhá část tohoto dokumentu popisuje historii a vývoj elektromobilů a hybridních automobilů. Dále bylo vypracováno dělení pohonů hybridních automobilů podle způsobu spojení spalovacího motoru a elektromotoru. Práce se dále zabývá popisem hybridního soustrojí Toyoty Prius a konstrukčním uspořádání elektromotoru, který asistuje spalovacímu motoru při dynamičtější jízdě nebo při jízdě pouze na baterie. Při návrhu PMSM Toyoty Prius byl kladen důraz na mechanickou pevnost rotoru, malé ztráty v železe a efektivní využití reluktančního momentu. V popisu PMSM Toyoty Prius je vypracována tabulka (Tab. 2) s hlavními rozměry a parametry elektromotoru. Závěr druhé části je věnován základnímu popisu elektromobilů a hybridů světových značek.

Třetí část je věnována samotnému elektromagnetickému návrhu PMSM se zubovým vinutím. Byl zvolen koncept PMSM v náboji kola, který je nedílnou součástí kola. V návrhu byl "přepracován" pohonný systém Renaultu Kadjar na elektromotor. Jelikož maximální výkon spalovacího motoru (96 kW) byl příliš vysoký, byla zadána odpovídající hodnota jmenovitého výkonu PMSM při konstantním momentu z charakteristiky spalovacího motoru (Obr. 19). Dále byla tato hodnota jmenovitého výkonu PMSM zvolena poloviční z důvodu umístění motorů do kol zadní nápravy. Maximální vnější průměr stroje byl limitován typem použitých ráfků, proto velikost vnějšího průměru stroje je $D_e = 388$ mm. Pro návrh byly použity permanentní magnety typu NdFeB jejichž výška a koercivita byla stanovena z výpočtu úbytků magnetického napětí v magnetickém obvodu stroje. Na začátku elektromagnetického návrhu byly zvoleny a vypočteny základní parametry, se kterými se jen s drobnými úpravami počítalo po celou dobu návrhu. Výsledná účinnost stroje byla stanovena výpočtem $\eta = 90,99$ %. Hodnota vypočtené účinnosti se liší od stanovené hodnoty účinnosti $\eta = 92$ % jen minimálně.

Diplomová práce je zakončena simulací v programu FEMM a ověřením vypočítaných parametrů stroje. Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře vypočtená metodou konečných prvků je totožná s velikostí indukce danou elektromagnetickým návrhem. Charakteristika momentu stroje získaná ze simulace má o cca 230 Nm nižší maximální moment než je maximální moment vypočtený v návrhu. Tato chyba je nejspíše způsobena 64 bitovou verzí programu FEMM 4.2, která není úplně odladěna a není zcela kompatibilní s nejnovější verzí operačního systému Windows.

7. Použitá literatura

- [1] KOPYLOV, I.P. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988. ISBN 04-532-88
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. First Edition. United Kingdom: Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-69516-6
- [3] HANSELMAN, Duane C. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Second Edition. USA: Magna Physics Publishing, 2006. ISBN 1-881855-15-5.
- [4] GIERAS, F. Jacek, Mitchell WING. *Permanent Magnet Motor Technology*. Second Edition. USA: Marcel Dekker, 2002. ISBN 0-8247-0739-7.
- [5] MARTÍNEZ, Daniel. *Design of a Permanent – Magnet Synchronous Machine with Non – Overlapping Concentrated Windings*. Sweden 2012. XR-EE-E2C 2012:020
- [6] PARVIAINEN, Asko. *Design of Axial – Flux Permanent – Magnet Low – Speed Machine and Performance Comparison Between Radial – Flux and Axial – Flux Machines*. Finland: Digipaino 2005. ISBN 952-214-029-5.
- [7] VOŽENÍLEK, P., V. NOVOTNÝ a P. MINDL. *Elektromechanické měniče*. Praha: ČVUT Fakulta elektrotechnická, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [8] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů: Skripta k předmětu SES* [online]. 2012 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/>
- [9] *Historie elektromobilismu*. [online]. 2010. [cit 2016-05-01]. Dostupné z: <http://elektromobil.vseznamu.cz/historie-elektromobilismu>

- [10] HORČÍK, Jan. Mikrohybrid, plug-in nebo asistovaný? [online]. 2011. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/mikrohybrid-plug-nebo-asistovany-udelame-vam-v-autech-jasno>
- [11] ČERNÝ, Václav. Hybridní Toyota Prius. [online]. 2007. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/hybridni-toyota-prius--12720>
- [12] HOLUB, Gustav. Inovace v elektromotorech. [online]. 2006. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/inovace-v-elektromotorech--12789>
- [13] HOLUB, Gustav. Netradiční vinutí třífázových motorů. [online]. 2008. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36474.pdf>
- [14] NOVÁK, Jaroslav, Radovan DOLEČEK, Ondřej ČERNÝ, Jan ŠVANDA. [online]. 2010.
[cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41260.pdf>
- [15] NOVÁK, Jaroslav, Ondřej ČERNÝ, Jiří ŠIMÁNEK. Regulace synchronního motoru pro lehkou kolejovou trakci. [online]. 2008. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37264.pdf>
- [16] HORČÍK, Jan. Historie hybridních aut, 1.díl. [online]. 2009. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/historie-hybridnich-aut-1-dil>
- [17] HORČÍK, Jan. Historie hybridních aut, 2.díl. [online]. 2009. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/historie-hybridnich-aut-2-dil>

- [18] HORČÍK, Jan. Historie hybridních aut, 3.díl. [online]. 2009. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/historie-hybridnich-aut-3-dil>
- [19] Hybridní automobily – historie. [online]. 2008. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://baracudaj.blog.auto.cz/2008-08/hybridni-automobily-historie/>
- [20] KAMIYA, Munehiro. Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System [online]. 2005. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://e-mobile.ch/pdf/2005/321.pdf>
- [21] NOVÁK, Jaroslav. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část). [online]. 2006. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>
- [22] GRAHAM, Davies. Graham's Toyota Prius Topic Area. [online]. 2003. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://prius.ecrostech.com/#SubTopicLinks>
- [23] KACZMAREK, Robert. Simulating the Toyota Prius electric motor. [online]. 2012.
[cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://www.magneticmagazine.com/conferences/wp-content/uploads/2013/01/Cobham_Kaczmarek.pdf
- [24] COBHAM. Simulating the Toyota Prius electric motor using Opera – 3d. [online].
[cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://operafea.com/validation-studies/simulating-toyota-prius-electric-motor-opera3d/>
- [25] STAUNTON, R.H., C.W. AYERS, L.D. MARLINO, J.N. CHIASSON a T.A. BURRESS. [online].
[cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/890029>
- [26] VAVERKA, Lukáš. BMW i3. První jízdní dojmy a české ceny. [online]. 2013
[cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/bmw-i3-prvni-jizdni-dojmy-77560>

- [27] HORČÍK, Jan. TEST: BMW i3 – elektromobil pro moderní město. [online]. 2014. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/test-bmw-i3-elektromobil-pro-moderni-mesto>
- [28] LAPINE, Cherise. How the Tesla Model S Works. [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/tesla-model-s.htm>
- [29] KUBIŠ, František. Tesla Model S Signature Performance. [online]. 2013. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.roznovan.cz/~kubis/models.php>
- [30] NOVÁČEK, Michal. Co pohání elektromobily Tesla Motors. [online]. 2015. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://rc.305.cz/view.php?cisloclanku=2015050003>
- [31] JAVŮREK, Karel. Elon Musk: žádné „revoluční“ baterie nejsou použitelné. [online]. 2015. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.mobilmania.cz/bleskovky/elon-musk-zadne-revolucni-baterie-nejsou-pouzitelne/sc-4-a-1332733/default.aspx>
- [32] VOKÁČ, Luděk. Lexus má hybrid, co umí pálit gumy. Vynalezl totiž přehazovačku. [online]. 2016. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/lexus-lc-500h-predstaveni-louwman-dod-/automoto.aspx?c=A160219_083020_automoto_vok
- [33] Lexus LC 500h představuje vícestupňový hybridní pohon. [online]. 2016. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.auto-mania.cz/lexus-lc-500h-predstavuje-vicestupnovy-hybridni-pohon/>
- [34] DRAGON, Aleš. Lexus LC 500h: Nové velké sportovní kupé jako hybrid. [online]. 2016. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://autofun.blesk.cz/lexus-lc-500h-nove-velke-sportovni-kupe-jako-hybrid-15811/>

- [35] Renault Kadjar 2016 Alloy wheel fitment guide. [online]. 2016. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://www.wheel-size.com/size/renault/kadjar/2016/#trim-16-dci-eudm>
- [36] Synchronní stroj s permanentními magnety. [online]. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://mys.utia.cas.cz:1800/trac/bdm/export/1442/applications/dual/vahala/DP/kapitola1.pdf>.
- [37] Motory s permanentními magnety. [online]. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/A1M14PO2/Prednaska_6_Spec_pohony.pdf
- [38] KOČMAN, Stanislav. Synchronní stroje. [online]. 2004. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf
- [39] BURESS, T.A., S.L. CAMPBELL, C.L. COOMER, C.W. AYERS, A.A. WERESZCZAK, J.P. CUNNINGHAM, L.D. MARLINO, L.E. SEIBER, H.T. LIN. Evaluation of the Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System. [online]. 2011. [cit. 2016-05-01].
Dostupné z: <http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub26762.pdf>
- [40] VOJÁČEK, Martin: Hybridní automobily. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2012
- [41] NOVÁK, Miroslav: Hybridní pohony osobních vozidel. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, 2011
- [42] KUŘIL, Pavel: Permanentní magnety pro PMSM. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014

- [43] HORNÍKOVÁ, Lucie: Návrh synchronního motoru s PM. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2015
- [44] HRUŠKA, Karel, Martin SOKOL. Advanced Numeric Tooth Winding Analyses. [online]. [cit. 2016-05-05].
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=6415089>
- [45] Lohner-Porsche "Semper Vivus" '1900–06. [obrázek]. [online].
Dostupné z: <https://en.wheelsage.org/porsche/car37091/pictures/fhpl8a/>
- [46] Toyota Prius 4. generace: vše, co potřebujete vědět | Hybrid.cz. [obrázek]. [online]
Dostupní z: <http://www.hybrid.cz/toyota-prius-4-generace-vse-co-potrebuji-vedet>
- [47] Nejhorší systém ve vozidlech? Jednoznačně Stop-Start | Miluji ... [obrázek]. [online]
Dostupné z: <http://www.milujirizeni.cz/zajimavosti/nejhorsisystemvevozidlech-jednoznacne-stop-start/>
- [48] Hybridní Toyota Prius. [obrázek]. [online]
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/hybridni-toyota-prius--12720>
- [49] The BMW i3: The car that changed BMW. [obrázek]. [online]
Dostupné z: <http://www.bmwblog.com/2015/11/12/the-bmw-i3-the-car-that-changed-bmw/>
- [50] Tesla má problém s výrobou Modelu X a může za to Apple. [obrázek]. [online]
Dostupné z: <https://www.letemsvetemapple.eu/2015/10/05/tesla-ma-problem-s-vyrobou-modelu-x-a-muze-za-to-apple/>

[51] Lexus trademarks LC 500 and LC 500h names | LeftLaneNews. [obrázek]. [online]
Dostupné z: <http://www.leftlanenews.com/lexus-trademarks-lc-500-and-lc-500h-names.html>

8. Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1: Konstrukce PMSM [36].....	4
Obr. 2: Postupné a koncentrické vinutí.....	6
Obr. 3: Umístění permanentních magnetů.....	7
Obr. 4: PMSM s vnějším rotorem.....	8
Obr. 5: Elektromobil La Jamais Contente [16]	10
Obr. 6: Hybridní vůz Semper Vivus [45]	11
Obr. 7: Toyota Prius 4. generace [46]	12
Obr. 8: Blokové schéma hybridních pohonů.....	13
Obr. 9: Systém Stop&Start [47]	15
Obr. 10: Elektromotor, generátor a převodové ústrojí Toyoty Prius [49]	18
Obr. 11: Děrování satorového plechu model 2003 a 2004 [39]	19
Obr. 12: BMW i3 [49]	22
Obr. 13: Tesla Model S.....	23
Obr. 14: Uložení bateriových modulů Tesly Model S.....	24
Obr. 15: Asynchronní motor Tesly Model S.....	24
Obr. 16: Lexus LC 500h [51]	25
Obr. 17: Hybridní systém “Multistage Hybrid”	26
Obr. 18: Charakteristika spalovacího motoru Renault Kadjar.....	27
Obr. 19: Tyngleyho schéma pro první 4 póly stroje.....	33
Obr. 20: Geometrie drážky.....	41
Obr. 21: Náhradní schéma magnetického obvodu.....	42
Obr. 22: Fázorový diagram.....	49
Obr. 23: Část PMSM s nadefinovanou sítí mesh.....	52
Obr. 24: Kompletní simulace rozložení magnetického pole.....	53
Obr. 25: Průběh $B\delta$ ve vzduchové mezeře.....	54
Obr. 26: FFT magnetického pole ve vzduchové mezeře.....	55
Obr. 27: Průběh momentu stroje.....	56

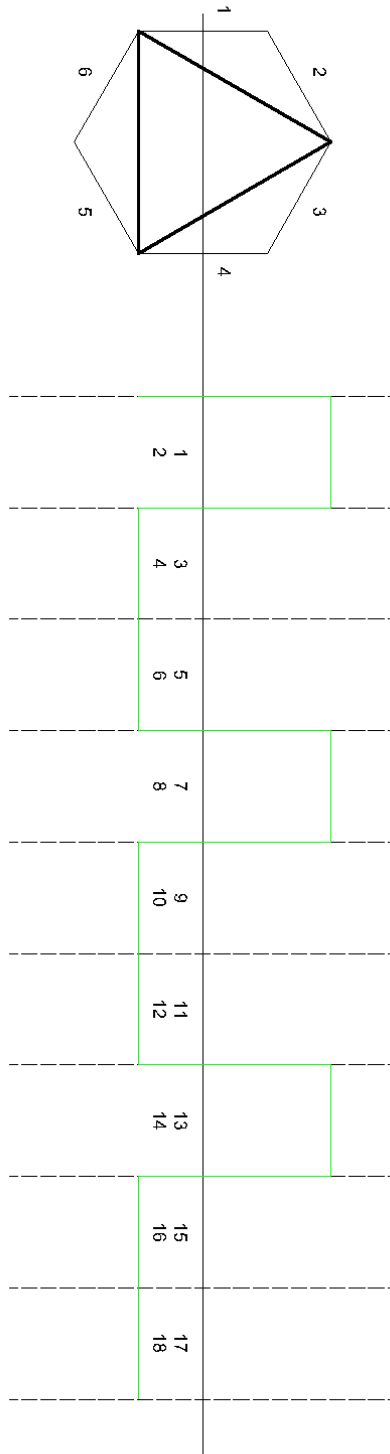
Tab.1: Základní parametry Toyoty Prius 4. generace [39]	17
Tab.2: Rozměry PMSM Toyoty Prius [39]	21
Tab.3: Rozměry drážky.....	41

9. Přílohy

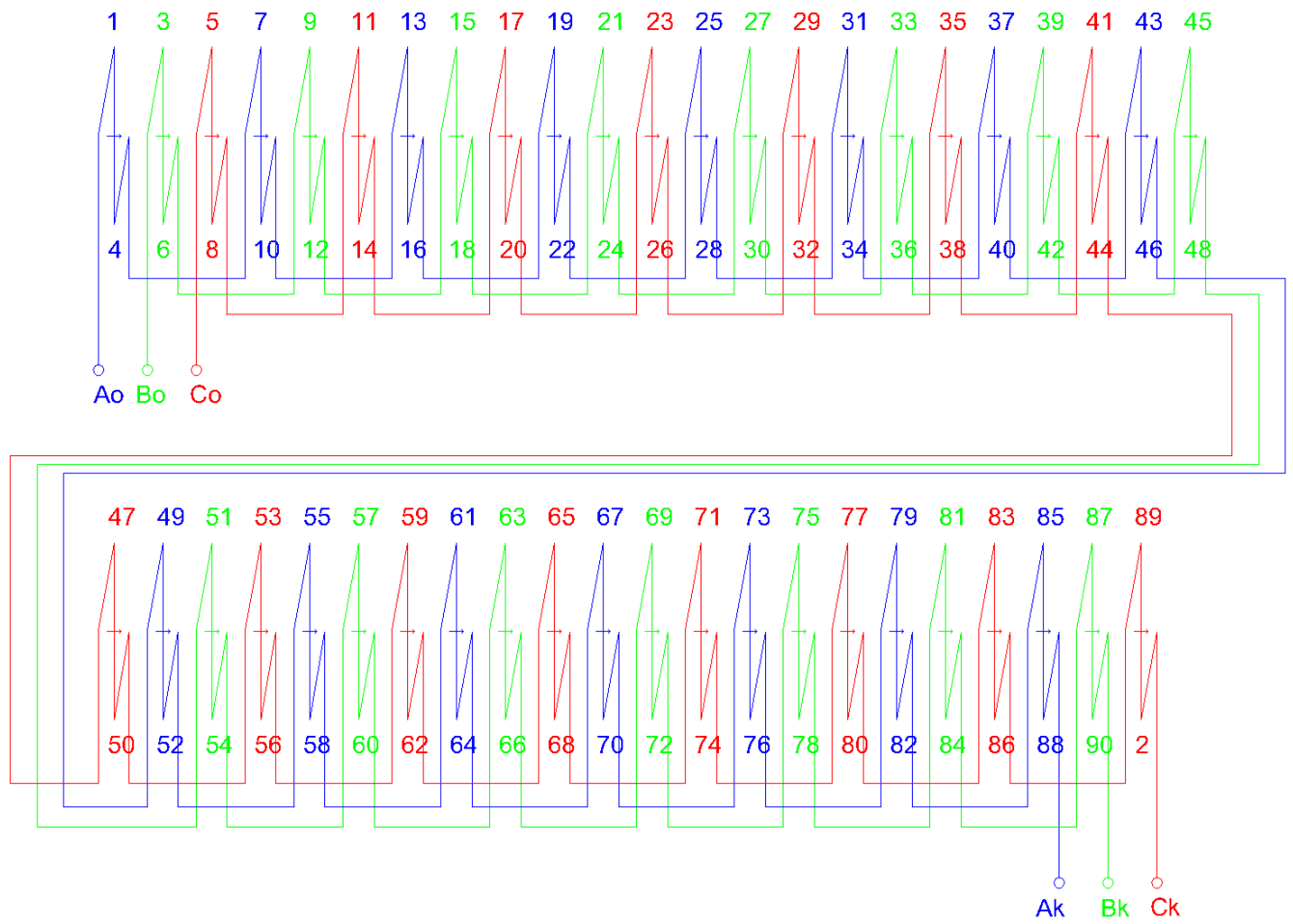
Příloha 1 – Tingleyho schéma

	fáze	A	C'	B
pól		A'	C	B'
1	+	1		3
		2		4
2	-		5	
			6	
3	+	7		9
		8		10
4	-		11	
			12	
5	+	13		15
		14		16
6	-		17	
			18	
7	+	19		21
		20		22
8	-		23	
			24	
9	+	25		27
		26		28
10	-		29	
			30	
11	+	31		33
		32		34
12	-		35	
			36	
13	+	37		39
		38		40
14	-		41	
			42	
15	+	43		45
		44		46
16	-		47	
			48	
17	+	49		51
		50		52
18	-		53	
			54	
19	+	55		57
		56		58
20	-		59	
			60	
21	+	61		63
		62		64
22	-		65	
			66	
23	+	67		69
		68		70
24	-		71	
			72	
25	+	73		75
		74		76
26	-		77	
			78	
27	+	79		81
		80		82
28	-		83	
			84	
29	+	85		87
		86		88
30	-		89	
			90	

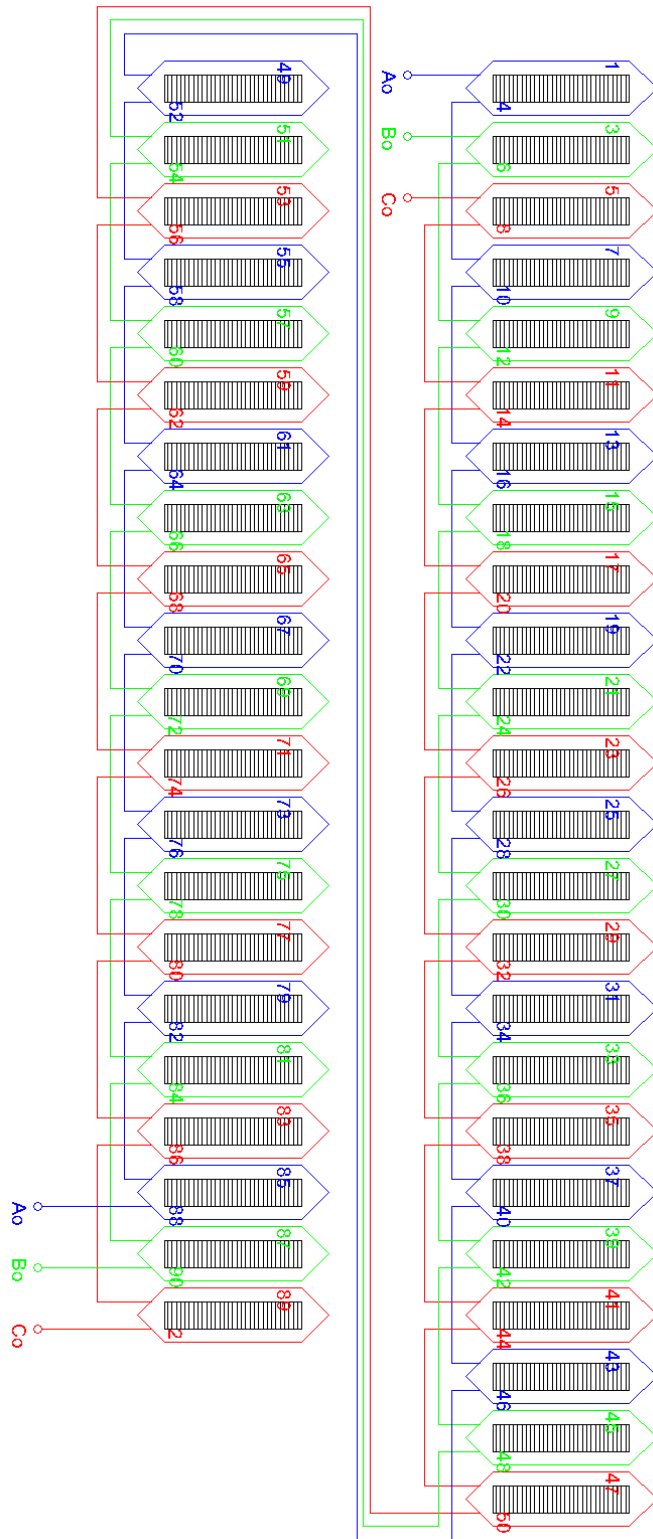
Příloha 2 – Görgesův obrazec



Příloha 3 – Pilové schéma



Příloha 4 – Schéma vinutí



Příloha 5 – Katalog použitých plechů

Typical data for SURA® M330-50A

1 (2)

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	0,03	0,07	27,7	0,05	0,13	0,34	1,64	6,55
0,2	0,09	0,19	36,4	0,20	0,49	1,36	5,71	22,7
0,3	0,18	0,34	42,4	0,43	1,06	2,84	11,7	47,8
0,4	0,28	0,51	47,8	0,71	1,78	4,77	19,7	82,9
0,5	0,41	0,70	52,9	1,04	2,65	7,18	30,1	130
0,6	0,55	0,93	58,3	1,42	3,66	10,1	43,1	194
0,7	0,71	1,20	64,1	1,84	4,83	13,6	59,2	281
0,8	0,89	1,50	71,0	2,32	6,17	17,7	78,2	392
0,9	1,08	1,86	79,7	2,85	7,69	22,5	103	529
1,0	1,29	2,30	91,8	3,43	9,42	28,1	132	697
1,1	1,53	2,86	110	4,08	11,4	34,6	166	
1,2	1,81	3,65	140	4,81	13,6	42,0		
1,3	2,12	5,00	205	5,63	16,0	50,2		
1,4	2,56	8,27	399	6,60	18,7	59,3		
1,5	3,03	19,9	1097	7,71	21,8	69,6		
1,6	3,49	54,7	2925					
1,7	3,84	124	6118					
1,8	4,15	239	10828					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg 3,03

Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg 1,29

Anisotropy of loss, % 10

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T 1,57

H = 5000 A/m, T 1,66

H = 10000 A/m, T 1,77

Coercivity (DC), A/m 40

Relative permeability at 1.5 T 1050

Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$ 42

Yield strength, N/mm² 315

Tensile strength, N/mm² 455

Young's modulus, RD, N/mm² 200 000

Young's modulus, TD, N/mm² 210 000

Hardness HV5 (VHN) 155



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



Dec 2009

T	W/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	A/m at 100 Hz	A/m at 200 Hz	A/m at 400 Hz	A/m at 1000 Hz	A/m at 2500 Hz
0,1	0,03	27,7	27,9	28,8	34,0	54,7	83
0,2	0,09	36,4	39,0	43,7	54,7	89,3	139
0,3	0,18	42,4	47,4	55,4	71,4	118	194
0,4	0,28	47,8	54,7	66,0	86,8	149	258
0,5	0,41	52,9	61,6	76,2	103	184	336
0,6	0,55	58,3	68,6	86,8	121	225	427
0,7	0,71	64,1	75,8	98,3	141	270	536
0,8	0,89	71,0	83,4	111	163	322	663
0,9	1,08	79,7	91,8	124	187	380	808
1,0	1,29	91,8	101	139	215	447	969
1,1	1,53	110	115	155	246	522	1147
1,2	1,81	140	145	173	280		
1,3	2,12	205	209	210	319		
1,4	2,56	399	404	397	398		
1,5	3,03	1097	1093	1066	1070		
1,6	3,49	2925					
1,7	3,84	6118					
1,8	4,15	10828					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,03
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,29
Anisotropy of loss, %	10
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,57
H = 5000 A/m, T	1,66
H = 10000 A/m, T	1,77
Coercivity (DC), A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42
Yield strength, N/mm ²	315
Tensile strength, N/mm ²	455
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HV5 (VPN)	155



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 6 – Katalog použitých magnetů



N38H

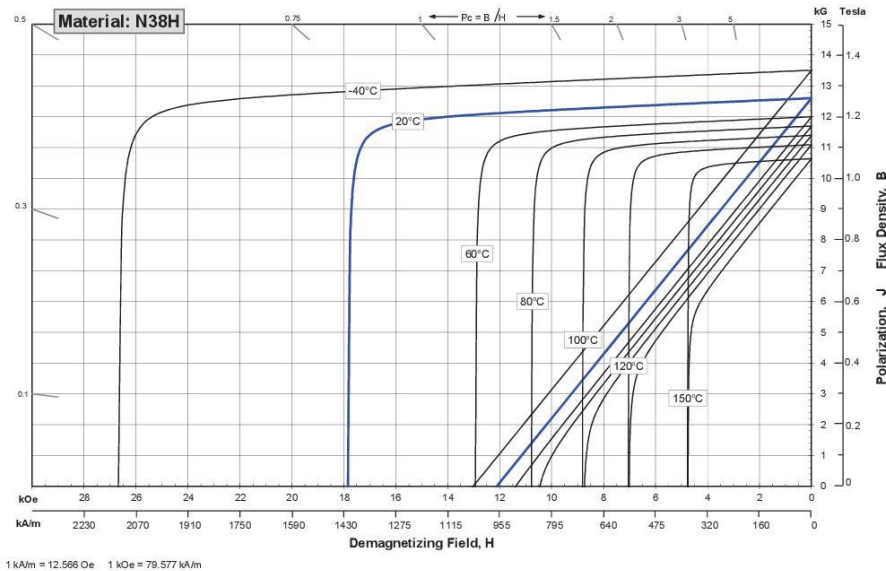
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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.
B_r , Residual Induction	Gauss	12,200	12,600	13,000
	mT	1220	1260	1300
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	11,300	11,850	12,400
	kA/m	899	943	987
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	17,000		
	kA/m	1,353		
BH_{max} , Maximum Energy Product	MGOe	36	39	41
	kJ/m ³	287	307	326

Characteristic	Units	C // C ⊥		
		C //	C ⊥	
Thermal Properties	Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾			
	of Induction, α(B _r)	%/°C	-0.120	
	of Coercivity, α(H _c)	%/°C	-0.605	
	Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C x 10 ⁻⁶	7.5	-0.1
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 120°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 7 – Příčný řez

