

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektrické stroje pro pohon formule E

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin JANOUŠ**
Osobní číslo: **E16B0016P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Elektrické stroje pro pohon formule E**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši používaných typů strojů pro pohon elektrických formulí.
2. Vyberte nejpoužívanější typy strojů a zhodnoťte jejich výhody a nevýhody.
3. Navrhněte koncept motoru pro formuli E.

Zaměřte se v rešerši kromě samotného principu a provedení stroje zejména na jmenovitou rychlost používaných strojů a jejich otáčkový rozsah, napěťovou hladinu, způsob chlazení a způsob přenosu točivého momentu stroje (typ a převod použité převodovky).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

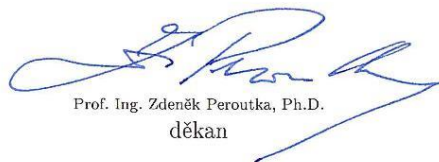
Seznam odborné literatury:

1. PETROV, G. N.: Elektrické stroje 1, 2. ACADEMIA, Praha, 1982.
2. HANSELMAN, D. C.: Brushless Permanent Magnet Motor Design. McGraw-Hill, USA, 1994. ISBN 978-0070260252.
3. Veřejně dostupné informační zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na rešerši používaných strojů pro pohon elektrických formulí, na jejich porovnání a na návrh konceptu motoru pro E formuli. Práce je rozdělena na několik částí. V první části práce je popsána soutěž Formula Student Electric a samotný koncept E formule. Druhá část se zabývá rešerší motorů používaných pro pohon elektrických formulí a srovnání jejich vlastností, a to zejména s ohledem na princip, konstrukci, jmenovitou rychlost, otáčkový rozsah, napěťovou hladinu, způsob chlazení a způsob přenosu točivého momentu. Třetí část je zaměřena na návrh konceptu motoru pro E formuli.

Klíčová slova

Formula Student Electric, elektrická formule, synchronní motor s permanentními magnety, motor s radiálním tokem, motor s axiálním tokem, bezkartáčový stejnosměrný motor, permanentní magnety, vodní chlazení

Abstract

This bachelor thesis is focused on the search of used machines for electric formula drive, on their comparison and design of the E formula motor. The thesis is divided into several parts. The first part of the thesis describes the competition Formula Student Electric and the concept of E formula itself. The second part deals with the research of engines used to drive electrical formulas and their properties, especially with regard to principle, design, nominal speed, speed range, voltage level, cooling method and method of torque transmission. The third part is focused on the design of the motor for E formula.

Key words

Formula Student Electric, electric formula, permanent magnet synchronous motor, radial flux motor, axial flux motor, brushless DC motor, permanent magnets, water cooling

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Martin Janouš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Seznam symbolů a zkratek

PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety	
RFPMSM	Synchronní motor s permanentními magnety s radiálním magnetickým tokem	
AFPMSM	Synchronní motor s permanentními magnety s axiálním magnetickým tokem	
BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor	
N_n	Jmenovité otáčky	[ot/min]
N_{max}	Maximální otáčky	[ot/min]
M_n	Jmenovitý moment	[Nm]
M_{max}	Maximální moment	[Nm]
P_{max}	Maximální výkon	[kW]
U_n	Jmenovité napětí	[V]
d_k	Průměr pneumatiky	[mm]
o_k	Obvod pneumatiky	[m]
n_k	Otáčky pneumatiky	[ot/min]
p	Převod převodovky	[-]
P_{vstup}	Výkon na vstupu převodu	[kW]
$P_{výstup}$	Výkon na výstupu převodu	[kW]
n_{vstup}	Otáčky na vstupu převodu	[ot/min]
$n_{výstup}$	Otáčky na výstupu převodu	[ot/min]
M_{vstup}	Moment na vstupu převodu	[Nm]
$M_{výstup}$	Moment na výstupu převodu	[Nm]
D_m	Průměr motoru	[mm]
L_m	Délka motoru	[mm]
D_s	Průměr statorového paketu	[mm]
L_s	Délka statorového paketu	[mm]
D_r	Průměr rotoru	[mm]
δ	Velikost vzduchové mezery	[m]

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	8
ÚVOD.....	11
1.1 KONCEPT FORMULA STUDENT ELECTRIC.....	11
1.2 KONCEPT E FORMULE.....	12
2 POUŽÍVANÉ STROJE PRO POHON FORMULE E.....	13
2.1 SYNCHRONNÍ MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY.....	13
2.2 SYNCHRONNÍHO MOTORU S RADIÁLNÍM TOKEM.....	14
2.2.1 Konstrukční provedení.....	15
2.3 SYNCHRONNÍ MOTORY S AXIÁLNÍM TOKEM.....	16
2.3.1 Konstrukční provedení.....	17
2.4 BLDC MOTORY.....	19
2.4.1 Konstrukční provedení.....	19
3 CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	20
3.1 CHLAZENÍ VZDUCHEM.....	20
3.2 CHLAZENÍ KAPALINOU.....	21
3.3 VODNÍ CHLAZENÍ.....	21
3.4 PŘEVODNÍ VODNÍHO CHLAZENÍ U SYNCHRONNÍCH MOTORŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY.....	22
3.4.1 Chlazení synchronních motorů s radiálním tokem.....	22
3.4.2 Chlazení synchronních motorů s radiálním tokem.....	24
4 POUŽÍVANÉ PŘEVODOVKY PRO E FORMULI.....	25
4.1 PLANETOVÁ PŘEVODOVKA.....	25
4.2 ŘETĚZOVÝ PŘEVOD.....	26
5 VYBRANÉ MOTORY.....	27
5.1 AMK SERVOMOTORY.....	27
5.1.1 AMK DD5-14-10-POW.....	27
5.1.2 AMK DT5-14-10-POW.....	28
5.2 FISCHER ELEKTROMOTOREN.....	29
5.2.1 Fischer TI85-052-070.....	29
5.3 EMRAX.....	30
5.3.1 Emrax 208.....	30
5.3.2 Emrax 228.....	31
5.4 MAGNAX.....	32
5.4.1 Magnax AXF225.....	32
5.5 YASA.....	33
5.5.1 Yasa 750 R.....	33
5.6 SIEMENS 1FE1.....	34
5.6.1 Siemens 1FE1082-6WP.....	35
5.7 POROVNÁNÍ POUŽÍVANÝCH MOTORŮ.....	35
5.8 POUŽÍVANÉ PŘEVODY PŘEVODOVEK.....	36
6 NÁVRH KONCEPTU MOTORU PRO E FORMULI.....	38
ZÁVĚR.....	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	41

PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA 1 KONCEPT MOTORU	1

Úvod

1.1 Koncept Formula Student Electric

Formula student je soutěž pro studenty technických vysokých škol v konstrukci vozů formule. Soutěž byla založena v roce 1981 ve Spojených státech amerických profesorem Ronem Matthewsem z Texaské univerzity. Soutěž původně probíhala pouze na území USA. V roce 1998 se rozšířila i do Evropy. Soutěž byla původně pouze pro vozy se spalovacím motorem [1]. Od roku 2010 se závodů Formula student účastní i formule s elektrickým pohonem a nově je možnost do soutěže zapsat i bezpilotní vozy. Soutěže se účastní studenti z celého světa [2].

Koncept soutěže je navrhnout malý závodní vůz ve stylu formule na poptávku fiktivního kontraktu. Prototyp závodního vozu se hodnotí z hlediska potenciálu jako výrobní položka. Každý studentský tým navrhuje, staví a testuje prototyp založený na sérii pravidel. Vozidlo je před startem soutěže zkontrolováno, jestli tyto pravidla splňuje. Závodní vůz je následně posuzován mnoha výkonnostními zkouškami, které jsou rozděleny do dvou kategorií, a to statické disciplíny a dynamické disciplíny [1]. Do statických disciplín je zahrnuta prezentace návrhu vozu porotě, kterou tvoří specialisté a špičkoví konstruktéři z oboru. Posuzují se inovace a technická vyspělost návrhu. Další disciplínou je analýza finančních nákladů na výrobu prototypu a finanční udržitelnost malosériové výroby v počtu 1000 kusů. Poslední statickou disciplínou je prezentace fiktivnímu investorovi, ve které se hodnotí hlavně kreativita a propracovanost služeb spojených s vozem (např. pronájem vozu s různým stupněm zázemí). Do dynamických disciplín spadá akcelerace na 75 metrů, dále sprint po vytyčené trati na čas, označovaný jako autokros. Skipad je disciplína, která má prověřit postranní akceleraci vozidla na silně točité trati připomínající osmičku. Poslední dynamickou disciplínou je vytrvalostní závod na 22 km, ve kterém se hodnotí množství spotřebované energie vůči celkovému času [2].

1.2 Koncept E formule

Formule je napájena z litium-polymerových akumulátorů s kapacitou do 10kWh, s maximálním napětím 600 V, což je maximální napětí, které pravidla Formula Student Electric povolují. Battery pack je ovládán z battery management systému, který hlídá napětí a teplotu jednotlivých článků. Pro pohon se používají jeden, dva nebo čtyři synchronní motory s permanentními magnety. Motory mohou být umístěny pouze na zadní nápravě, to je v případě použití jednoho motoru, který pohání celou zadní nápravu a dvou motorů, kde každý pohání jedno kolo. V případě použití čtyř motorů má každé kolo vlastní motor uložený v náboji kola. Maximální okamžitý výkon motorů je omezen na 80 kW. Toto omezení je stanoveno pravidly. Kolo formule je nejčastěji spojeno s motorem přes planetovou převodovku a je osazeno kotoučovou brzdou. Motor je napájen z měniče s výkonovými IGBT moduly. Řízení je vektorové. Všechny tyto komponenty jsou připevněny na hliníkovému nebo karbonovému rámu a zakryty karbonovým monokokem. Váha formule se pohybuje kolem 200 kg.

2 Používané stroje pro pohon formule E

2.1 Synchronní motory s permanentními magnety

Pro pohon elektrických formulí se používají synchronní motory s permanentními magnety. Tyto stroje se specifickou konstrukcí mají oproti asynchronním strojům a klasickým synchronním strojům s budícím vinutím celou řadu výhod, ale nalezneme u nich i několik negativních vlastností:

Výhody:

- Rotor stroje neobsahuje vinutí.
- Není potřeba zdroj budícího napětí a tím odpadá problém s přívodem budícího proudu do rotoru.
- Až třikrát větší úspora objemu a hmotnosti oproti asynchronním motorům.
- Velká momentová přetížitelnost.
- Větší účinnost oproti asynchronnímu motoru vlivem absence jouleových ztrát v rotoru.
- Možnost konstrukce výkonných pomaloběžných motorů.
- Konstrukce pohonů s absencí převodovky.
- Vysoká dynamika.

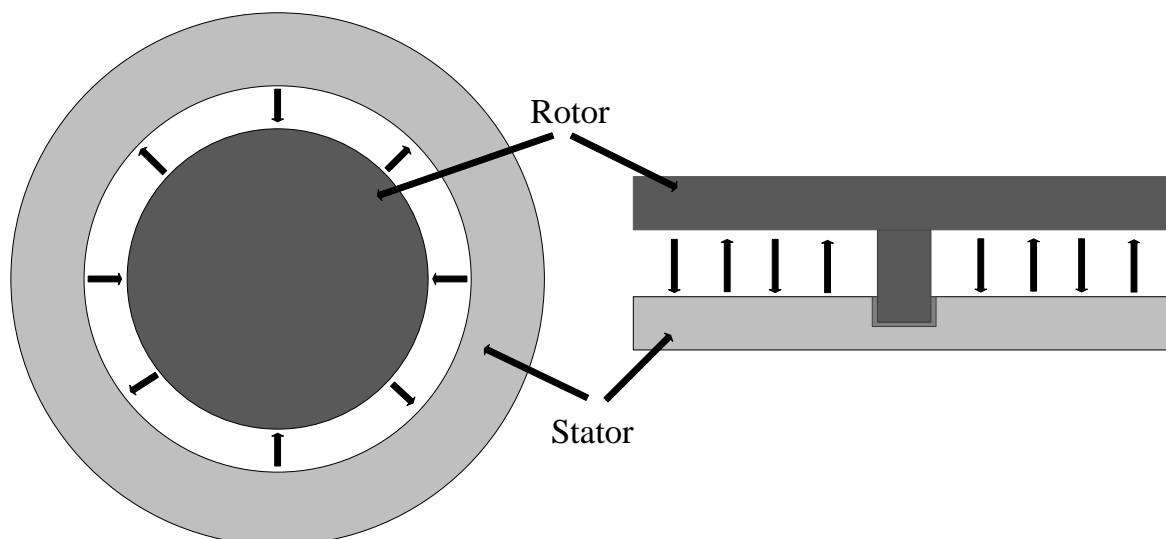
Nevýhody:

- Složitější konstrukce a technologie výroby.
- Složitější opravy oproti pohonům s asynchronními motory.
- V poruchových stavech může dojít k odbuzení permanentních magnetů.
- Stálá přítomnost magnetického pole.
- Vysoká teplotní závislost vlastností permanentních magnetů.
- Vysoká cena permanentních magnetů.
- Malá odolnost permanentních magnetů vůči korozi [3].

Výhody motorů s permanentními magnety z nich dělají výbornou volbu pro pohon elektrické formule. Především jejich účinnost, která je jedním z hlavních kritérií závodů FSE, dále také velký výkon v malém objemu a s malou hmotností, jelikož se snažíme dosáhnout co největšího poměru výkonu vůči váze.

Motory s permanentními magnety se dají rozdělit na stejnosměrné bezkomutátorové jinak řečeno BLDC motory a na synchronní motory s permanentními magnety neboli

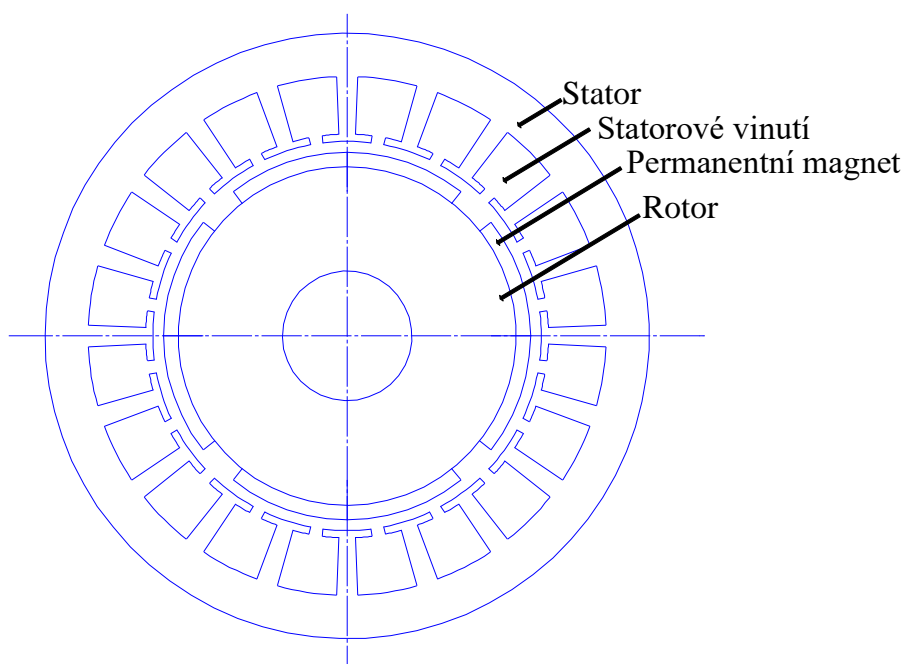
PMSM. Ty se dají dále ještě rozdělit podle toho, jak působí magnetický tok na rotor, a to na motory s radiálním tokem (RFPMSM) nebo axiálním tokem (AFPMSM).



Obr. 2.1 a) motory s radiálním tokem b) motory s axiálním tokem

2.2 Synchronního motoru s radiálním tokem

Konstrukční řešení statoru synchronního stroje s radiálním tokem je podobné jako u asynchronního motoru, rozdíl je hlavně v rotoru, kde je klecové vinutí nakrátko nahrazeno permanentními magnety. Hlavní části stroje jsou vyobrazeny na níže přiložené konstrukci (Obr. 2.2). Vnější kruh znázorňuje svazek statorových plechů, na jehož vnitřní straně jsou drážky statorového vinutí. Vnitřní kruh znázorňuje rotor, na jehož povrchu se nacházejí permanentní magnety.



Obr. 2.2 Konstrukce PMSM

2.2.1 Konstrukční provedení

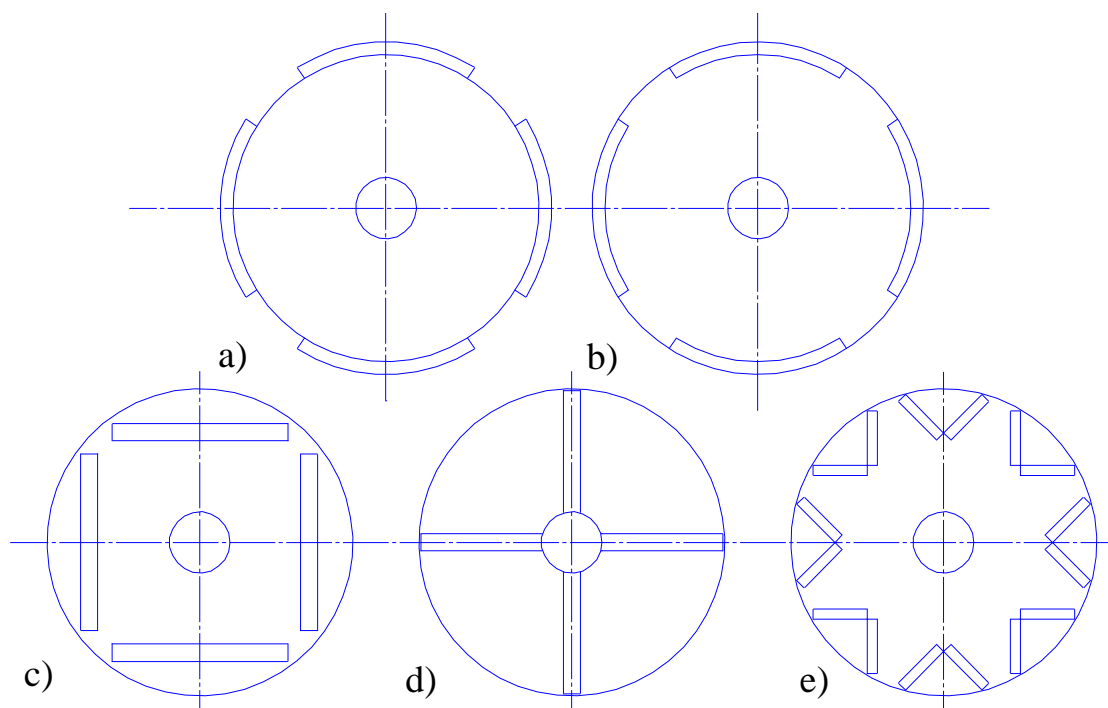
Stator je složen ze svazku vzájemně izolovaných elektrotechnický plechů o tloušťce nejčastěji 0,35 mm, 0,5 mm nebo 0,65 mm. Pokud vnější průměr rotoru přesahuje 1 m, tak se statorový svazek skládá ze segmentů. Segmenty se následně v každé následující vrstvě překládají o polovinu nebo třetinu. Statorový svazek se dále ukládá na kostru. Kostra většinou bývá svařovaná nebo odlévaná. Na kostru z každé strany dosedají ložiskové nebo krycí štíty z magneticky nevodivého materiálu. Do drážek statoru je vkládáno statorové vinutí, které je tvořeno měděnými izolovanými vodiči. Drážka je vyložena izolací, která zajišťuje dostatečnou elektrickou pevnost vůči kostře a zároveň také funguje jako mechanická ochrana proti poškození vodičů. V případě otevřených nebo polootevřených drážek je vinutí zajištěno drážkovými klíny. Pokud vinutí prochází proud, tak se vinutí zahřívá a vznikají jouleovy ztráty úměrné kvadrátu proudu a odporu vinutí. Vinutí proto může být zalito do pryskyřice, která má lepší tepelnou vodivost než vzduch a zlepšuje tak odvod ztrátového tepla [4]. Nejčastěji se používají vinutí koncentrické a postupné.

Dále je také důležitý způsob provedení čel vinutí. Čela cívky leží mimo magnetický obvod, neindukuje se do nich proto napětí a pouze spojují dvě aktivní strany cívky. Jelikož jimi prochází stejný proud jako v drážkové části, musí mít stejný průřez. Čela se průchodem proudy zahřívají, vznikají v nich ztráty a tím klesá i účinnost stroje. Kromě toho se zvyšuje množství použité mědi, prodlužuje se stroj a tím roste i cena. Proto se snažíme, aby délka čel byla minimální [5].

Na rotoru se pro vytvoření magnetického pole používají permanentní magnety na bázi vzácných zemin, nejčastěji Al-Ni-Co (hliník-nikl-kobalt), Sm-Co (samrium-kobalt) a Nd-Fe-B (neodym-železo-bor), jejichž magnetická indukce se pohybuje v rozsahu 0,8 až 1,2 T. Permanentní magnety nahrazují budící vinutí klasických synchronních strojů, čímž odpadají problémy s kluznými kontakty, přes které se budící vinutí napájí. Pro rotor jsou zde dvě hlavní skupiny konstrukčního provedení, a to motory s vnějším rotorem nebo s rotorem vnitřním. Dále se zde z konstrukčního hlediska rozlišuje, jak jsou magnety na rotoru umístěny. Toto rozmístění do značné míry ovlivňuje vlastnosti stroje. Na přiloženém obrázku (obr. 2.2) jsou znázorněny některé konstrukce rotorů s permanentními magnety, a to:

- a) magnety umístěné na povrchu rotoru
- b) magnety zapuštěné v povrchu rotoru
- c) magnety umístěné uvnitř rotoru

- d) radiálně vložené magnety
- e) dva magnety na pól v poloze V



Obr. 2.3 Různé konstrukce rotoru

Magnety umístěné na povrchu mají velkou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře, jelikož magnetický tok není ovlivňován dalším materiálem. Tato konstrukce je nejjednodušší a nejlevnější. Nevýhodou tohoto řešení je malá mechanická pevnost. Magnety zapuštěné do rotoru jsou uloženy v mělkých drážkách. Toto uspořádání má větší rozptyl magnetického toku do materiálu rotoru než u konstrukce s magnety na povrchu. Tím že jsou magnety uloženy v mělkých drážkách, tak jsou dobře chráněny proti odstředivým silám. Pokud jsou magnety uloženy uvnitř rotoru dochází ještě k většímu rozptylu než u magnetů zapuštěných v rotoru. Výhodou tohoto řešení je velká mechanická pevnost [6].

Z hlediska technologie rozlišujeme dva postupy při výrobě rotorů, a to jestli magnety zmagnetizujeme ještě před vložením a nebo až po vložením do statoru. Jednodušší variantou je zmagnetizování až po vložením do rotoru, jelikož zde není problém s magnetickými silami jako při zmagnetizování před vložením.

2.3 Synchronní motory s axiálním tokem

V motorech s axiálním tokem působí magnetický tok v axiálním směru a vinutí jsou orientována v radiálním směru. Tyto motory se vyznačují plochým diskovým tvarem, proto se můžeme setkat s označením diskové motory. Stroje s axiálním tokem mají malou délkou

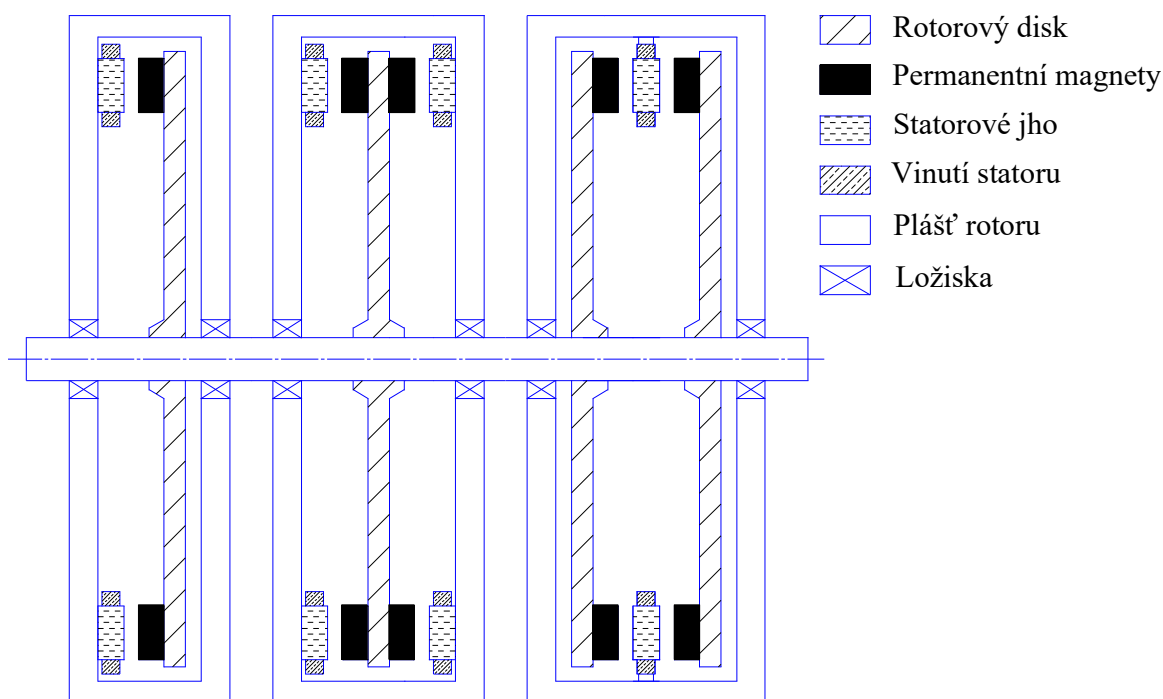
a velkým průměrem. Jejich hlavní předností je vysoký poměr výkonu k hmotnosti a vysoký moment. Konstrukce motoru umožňuje snadné nastavení vzduchové mezery. Důležitá výhoda těchto strojů je snadný přenos tepla ze statoru. To umožňuje relativně vysoké zatížení stroje. Úroveň hluku a vibrací je menší než u běžných strojů [7].

2.3.1 Konstrukční provedení

Z konstrukčního hlediska mohou být tyto motory konstruovány jako jednostranné nebo oboustranné, s nebo bez jádra statoru, s vnitřními nebo vnějšími rotory a jako jednostupňové nebo vícešupňové stroje. V případě oboustranných konfigurací může být rotor nebo stator zdvojen.

Výhodou jednostranné konstrukce stroje je jednodušší provedení oproti konstrukci oboustranné, nevýhodou je pak menší moment stroje. U oboustranné konstrukce s vnitřním rotorem je vinutí kotvy umístěno na dvou jádrech statoru a disk s permanentními magnety se otáčí mezi nimi. Vzduchová mezera je u tohoto provedení velká a je rovna dvou mezerám plus tloušťce permanentních magnetů. Vinutí statoru může být zapojeno sériově nebo paralelně. Při paralelním zapojení je motor schopen pracovat i když je jedno statorové vinutí přerušeno. Preferované je sériové vinutí, protože poskytuje stejné, ale protichůdné axiální přitažlivé síly. Oboustranný stroj s vnitřním statorem neboli stroj s dvojitým rotorem má dva disky s permanentními magnety, mezi kterými je umístěno vinutí. Vinutí je navinuto na stator, který je buď ze spojitých ocelových pásků nebo ze slinutých prášků. Celková vzduchová mezera je rovna tloušťce vinutí statoru s izolací, mechanické vůli a tloušťce permanentních magnetů. Výhodou této konstrukce je vysoký moment při nízkých otáčkách. Vhodnějším řešením pro velké točivé momenty jsou dvojité nebo trojitě kotoučové motory, jelikož jsme omezeni limitujícími faktory jednoho disku, mezi které patří maximální axiální síla na ložiska, tuhost disku a mechanická soudržnost mezi diskem a hřídeli [7]. Na přiloženém obrázku (obr. 2.4) jsou tyto nejpoužívanější konstrukce znázorněny.

- a) jednostranná konstrukce
- b) oboustranná konstrukce s vnitřním rotorem
- c) oboustranná konstrukce s vnitřním statorem



Obr. 2.4 Základní topologie axiálních motorů

Jak již bylo řečeno stator těchto motorů má několik konstrukčních řešení. Stator bubnového typu se používá v oboustranné konstrukci s vnitřním státorem. Cívky jsou namotány na magnetickém jádře, které může být buď hladké nebo s drážkami. Tyto cívky jsou rovnoměrně rozloženy podél statorového jádra. Výhodou bubnového jádra jsou krátká spojení mezi cívkami, jednoduché statorové jádro a snadný návrh libovolného počtu fází.

Při použití konstrukce bez statorového jádra je vinutí tvořeno lichoběžníkově tvarovanými cívkami namotnými na nemagnetický materiál a jsou zality epoxidovou pryskyřicí, aby se zvýšila robustnost a zlepšil se přenos tepla. Tato konfigurace má výhodu v tom, že hysteretní ztráty a ztráty vířivými proudy jsou nulové vlivem absence železa na statoru. Dále také eliminuje axiální magnetické přitažlivé síly mezi státorem a rotorem při nulovém proudu. Nevýhoda absence železa je, že magnetický tok nemá být kudy veden, a to má za následek vysoký rozptylový tok. Je to způsobeno tím, že relativní permeabilita mědi, vzduchu a permanentních magnetů je téměř jedna. Takto řešené statory se používají u oboustranné konstrukce s vnitřním rotorem.

Dalším konstrukčním provedením je stator skládaný ze segmentů. Vinutí statoru je složeno z řady cívek s oddělenými feromagnetickými jádry. Výhodou tohoto uspořádání je snadné navíjení cívek. Nevýhodou je pak požadavek na přesnost sestavení a vycentrování statoru [7].

2.4 BLDC motory

BLDC motory jsou speciálním typem synchronních motorů. Rozdíl mezi BLDC motory a synchronními motory s radiálním tokem je ve způsobu řízení a napájecím napětí, které je u těchto strojů stejnosměrné. BLDC motory se vyrábí v jednofázovém, dvoufázovém a třífázovém provedení. Třífázové motory jsou nejpoužívanější a dále se budu zabývat pouze touto variantou.

2.4.1 Konstrukční provedení

Stator BLDC motoru se skládá z ocelových plechů s drážkami, ve kterých je umístěno vinutí. Stator je podobný jako u synchronních strojů s radiálním tokem, rozdíl je v jiném rozložení cívek v drážkách. V jedné drážce může být jedna nebo více cívek, které jsou propojeny tak, aby vytvořily vinutí. Každé z těchto vinutí je rozloženo po statoru, aby vytvořily sudý počet pólů. Vinutí bývá ve většině případů zapojeno do hvězdy. V motoru jsou navíc zabudovány Hallovy sondy, pomocí kterých se určuje poloha rotoru, která je důležitá pro řízení motoru [8].

Rotor BLDC motorů je totožný s rotory synchronních strojů s radiálním tokem.

3 Chlazení elektrických strojů

Způsoby chlazení elektrických strojů se dají rozdělit podle několika parametrů. Nejobecněji lze chlazení rozdělit na chlazení pasivní a chlazení aktivní:

- U pasivního chlazení teplo samovolně předává svojí energii okolnímu vzduchu. Tento způsob chlazení je velmi jednoduchý a nepotřebuje žádnou další energii pro odběr tepla. Nevýhodou tohoto druhu chlazení je malý odebíraný výkon ze zařízení, proto se dá použít pouze pro stroje malých výkonů.
- Aktivní chlazení je prováděno nucenou cirkulací chladícího média, kterou zajišťuje například ventilátor nebo čerpadlo. Nevýhodou tohoto způsobu je výkon, který je potřeba pro zajištění cirkulace a složitější provedení. Aktivní chlazení má mnohem lepší účinnost, a proto je vhodné pro chlazení strojů vyšších výkonů.

Aktivní chlazení můžeme dále rozdělit podle chladícího média na:

- Chlazení vzduchem
- Chlazení kapalinou
- Jiné způsoby chlazení [9].

3.1 Chlazení vzduchem

Chlazení vzduchem se u motorů pro elektro formule nepoužívají, proto se o nich zmíním jen stručně. Chlazení vzduchem lze rozdělit podle provedení stroje na otevřené a uzavřené:

- U otevřeného provedení do stroje vstupuje okolní vzduch, který ochladí stroj a ohřátý ho opustí. Výhodou tohoto provedení je jednoduchost. Nevýhodou je zanášení motoru nečistotami z nasávaného vzduchu.
- U uzavřeného provedení vzduch cirkuluje uvnitř stroje a předává teplo chladnějším částem stroje, například kostře, která může být dále chlazená.

Aktivní chlazení se dále dělí podle umístění ventilátoru na tlačné nebo sací uspořádání:

- U tlačného uspořádání je ventilátor umístěn na vstupu do stroje. Do stroje vstupuje rozvířený vzduch, který může zlepšit účinnost chlazení.
- U sacího uspořádání je ventilátor umístěn na výstupu stroje [9].
-

3.2 Chlazení kapalinou

Chlazení kapalinou se používá vesměs jen v uzavřeném provedení. To zajišťuje stálé množství chladicího média v chladícím okruhu. Přední výhodou tohoto chlazení je vysoká tepelná kapacita používaných kapalin, což znamená že dokáží pojmout větší teplo. Další výhodou je lepší přestup tepla mezi chlazeným objektem a chladícím médiem.

Chlazení kapalinou lze rozdělit na několik druhů podle použitého média. U elektrických strojů se nejčastěji setkáme s použitím vody nebo oleje. S vodním chlazením se setkáme ve většině případů, protože oleje v porovnání s vodou mají řadu nevýhod, mezi které patří nižší tepelná kapacita, hořlavost, ekologická nebezpečnost a vyšší nákladnost. Výhodou olejů jsou pak dobré elektroizolační vlastnosti [9].

3.3 Vodní chlazení

Vodní chlazení je velice rozšířených a účinným způsobem chlazení především u točivých strojů. Jak již bylo řečeno voda má vysokou tepelnou kapacitu a vysoký součinitel přestupu tepla. Součinitel přestupu tepla je až padesátkrát větší než u vzduchu. Voda je schopna díky vysoké tepelné kapacitě pojmout velké množství tepla i při malém průtoku. Na chlazení stroje má nezanedbatelný vliv rychlost proudění vody. Čím rychleji voda strojem proudí, tím je chlazení intenzivnější. U rychlosti proudění vody jsme omezeni hydraulickými ztrátami. Další vlastnost související s vysokou tepelnou kapacitou je malý rozdíl mezi teplotami vody na vstupu a výstupu, který se pohybuje v řádu jednotek stupňů. Voda použitá jako chladící médium musí být elektricky nevodivá, aby nedošlo ke zkratu mezi závity nebo mezi kostrou a cívkami. Použitá voda je destilovaná a demineralizovaná. Vodní chlazení má celou řadu výhod, ale setkáme se zde i s několika nevýhodami:

Výhody:

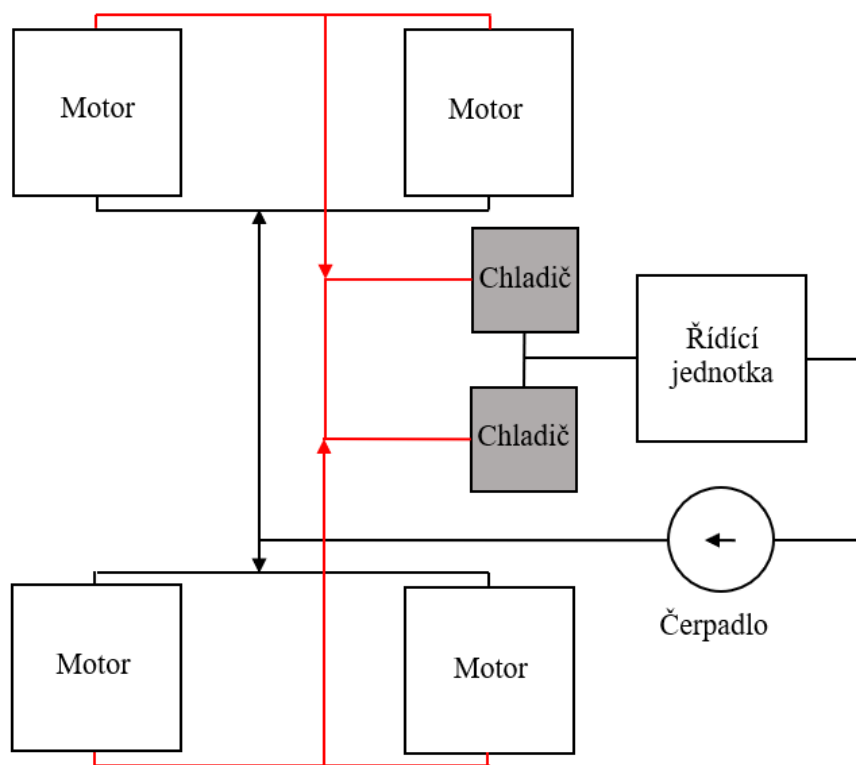
- Vyrovnané teplotní pole bez přehřátých míst.
- Nízké teploty chlazených částí a vysoká účinnost.
- Menší nároky na rozměry.
- Nižší příkon čerpadla zajišťující cirkulaci vody v porovnání s ventilátorem.

Nevýhody:

- Složitější konstrukce a vyšší náklady.
- Horší odvod tepla z částí, které nejsou v přímém kontaktu s vodním okruhem, jako například čela vinutí a rotor, který musí být chlazený vzduchem.
- Vyšší nároky na kontrolu vodního okruhu a kvality vody [9].

3.4 Provedení vodního chlazení u synchronních motorů s permanentními magnety

Pro chlazení motorů elektro formulí se používá výhradně vodní chlazení. Chladicí okruh se mimo chlazení motorů využívá i na chlazení výkonové elektroniky formule. Na přiloženém obrázku (obr. 3.1) je znázorněný chladicí okruh.



Obr. 3.1 Chladicí okruh

Chladicí voda nejprve prochází řídicí jednotkou, do motorů vstupuje voda, jejíž teplota je ovlivněna ztrátami měniče. Chladicí obvod je doplněn čerpadlem. Můžeme se setkat i s dvouokruhovými systémy, kdy jsou použity dva samostatné okruhy každý s vlastním čerpadlem. Nevýhodou tohoto systému je dvojnásobná spotřeba energie. Výhodou je jednodušší chladicí obvod.

Vodní těleso pro chlazení je téměř vždy vyrobeno z kovů, protože mají dobrou tepelnou vodivost a mechanické vlastnosti. Z důvodů tendence kovů korodovat se nejčastěji pro výrobu vodních těles používá měď, nerezové oceli nebo slitiny hliníku [9].

3.4.1 Chlazení synchronních motorů s radiálním tokem

Synchronní motory s permanentními magnety mají na rotoru místo budícího vinutí permanentní magnety. V rotoru tedy nevnikají velké ztráty. Proto se u tohoto typu strojů

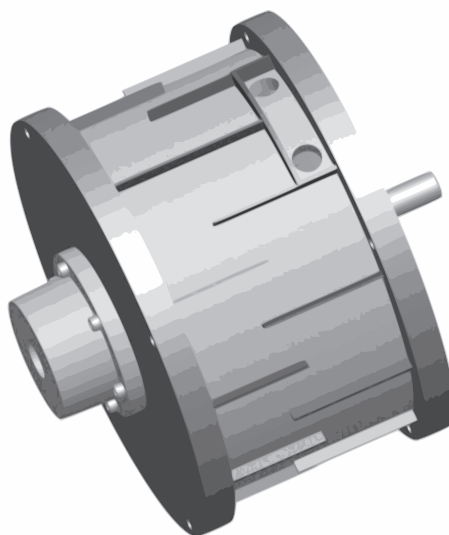
nejčastěji setkáme s chladícím tělesem umístěným na plášti statoru a se vzduchem chlazeným rotorem. Existují i další možnosti provedení vodního chlazení jako například chladicí drážky ve jhu statoru nebo chladicí drážky přímo v drážkách statorového vinutí. Vzhledem k malým rozměrům používaných strojů nejsou tyto možnosti příliš vhodné.

Nejčastěji se s vodní chlazení pláště vyskytuje v těchto variantách:

- Vodní těleso v meziválcovém prostoru mezi státorem a kostrou stroje.
- Vodní těleso v meziválcovém prostoru rozdělené přepážkami.
- Vodní těleso ve tvaru šroubovice [9].

Při použití systému s vodním tělesem v meziválcovém prostoru je stator obklopen vodním pláštěm z jednoho celku. Vstup chladicí vody je opatřen difuzérem pro zlepšení proudění vody. Výhodou tohoto systému je jednoduchost a velká styčná plocha mezi chladícím pláštěm a státorem. Nevýhodou je nerovnoměrné proudění vody v různých místech pláště.

Chlazení s tělesem v meziválcovém prostoru, které je rozděleno přepážkami (obr. 3.2) zajišťuje lepší proudění vody a lepší rovnoměrnost teplot v různých místech. Chladicí plášť bývá opatřen pouze jedním vstupem a jedním výstupem, které jsou umístěny blízko sebe. Nevýhodou tohoto systému je složitost [10].



Obr. 3.2 Vodní plášť s přepážkami [10]

Chlazení s použitím šroubovitého chladicího pláště je vhodné (stejně jako předchozí uvedené způsoby) použít pro menší stroje, u kterých může být plášť jednoduše nalisován na

stator. Tento způsob chlazení zajišťuje nejrovnoměrnější proudění kapaliny. Nevýhodou této konstrukce je náročnost výroby pláště [9].

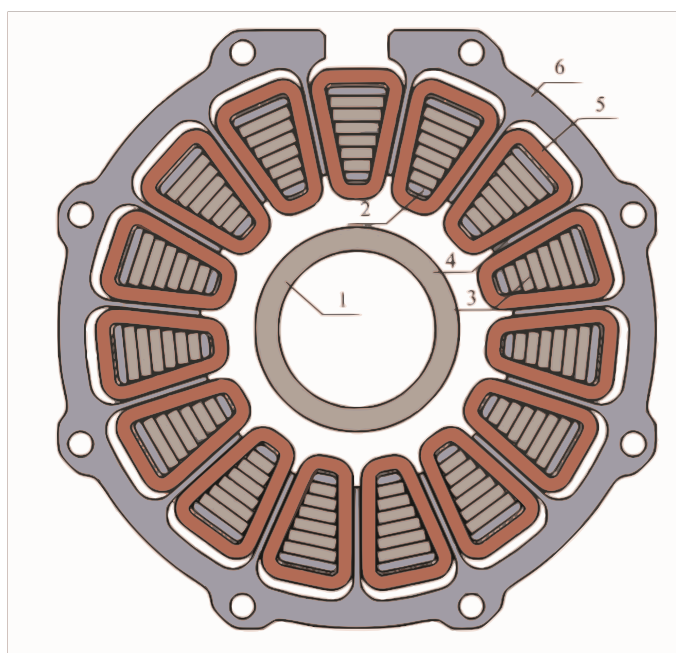
3.4.2 Chlazení synchronních motorů s radiálním tokem

Chlazení synchronních motorů s axiálním tokem se výrazně odvíjí od použité konstrukce stroje. Chlazení těchto motorů lze rozdělit na chlazení pro stroje se statorovým jhem, stroje bez magnetického obvodu a stroje se statorem složeným ze segmentů. V následujícím textu jsou popsány některé varianty způsobu chlazení těchto strojů.

U motorů, které mají cívky namotané na statorovém jhu, může být chlazení realizováno plochým prstencovým pláštěm vsazeným mezi dvě poloviny statorového paketu. Vodní plášť je uprostřed statoru. Tento způsob chlazení je jednoduchý a velice účinný.

Při požití konstrukce motoru se statorem bez magnetického obvodu je využita absence magnetického obvodu a chladicí těleso je umístěno uvnitř cívek, které jsou namotány na nosné konstrukci a jsou zality epoxidem. Chladicí okruh je tedy v přímém kontaktu s vnitřní stranou cívek. Toto chlazení je použito u motorů v oboustranném provedení s vnitřním statorem. Chladicí okruh je vyveden pomocí pevné hřídele. Výhodou tohoto provedení je přímý kontakt chladicího okruhu s vinutím. To zaručuje vysokou účinnost systému [9].

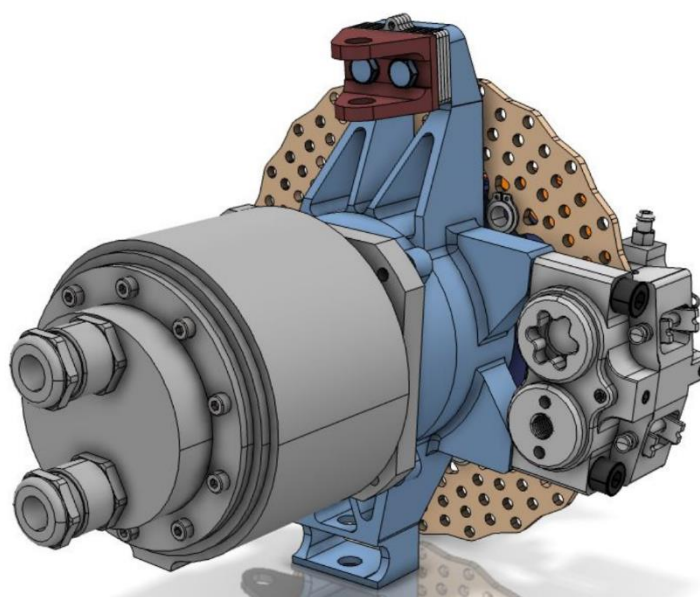
U provedení motoru se skládaným statorem ze segmentů lze využít malé mezery mezi jednotlivými segmenty. Jednotlivé segmenty jsou uloženy na vrstvené kostře prstencového profilu s výběžky, které jsou v přímém kontaktu s vinutím segmentů (obr. 3.3). Kostra je na svém povrchu opatřena válcovým chladicím tělesem, kterým proudí voda [11].



Obr. 3.3 Řez motoru se statorem složeným ze segmentů. (1) ložisko, (2) plastová deska konce vinutí, (3) jádro segmentu, (4) výběžek pro odvod tepla, (5) vinutí, (6) kostra statoru [11]

4 Používané převodovky pro E formuli

Používané motory pro elektro formule jsou stroje s vysokými otáčkami. Jelikož se maximální rychlost formule pohybuje v okolí 120 km/h je nutné použít pro tyto motory převodovku, která otáčky sníží a zároveň zvýší moment. U elektro formulí se používají téměř výhradně dva druhy převodovek. Nejčastěji se setkáme s použitím planetové převodovky, která se používá v případě použití dvou nebo čtyř motorů. Druhým používaným převodem je řetězový převod. Ten je použit v případě jednoho motoru. Na přiloženém obrázku (obr. 4.1) je vyobrazen model konstrukce motoru s integrovanou planetovou převodovkou a kotoučovou brzdou. Celý tento systém je uložen v náboji kola.



Obr. 4.1 Model motoru s integrovanou planetovou převodovkou a kotoučovou brzdou [12]

4.1 Planetová převodovka

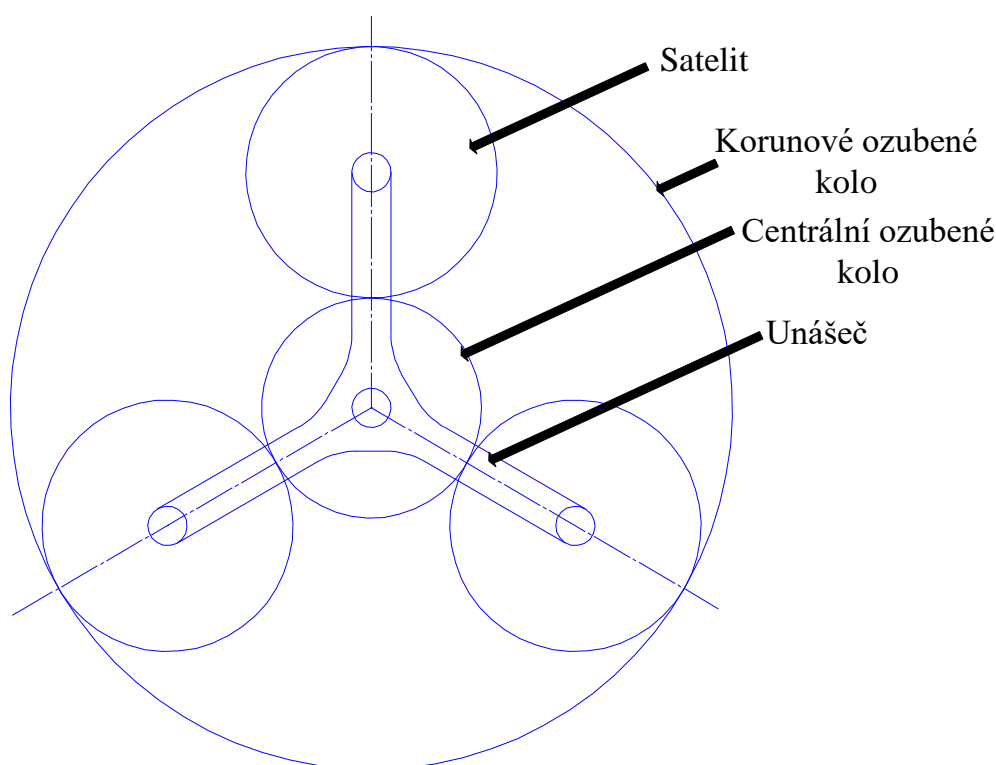
Soukolí planetové převodovky je tvořeno několika ozubenými koly a unášečem satelitů. Centrální ozubené kolo je souosé s unášečem satelitů, korunovým kolem a centrální osou převodu. Mezi centrálním a korunovým kolem jsou uložena ozubená kola neboli satelity, které jsou připojeny na unášeč satelitů. Satelity jsou v záběru s centrálním ozubeným kolem. Planetová převodovka může pracovat v různých převodových stupních. Může být poháněno centrální ozubené kolo nebo unášeč a zabrzděna nebo spojena příslušná kola. Planetová převodovka je nejpoužívanější převod u elektro formulí především kvůli celé řadě výhod, mezi které patří:

- Malé rozměry a malá hmotnost
- Vysoká účinnost i při vysokých přenášených výkonech
- Dlouhá živostnost

- Nízké zatížení ložisek a ozubených kol [13].

Na přiloženém obrázku (obr. 3.2) je znázorněn zjednodušený model planetové převodovky.

Planetová převodovka používaná v náboji kola elektro formule je navržena jako převod do pomala. Kroutící moment je přiváděn na centrální ozubené kolo, které je spojeno s hřídelí motoru. Korunové kolo je zabrzděno. Satelity se odvalují po vnitřním ozubení korunového kola. Kroutící moment je odebírán z unášeče satelitů.



Obr. 4.2 Zjednodušený model planetové převodovky

4.2 Řetězový převod

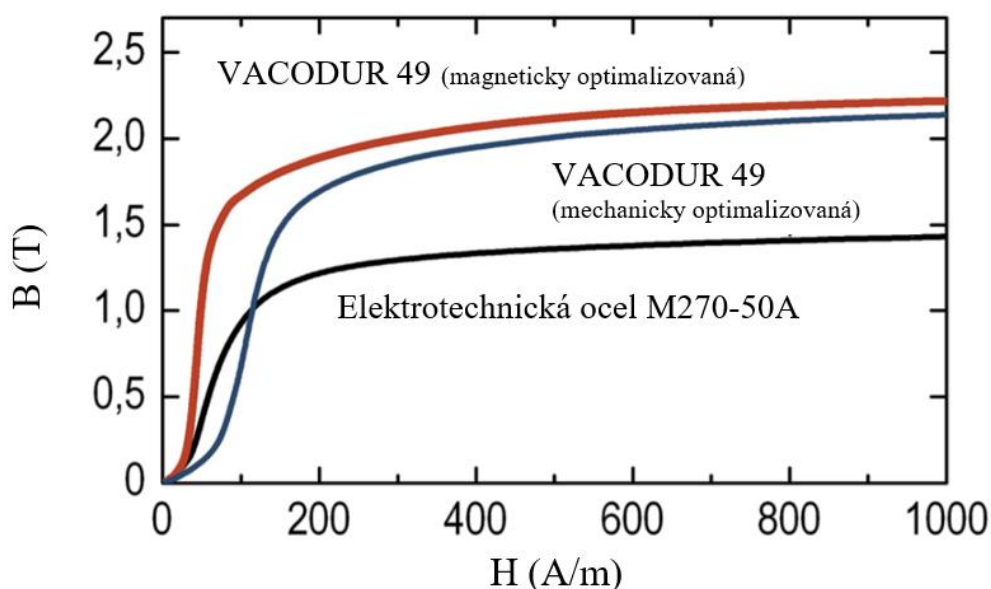
Řetězový převod je tvořen dvěma ozubenými koly a řetězem. Točivý moment je přenášán mezi hnanou řetězkou a hnací řetězkou pomocí řetězu, který je ve tvarovém styku s těmito ozubenými koly. Pomocí jednoduchého řetězu je možné přenášet výkon až 200 kW. Řetězový převod se u elektro formulí používá pouze při použití jednoho motoru, což není moc časté řešení. Tento převod se příliš nevyužívá kvůli řadě negativních vlastností:

- Převod je choulostivý na přesnou montáž
- Vysoká hlučnost
- Vysoká cena [14].

5 Vybrané motory

5.1 AMK servomotory

Motory od AMK Group jsou mezi týmy Formula Student Electric velmi oblíbené a používá je velké množství týmů. Jedná se o synchronní motory s radiálním tokem. AMK spolupracuje s firmou Vacuumschmelze, která je lídrem ve výrobě pokročilých magnetických materiálů. Tato firma vyvinula slitinu kobaltu a železa s názvem VACODUR, které má výrazně vyšší hodnotu magnetické indukce než klasická elektrotechnická ocel (viz obr. 3.1). Tyto slitiny byly vyvinuty pro letecký a kosmický průmysl, nyní se běžně využívají v aplikacích pro automatizaci a motoristické sporty. Díky použití těchto materiálů mají motory od AMK vysoký poměr výkonu a hmotnosti [15].



Obr. 5.1 Porovnání magnetizačních křivek VACODUR a elektrotechnické oceli [15]

5.1.1 AMK DD5-14-10-POW

Série motorů AMK DD se vyznačuje vysokým točivým momentem, malým momentem setrvačnosti, velmi vysokou účinností a vysokou dynamikou. Pokročilé materiály a desing motoru v kombinaci s inovativním konceptem chlazení zajišťují dlouhou životnost. Motory řady DD jsou dostupné s vodním i vzduchovým chlazením a ve variantě připojení jednoho kabelu nebo ve verzi kde jsou kabely pro napájení a pro data odděleny. Vyrábějí se ve dvou velikostech, a to DD5 a DD7. Varianta DD5 je vyráběna do maximálního momentu 67 Nm. Varianta DD7 má maximální moment 171 Nm.

Model AMK-DD5-14-10-POW je schopen vyvinout stacionární moment 14 Nm, jedná se o 10 pólový stroj s jedno kabelovým připojením a s vodním chlazením. Konektory jsou vyvedeny na zadní straně, aby se dosáhlo co nejmenšího průměru a motor se lépe vešel do náboje kola. Motor je přírubový s jedním drážkovaným koncem hřídele, která je vyvedena vodorovně. Krytí motoru je IP 65. Jmenovitý výkon stroje je 12,3 kW, jmenovitý moment je 9,8 Nm a jmenovité otáčky jsou 120000 ot/min. Jmenovité napětí motoru je 350 V a jmenovitý proud je 41 A. Motor lze připojit i na vyšší napětí než jmenovité, čímž lze zajistit nižší pokles momentu a výkonu při otáčkách, které jsou vyšší než jmenovité. Motor je schopen dosáhnou maximálních otáček 20000 ot/min a maximálního momentu 21 Nm po dobu 1,24 s, při kterém odebírá maximální proud 105 A. V motoru je zabudované termistorové čidlo teploty KTY84. Motor je velice lehký, váží pouze 3,55 kg, jeho průměr je 115 mm a délka je 111 mm. Chlazení motoru je v provedení s vodním tělesem v meziválcovém prostoru mezi kostrou stroje a statorovým paketem.



Obr. 5.2 Servomotor AMK DD5 [15]

5.1.2 AMK DT5-14-10-POW

Motory řady AMK DT jsou velmi variabilní, vyrábí se ve výkonovém rozmezí od 280 W do 25 kW s momentem od 0,5 Nm do 220 Nm. V porovnání s řadou DD je řada DT zaměřena více na velikost momentu motoru, kdežto řada DD je zaměřena více na dynamiku. Tyto motory jsou podobně jako předchozí zmiňované vyrobené z pokročilých materiálů, nabízí možnost, jak vzduchového, tak i vodního chlazení a připojení pomocí jednoho nebo více kabelů. Mezi hlavní výhody, které výrobce uvádí patří vysoká dynamika díky malému momentu setrvačnosti, vysoká hustota výkonu díky vysokému počtu pólů a optimalizované geometrii statorových plechů a vysoké výkonové přetížení. Motor je téměř bezúdržbový,

velmi spolehlivý s dlouhou životností. Konstrukce je velmi flexibilní, nabízí montáž ve všech polohách díky kompaktnímu zapouzdření a otočným konektorům.

Motor je v provedení s 10 póly, jeho jmenovitý moment je 8,4 Nm a jmenovité otáčky jsou 14000 ot/min. Motor je schopen vyvinout maximální moment 21 Nm, maximální otáčky motoru jsou 20000 ot/min a maximální výkon je 32 kW. Konektory motoru jsou vyvedeny v zadní části pro zmenšení průměru. Chlazení motoru je zajištěno vodním tělesem v meziválcovém prostoru mezi statorovým paketem a kostrou stroje.

5.2 Fischer Elektromotoren

Firma Fischer Elektromotoren se specializuje na výrobu lineárních a rotačních pohonů. Nabízí pohony sériové výroby, případně i možnosti pohonů na zakázku, které jsou vyvíjeny ve výpočetním programu FEM a navrhovány ve 3D CAD programech. To umožňuje optimalizovat geometrii a parametry pohonu přímo na danou aplikaci [16].



Obr. 5.3 Fischer elektromotor [16]

5.2.1 Fischer TI85-052-070

Motory Fischer se vyrábí ve velkém rozpětí jmenovitých výkonů od jednotek wattů do desítek kilowattů s průměrem statoru od 38 mm do 530 mm. Model Fischer TI85 je z řady motorů s vnitřním rotorem s průměrem statoru 85 mm. Motor je napájen stejnosměrně, jedná se tedy o BLDC motor. Délka stroje je 108 mm, z toho je 70 mm délka statorového

paketu. Maximální výkon motoru je 29,9 kW, maximální otáčky jsou 16000 ot/min a maximální moment je 29,3 Nm. Jmenovitý moment motoru je 14,8 Nm. Motor má vodní chlazení, které je zajištěno vodním tělesem ve tvaru šroubovice.

5.3 EMRAX

EMRAX vyrábí synchronní motory s axiálním tokem, které patří do skupiny motorů s nejlepší hustotou výkonu na trhu. Hustota výkonu dosahuje až 10 kW/kg. Motory jsou velice spolehlivé. Původně byly vyvinuty pro letecký průmysl, ve kterém jsou nejpřísnější pravidla zaměřující se hlavně na bezpečnost a spolehlivost. Motory nabízí vysoký výkon i při relativně nízkých otáčkách díky vysokému točivému momentu. Mechanické a elektrické ztráty jsou velice malým, takže motor může pracovat při vysokých rychlostech, při kterých lze dosáhnout vysokého výkonu. Motory EMRAX využívají méně materiálu efektivněji, aby poskytovaly vyšší výkonovou hustotu než jakýkoli srovnatelný motor nebo generátor. Motory EMRAX mají široké uplatnění, používají se v aplikacích od letectví, po hluboké moře, těžká nákladní vozidla, automobily až po závodní vozidla [17].

5.3.1 Emrax 208

Motor Emrax 208 je možné napájet pomocí různých napětí. Napětí, na které je motor připojen, ovlivňuje otáčky motoru a odebíraný proud. Motor s označením High voltage (HV) má jmenovité napětí 470 V. Jmenovité otáčky při plném zatížení jsou 5170 ot/min, maximální otáčky mají hodnotu 7050 ot/min. Motor může odebírat maximálním proudem 200 A po dobu dvou minut, jmenovitý proud motoru je 100 A. Další možností, napájení s jmenovitou hodnotou napětí 320 V, je napájení s označením Medium voltage (MV). U této možnosti je jmenovitý proud motoru 160 A, maximální proud je pak 320 A. Motor je schopen vyvinout při zatížení 5760 ot/min a maximální otáčky jsou 7040 ot/min. Třetí možností je napájení s jmenovitým napětím 125 V označené jako Low voltage (LV). Při tomto napájení jsou otáčky motoru při zatížení největší, a to 6250 ot/min, maximální rychlost je 7250 ot/min. Jmenovitý proud motoru při této možnosti napájení je 400 A, maximální proud je 800 A. Nejčastěji se používá varianta s napětím 470 V a 320 V.

Výkon tohoto motoru se pohybuje v rozmezí 20-32 kW v závislosti na otáčkách. Maximální krátkodobý výkon motoru je 75 kW. Motor je schopen vyvinout maximální moment s hodnotou 140 Nm, jmenovitý moment motoru je 80 Nm. Účinnost motoru je vysoká a pohybuje se v rozmezí 92-97%. Tento typ stroje má průměr 208 mm a délku 85 mm, jedná se tedy o krátký stroj s větším průměrem. Vinutí stroje je zapojeno do hvězdy. Počet

pólů motoru je 10. Motor je vyráběn ve třech konstrukčních provedení s ohledem na chlazení, a to motor chlazený vzduchem, motor s vodním chlazením a motor s kombinovaným chlazením. Váha stroje se pohybuje okolo 9 kg v závislosti na použitém chlazení. Krytí se také odvíjí od použitého chlazení, motory chlazené vodou mají krytí IP65, motory se vzduchovým a kombinovaným chlazením mají krytí IP21. Motor má zabudované čidlo pro měření teploty statorového vinutí. Provedení motorů je oboustranné s vnitřním státorem.



Obr. 5.4 Emrax 228 [17]

5.3.2 Emrax 228

U tohoto motoru jsou také tři možnosti napájení. Možnost označená HV má jmenovité napětí 670 V, jmenovité otáčky při zatížení 5300 ot/min, maximální otáčky 6500 ot/min. Jmenovitý proud motoru je 115 A, maximální proud odebíraný motorem je 240 A. Při napájení motoru s označením HV je jmenovité napětí motoru 470 V, jmenovité otáčky 5170 ot/min a maximální otáčky 6500 ot/min. Maximální odebíraný proud motorem je 340 A, jmenovitý proud je 160 A. U poslední možnosti s označením LV je jmenovité napětí 130 V, jmenovité otáčky 4400 ot/min a maximální otáčky 5200 ot/min. Motor odebírá jmenovitý proud 450 A, maximální proud, který může odebírat je 900 A. Nejčastěji se používá varianta s napájecím napětím 470 V.

Motor je schopný krátkodobě dodávat výkon 100 kW, jmenovitý výkon se pohybuje v rozmezí 28-42 kW v závislosti na otáčkách. Maximální moment motoru je 230 Nm, jmenovitý moment je 120 Nm. Účinnost je stejná jako u předchozí varianty motoru a pohybuje se v rozmezí 92-97%. Průměr stroje je 228 mm a jeho délka je 86 mm. Váha motoru je přibližně 12 kg, opět v závislosti na způsobu chlazení. Provedení motoru, zapojení vinutí, počet pólů, krytí a možnosti chlazení jsou stejné jako u motoru Emrax 208.

5.4 Magnax

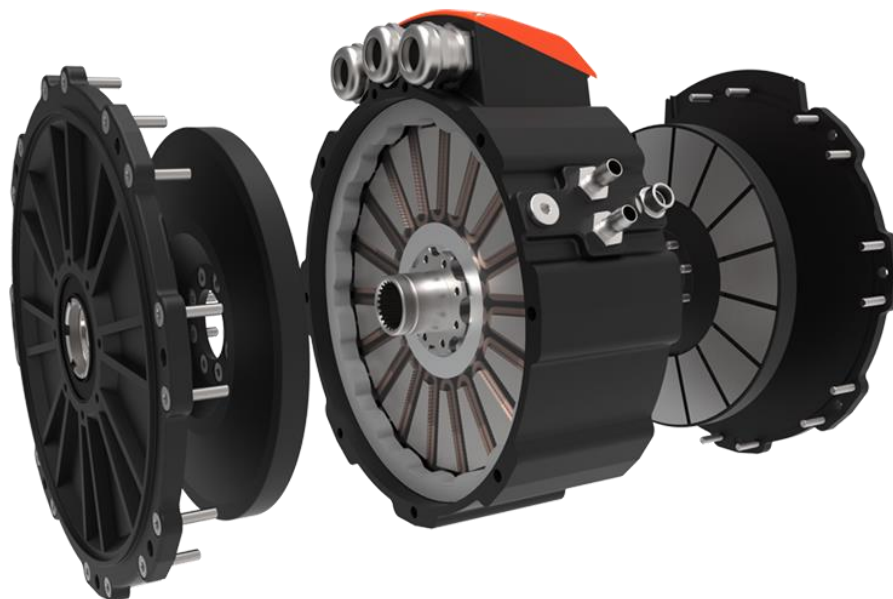
Firma Magnax vyrábí kompaktní přizpůsobivé synchronní motory s axiálním tokem založené na technologii Magnax Yokeless Axial Flux. Motory vynikají vysokou výkonovou hustotou (až 15 kW/kg). Motory se vyrábí ve velkém rozmezí výkonů od jednotek wattů až do 500 kW a s otáčkovým rozsahem až 18000 ot/min. Motory se dají napájet ve velkém rozsahu napětí, a to od 48 V do 800 V. Tento typ strojů má velké uplatnění, ať už jako pohonná jednotka celé nápravy, použití v hybridním systému nebo jako motor uložený v náboji kola.

Motory Magnax se vyrábí v oboustranném provedení s vnitřním statorem. Toto uspořádání umožňuje nejvyšší možný poměr momentu a hmotnosti. Stator složený ze segmentů umožňuje krátkou cestu magnetického toku. Absence statorového jha snižuje ztráty v železe. Na segmentech jsou namotány cívky z měděného drátu obdélníkového průřezu pro co nejvyšší možné využití mědi. Cívky jsou namotány koncentricky, tak aby byly co nejmenší ztráty v mědi. Segmenty jsou z vysoce kvalitní orientované elektrotechnické oceli, která snižuje ztráty až o 85%. Motory mají patentovaný způsob vodního chlazení, který zajišťuje nízkou teplotu statoru. Celý výrobní proces je založen na nenákladné a nenáročné technologii [18].

5.4.1 Magnax AXF225

Motor Magmax AXF225 se vyznačuje vysokou účinností díky konstrukci bez statorového jha, kvalitní elektrotechnické oceli a vhodném tvaru statorového vinutí. Ta dosahuje hodnoty téměř 97%. Vysoká účinnost má za výsledek ušetření až 10% energie při napájení z baterií. Maximální otáčky motoru jsou 14000 ot/min. Motor je schopný vyprodukovat moment o hodnotě 250-280 Nm. Maximální výkon motoru je 220 kW. Motor váží přibližně 13 kg a jeho výkonová hustota dosahuje téměř 17 kW/kg. Chlazení motoru je zajištěno kombinací vodního chlazení statoru a vzduchového chlazení rotoru. Segmenty

statoru jsou uloženy na kostře s výběžky, které jsou v přímém kontaktu s vinutím statoru. Na kostru je dále aplikováno vodní těleso válcového profilu.



Obr. 5.5 Motor Magnax v provedení s dvojitým rotorem [18]

5.5 Yasa

Motory Yasa jsou synchronní motory s axiálním tokem založené na segmentové konstrukci bez statorového jha. Stator se skládá ze segmentů, na kterých jsou namotány cívky. Toto uspořádání je ideální pro sériovou výrobu s minimálními nároky na technologii. Segmentový design je ve srovnání s drážkovými provedeními motorů daleko méně nákladný a technologicky jednodušší. Při konstrukci motoru je použito méně materiálů, jako měď, železo a permanentní magnety než u běžných motorů. To má za výsledek výrazně nižší náklady na materiály. Topologie motorů Yasa se ideálně hodí pro sériovou výrobu, protože nabízí levné, malé motory s velkou výkonovou hustotou. Motory Yasa nabízí vysoký moment i při relativně nízkých rychlostech a jejich výkonová hustota je porovnatelná se stojí od výrobců Emrax a Magnax. Tyto motory jsou ideální pro použití v elektrické trakci a jako pohony do hybridních systémů [19].

5.5.1 Yasa 750 R

Motor Yasa 750 R je vyvinut z jeho osvědčené předchozí verze Yasa 750 a nabízí lepší mechanickou pevnost a tuhost konstrukce, která umožňuje snadnější instalaci. Yasa 750 R je motor s nižší jmenovitou rychlostí, vysokým točivým momentem a vysokou hustotou

výkonu. Motor nabízí maximální točivý moment 790 Nm, maximální výkon až 200 kW, rozsah otáček 3250 ot/min a to vše v axiální délce 98 mm. Motor váží přibližně 37 kg a jeho průměr je 368 mm. Motor je schopný dodávat trvalý výkon 70 kW a jeho napájecí napětí je 350 V. Účinnost stroje se pohybuje nad 95%. V motoru je použito vodní chlazení s vodním tělesem umístěným na nosné kostře segmentů. Kostra je tvořena plechy s výběžky, které jsou v přímém kontaktu s vinutím. [19].



Obr. 5.6 YASA 750 R [19]

5.6 Siemens 1FE1

Motory Siemens 1FE1 jsou synchronní motory s permanentními magnety s vnitřním rotorem a jsou chlazené vodou. Motory této řady nabízí až o 60% vyšší točivý moment oproti asynchronním motorům, a to ve stejném objemu. Mají lepší dynamické vlastnosti a při stejném zatížení mají nižší nároky na chlazení. V rozsahu otáček až do 200% jmenovitých otáček generuje synchronní motor výrazně nižší ztráty v rotoru než srovnatelný asynchronní motor. To znamená, že teplota ložisek a rotoru je nižší a použitý materiál nemá takovou tendenci expandovat. Motory lze přizpůsobit širokému spektru aplikací. Čtyřpólová varianta je zvláště vhodná pro aplikace s vysokými rychlostmi. Varianty šesti a osmipólové jsou vhodné tam, kde je potřeba vysoký kroutící moment. Motory se vyrábí v rozsahu otáček až do 40000 ot/min a v rozsahu maximálního momentu až do 820 Nm [20].

5.6.1 Siemens 1FE1082-6WP

Tento motor je z řady 1FE1, motor je tedy v provedení s vodním chlazením. Chlazení je zajištěno vodním tělesem šroubovitého tvaru, které je nasazeno na stator. Výška motoru je 190 mm, jeho délka je 195 mm a průměr statorového svazku je 170 mm. Motor je v provedení s šesti póly. Ve vinutí motoru jsou zabudované dva senzory teploty. Motor je schopen vyvinout maximální otáčky 8500 ot/min, jmenovité otáčky motoru jsou 5000 ot/min. Maximální výkon motoru je 50 kW. Jmenovitý moment motoru je 65 Nm, maximální moment motoru je 107 Nm.



Obr. 5.7 Stator a rotor motoru Siemens 1FE1 [20]

5.7 Porovnání používaných motorů

Motory používané pro pohon elektro formulí lze rozdělit do tří skupin podle počtu používaných motorů. U vozidel, které mají poháněna všechna kola, se setkáme s použitím motorů, mezi které patří AMK DD5 14-10-POW, AMK DT5 14-10-POW a Fischer TI85-052-070. Formule s poháněnými zadními koly mají motor jeden nebo dva podle toho, jestli je poháněna celá náprava nebo každé kolo zvlášť. Při pohonu celé zadní nápravy je použit jeden motor. Nejvhodnější z vybraných motorů jsou Emrax 228, Magnax AXF225 a Yasa 750R. Pokud je každé zadní kolo poháněno vlastním motorem jsou nejvhodnější motory Emrax 208 a Siemens 1FE11082-6WP.

Motory vybrané pro pohon každého kola zvlášť jsou motory s radiálním magnetickým tokem. Tyto motory se vyznačují vysokým rozsahem otáček. Jejich jmenovitý i maximální moment je relativně malý. Jmenovité napětí těchto strojů se pohybuje v okolí 350 V.

Hmotnost těchto strojů je malá a pohybuje se okolo 3,5 kg. Délka a výška motorů je přibližně stejná a pohybuje se v okolí 110 mm.

Naopak motory vhodné pro pohon zadních kol nebo celé nápravy mají výrazně vyšší moment a nižší otáčkový rozsah. Používají se zde především motory s axiálním magnetickým tokem, ale setkáme se i s výjimkami jako například použití motoru Siemens řady 1FE1. Jmenovité napětí se podobně pohybuje v rozmezí 350-470 V. Hmotnost a rozměry těchto strojů jsou větší než u motorů použitých v náboji kola. U tohoto systému pohonu nejsme tolik prostorově omezeni.

Vybrané parametry používaných motorů jsou vypsány v příložené tabulce (tab. 5.1).

Tab. 5.1 Tabulka s vybranými parametry používaných strojů

Motor	N_n [ot/min]	N_{max} [ot/min]	M_n [Nm]	M_{max} [Nm]	P_{max} [kW]	U_n [V]
AMK DD5 14-10-POW	12000	20000	9	21	35	350
AMK DT5 14-10-POW	12000	20000	8,4	21	32	350
Fischer TI85-052-070	XXX	16000	14	29,3	32	320
Emrax 208	5170/5760	7050/7250	80	140	75	320/470
Emrax 228	5170	6500	120	230	100	470
Magnax AXF225	XXX	14000	XXX	250	220	400
Yasa 750R	XXX	3250	XXX	790	200	350
Siemens 1FE11082- 6WP	5000	8500	65	107	50	430

5.8 Používané převody převodovek

Převod formule je obvykle navržen tak, aby maximální rychlost vozu dosahovala přibližně rychlosti 120 km/h. Na konstruované formuli budou použity pneumatiky s průměrem 465 mm. Pro pohon formule jsou použity čtyři motor AMK DD5 14-10-POW, které jsou v nábojích kol. Maximální otáčky motoru jsou 20000 ot/min. Z průměru kola lze jednoduše dopočítat jeho obvod, následně ze známé maximální rychlosti a obvodu kola lze

dopočítat otáčky kola. Převod převodovky je roven poměru maximální rychlosti motoru a otáček kola.

Výpočet obvodu pneumatiky:

$$o_k = \pi \cdot d_k = \pi \cdot 465 = 1,46 \text{ m} \quad (1)$$

Výpočet otáček pneumatiky:

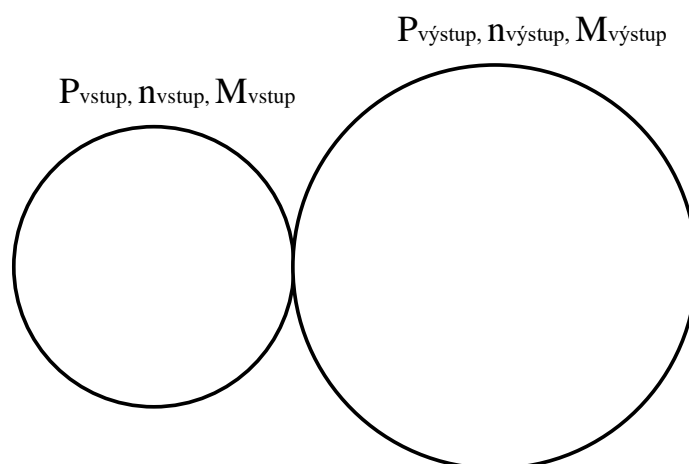
$$n_k = \frac{v_f \cdot 1000}{o_k \cdot 60} = \frac{120 \cdot 1000}{1,46 \cdot 60} \cong 1369 \text{ ot/min} \quad (2)$$

Výpočet převodu převodovky:

$$p = \frac{n_{max}}{n_k} = \frac{20000}{1369} \cong 14,3 \quad (3)$$

Převody převodovek se pohybují v určitém rozmezí v závislosti na průměru použité pneumatiky a na otáčkách motoru. Převody použité pro motor v náboji kola se pohybují v rozmezí 1:11-16. Motory používané pro pohon zadní nápravy jsou použity v kombinaci s převodovkami s převody v okolí hodnot 1:3-5.

Podíváme-li se na pohon formule jako na celek, zjistíme podobnost použitých systémů z hlediska maximálního výkonu, momentu a otáček, který je přenášen na kola. Pokud pro zjednodušení zanedbáme ztráty na převodovce, můžeme říct, že výkon na vstupu převodovky a výkon na výstupu převodovky je stejný. Při použití převodu do pomala jsou otáčky na výstupu převodovky menší než na vstupu a moment je naopak vyšší na výstupu než na vstupu.



Obr. 5.8 Zjednodušené znázornění převodu

Poměr výkonu, otáček a momentu na převodovce

$$P_{vstup} = P_{výstup} \quad (4)$$

$$n_{vstup} = \frac{n_{výstup}}{p} \quad (5)$$

$$N_{vstup} = N_{výstup} \cdot p \quad (6)$$

6 Návrh konceptu motoru pro E formuli

V této části práce je úkolem navrhnout koncept motor z hlediska rozměrů, chlazení a provedení. Pro pohon formule jsou použity čtyři synchronní motory s permanentními magnety, kdy každý pohání jedno kolo. Motory jsou uloženy v náboji kola a jsou spojeny s kolem přes planetovou převodovku. Provedení motorů je s vnitřním rotorem. Pro chlazení motoru je zvoleno vodní chlazení s tělesem ve tvaru šroubovice, které bude umístěno na statoru. Rotor je chlazený vzduchem. Chlazení s vodním tělesem ve tvaru šroubovice nabízí nejlepší rozložení teplot na statoru, při kterém nevznikají přehřátá místa. Motor je v přírubovém provedení s jedním vyvedeným koncem hřídele. Konektory jsou vyvedeny na zadní části motoru. Vstup a výstup vodního chlazení je vyveden na povrch v horní části. Hlavní rozměry jsou zvoleny následovně:

Průměr a délka motoru:

$$D_m = 115 \text{ mm} , L_m = 177 \text{ mm}$$

Průměr a délka statorového paketu:

$$D_s = 83 \text{ mm} , L_s = 100 \text{ mm}$$

Průměr rotoru:

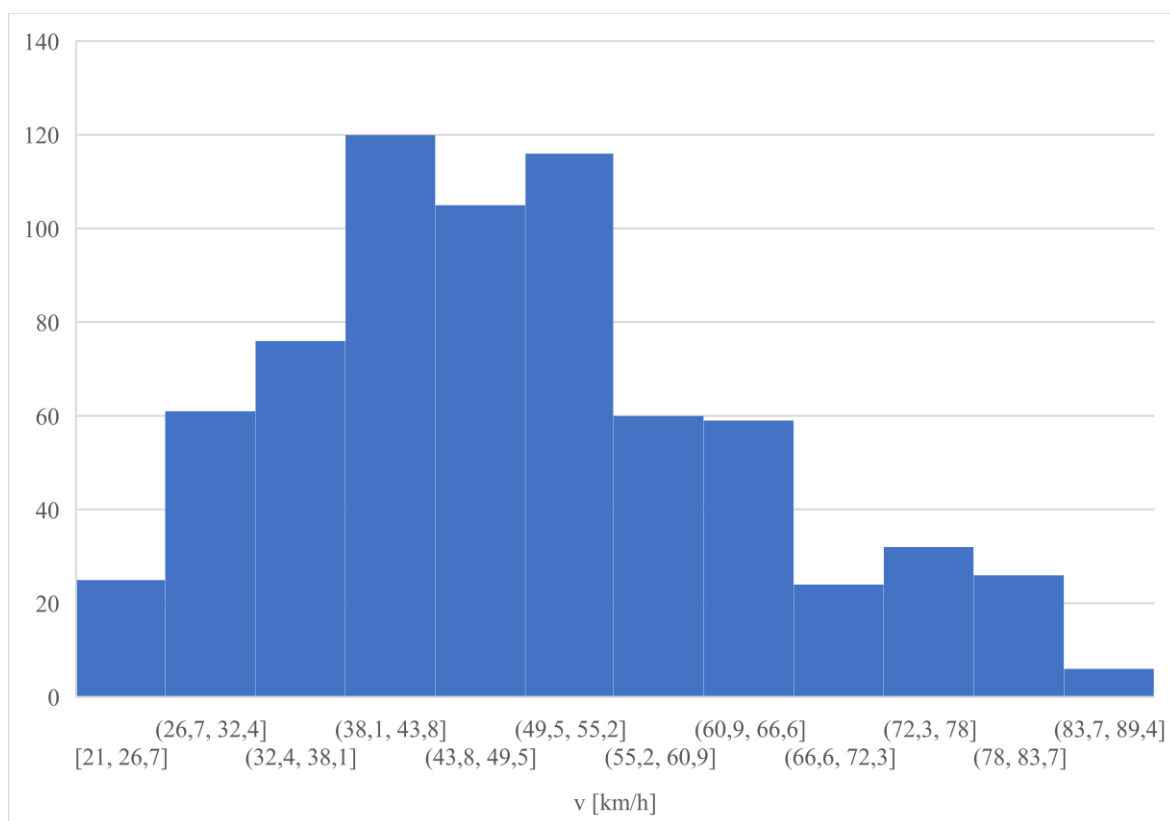
$$D_r = 54 \text{ mm}$$

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = 1 \text{ mm}$$

Statorové plechy jsou vyrobeny ze slitiny VACODUR 50. Jedná se o slitinu železa a kobaltu s příměsí vanadu. Tento materiál je charakteristický vysokou hodnotou magnetické indukce, která dosahuje až 2,35 T, vysokou pevností a poměrně nízkými ztrátami. V závislosti na složení a výrobním procesu mohou být vytvořeny různé vlastnosti magnetizační křivky. Vinutí statoru je tvořeno tenkými měděnými vodiči kruhového profilu. Na rotoru jsou použity neodymové magnety, které jsou zapuštěny do povrchu rotoru a jsou zalaty do pryskyřice pro zvýšení mechanické pevnosti. Chladící těleso tvaru šroubovice je vyrobeno z tenkostěnné hliníkové trubky.

Pomocí údajů z několika závodů Formula Student Electric byly zjištěny rychlosti, ve kterých se formule pohybuje. Maximální rychlost formule na okruhu dosahuje hodnot 82-91 km/h, průměrná rychlost vozu se pohybuje v okolí 50 km/h a nejčastější rychlost je 37-42 km/h.



Obr. 6.1 Histogram rychlostí formule z jednoho závodu

Jmenovité otáčky jsou navržena tak, aby motor pracoval s otáčkami blízkými k hodnotám nejčastější rychlosti. Pokud budou maximální otáčky motoru 20000 ot/min, můžeme použít hodnotu převodu spočítanou v předchozí kapitole s velikostí 1:14,3. Jmenovité otáčky při tomto převodu vyjdou 7000 ot/min. Motor je navržen na jmenovitý výkon 14 kW. Jmenovitý moment má hodnotu 19,1 Nm. Motor je dimenzován na napětí ve stejnosměrném meziobvodu s velikostí 560 V. Hodnota napětí je dána napětím baterií.

Závěr

Tato práce se zabývá rešerší používaných strojů pro pohon elektro formulí. Na základě dostupných zdrojů bylo zjištěno, že se pro pohon elektro formulí používají synchronní motory s permanentními magnety. Synchronní motory se dají rozdělit na motory s radiálním tokem, motory s axiálním tokem a BLDC motory. Motory s radiálním tokem a BLDC motory se používají ve vozech, které mají poháněno každé kolo. Tyto motory se vyznačují vysokým rozsahem otáček. Motory s axiálním tokem nalezneme ve vozech s poháněno zadní nápravou. Tyto motory mají nižší rozsah otáček, ale vynikají vysokým momentem.

Pro chlazení strojů se používá vodní chlazení a chlazení vzduchem. Rotor stroje je chlazený vzduchem. Vodní chlazení je použito pro chlazení statoru.

Motory jsou spojeny s koly přes převodovku. Nejčastěji se používají planetové převodovky a řetězové převody. Převody převodovek závisí na maximálních otáčkách motoru převodovek a jsou navrženy, tak aby maximální rychlost vozu dosahovala rychlosti kolem 120 km/h.

V provedené rešerši jsou vybrány nejpoužívanější a nejvhodnější typy motorů. Tyto stroje jsou v práci porovnány. Pro koncept, kdy je každé kolo poháněno vlastním motorem, má nejvhodnější vlastnosti motor AMK DD5. U konceptu s poháněnou zadní nápravou vychází nejlépe motory EMRAX.

Na základě parametrů používaných strojů je vytvořen koncept motoru pro budoucí použití v elektro formulí. Pro pohon stroje je zvolen koncept se čtyřmi motory umístěnými v nábojích kol. Tento koncept nabízí nejlepší dynamiku a obratnost vozu. Odpadá zde problém s přenosem výkonu ze zadní části vozu na kola a s mechanickým diferencíálem, který je řešen elektronicky. V návrhu jsou zvoleny hlavní rozměry stroje, provedení a způsob chlazení. Dále jsou zde vybrány vhodné materiály pro statorové plechy, vinutí a chladicí okruh. V neposlední řadě jsou zde navrženy parametry stroje, kdy je jmenovitý bod navržen, tak aby se pohyboval v okolí nejčastějších rychlostí vozu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Formula SAE Electric. [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.sae.org/attend/student-events/formula-sae-electric/>
- [2] Formula student. [online]. [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Formula_Student
- [3] ČERNÝ, Ondřej, Radovan Doleček a Jaroslav Novák. Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel. [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195384/2908.pdf/0cfb0eda-cd8d-42f1-941e-b4e3ed2dfd2a>
- [4] KOPYLOV, I.P. Stavba elektrických strojů. Praha: SNTL, 1988. 658 s. ISBN 04-532-88
- [5] ŘEZÁČEK, Petr. Projektování elektrotechnický zařízení: Přednášky k předmětu PEZ [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/pez/>
- [6] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of Rotating Electrical Machines. Second Edition. United Kingdom: Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5
- [7] GIERAS, Jacek F., Rong-Jie WANG a Maarten J KAMPER. Axial flux permanent magnet brushless machines. Boston: Kluwer, 2004, x, 340 p. ISBN 14-020-2720-6
- [8] Brushless DC Motor. [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf)
- [9] Sikora, M.: Inovace systému chlazení točivých elektrických strojů s využitím CFD metod, dizertační práce práce, Brno, 2011
- [10] Kral, C., Haumer, A., Bauml, T.: Thermal Model and Behavior of a Totally-Enclosed-Water-Cooled Squirrel-Cage Induction Machine for Traction Applications, Industrial Electronics, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 55, Issue: 10, On page(s) 3555, 2008
- [11] Vansompel, H., Hmeida, A., Segeant, P.: Stator Heat Extraction System for Axial Flux Yokeless and Segmented Armature Machines, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, 2017
- [12] Suchánek, Petr. Mechanika pohonného ústrojí. [online]. 2016 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: https://int.eforce.cvut.cz/cs/article/2016_drivetrain_mech#content
- [13] Planetové převodovky. [online]. 2013 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z:

- <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/SIV/planetov%C3%A9%20p%C5%99evodovky-UT.pdf>
- [14] Řetězové převody, [online]. 2013 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/SPS/SPS%203%20%20%C5%98et%C4%9Bzov%C3%A9%20p%C5%99evody-UT.pdf>
- [15] Spolupráce AMK a Vacuumschmelze. [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/Medienbiliothek_2010/Downloads/HT/FachartikelSPORTIERSIDEELECTRICVEHICLES-engl-Druck_01.pdf
- [16] Fischer elektromoren Torque Motor-Inner rotor. [online]. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://en.fischer-elektromotoren.de/wp-content/uploads/sites/5/2016/10/Torquemotor-Innenlufer_englisch.pdf
- [17] EMRAX inovative E-motors. [online]. [cit 2019-05-25]. Dostupné z: https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf
- [18] High efficiency axial flux machines. [online]. [cit 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.magnax.com/hubfs/WP-%20High%20Efficiency%20Axial%20Flux%20Machines%20-%20whitepaper%20v1.5.pdf?hsCtaTracking=031f3fb5-bcfd-4f20-a35c-b2c399acb674%7C5f5531d7-81c2-4bb2-ab02-297a79a96279>
- [19] Yasa motors. [online]. [cit 2019-05-30]. Dostupné z: <https://www.yasa.com/>
- [20] Siemens Synchronous Built-in Motors 1FE1. [online]. [cit 2019-05-30]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/809/44479809/att_20871/v1/PFE1S_0610_en-en-US.pdf

