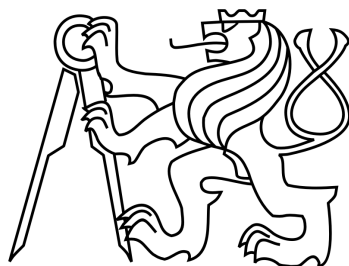


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTRICKÝCH POHONŮ A TRAKCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

A0M14DIP

Návrh pohonu pro vozidlo Formule Student



Anotace Práce se zabývá návrhem pohonu pro vozidlo Formula Student. Na začátku práce jsou analyzovány jízdní odpory vozu, očekávané dynamické parametry a vypočteny výkony pro jejich dosažení. S těmito parametry se pak dále pracuje při výběru vhodných komponent pohonu. V práci jsou vytypovány vhodné motory různých výrobců pro aplikaci v monopostu Formula Student. Zároveň se práce zabývá návrhem vhodného motoru za pomoci známých analytických vztahů. Tyto výpočty jsou dále zpracovány a optimalizovány metodou konečných prvků v modulu RMXprt programu ANSYS Maxwell. V závěru práce jsou změřeny základní charakteristiky motoru a porovnány s teoretickými hodnotami.

Klíčová slova PMSM, motor, Maxwell, RMXprt, Formula Student, eForce

Abstract This thesis deals with the design of a Formula student car drive. In the beginning, the driving resistances and anticipated dynamic parameters are analysed and the power needed to reach them is calculated. These parameters are taken into account when choosing the right components for the drive. The thesis highlights engines offered by different manufacturers that are suitable for use in a Formula Student monopost. It also deals with the proposal of an appropriate engine using known analytical equations. These calculations are further processed and optimised using the finite element method (FEM) in RMXprt module of ANSYS Maxwell. In conclusion, the basis characteristics of the engine are compared with the theoretical values.

Key words PMSM, motor, Maxwell, RMXprt, Formula Student, eForce

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. František Pech**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Návrh pohonu pro vozidlo formule student**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Výběr a návrh vhodného elektropohonu pro vozidlo třídy formule student
- 2) Optimalizace návrhu metodou konečných prvků
- 3) Kontrola naměřených parametrů motoru s vypočtenými hodnotami

Seznam odborné literatury:

- [1] Hrabovcová V., Janoušek L., Rafajdus P., Ličko M.: Moderné elektrické stroje, EDIS 2001
- [2] Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcová V.: Design of Rotating Electrical Machines, John WILEY and Sons, Ltd, UK, 2014
- [3] Gieras J. F. : Permanent Magnet Motor Technology, CRC Press, 2011

Vedoucí: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

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.121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

podpis

V dnešní době, kdy každý hledí jen na svůj prospěch, na své zájmy a nevnímá tak problémy v kontextu se z běžné mluvy téměř vytrácí tak nádherná slova jako prosím a děkuji. Nechci zde tvrdit, že jich používám vždy, kdy by to bylo vhodné, leč na tomto místě se to sluší více než obvykle a proto bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Vítu Hlinovskému, CSc., jak za podporu při psaní práce, za rady při její realizaci, tak především za psychickou pomoc při tvorbě nových formulí týmu eForce FEE Prague Formula. Není vždy samozřejmé, že by rodiče dali svým dětem tolik, co bylo mně předáno do života, a proto i jim velice děkuji za mou výchovu a podporu mého vzdělání.

Obsah

Anotace	iii
Zadání práce	v
Obsah	xiii
Seznam obrázků	xvi
Seznam tabulek	xvii
Předmluva	1
Formula Student	1
Pravidla soutěže	2
Závody	2
Technická přejímka	3
Statické disciplíny	3
Dynamické disciplíny	4
1 Úvod	7
2 Pohon elektrické formule	9
2.1 Specifikace vozidla	9
2.1.1 FSE.03	9
2.1.2 FSE.04x	10
2.2 Koncepce pohonu	11
2.2.1 Pohon zadní nápravy jedním motorem	11
2.2.2 Pohon zadní nápravy dvěma motory	12
2.2.3 Pohon všech kol	13
2.3 Trakční baterie	14
2.4 Výkonový měnič	15
2.5 Motory	16
3 Stanovení základních parametrů motoru	17
4 Výběr vhodného motoru	19

4.1	YASA 750	19
4.2	Brusa HSM1-10.18.04	21
4.3	Enstroj Emrax 207	21
4.4	AMK DT5	22
4.5	TG Drives	24
4.6	Vývoj vlastního motoru	26
4.7	Závěr řešerše	27
5	Matematický model synchronního motoru	29
5.1	Synchronní stroj	29
5.2	Matematický model IPM	30
5.2.1	Přímá transformace abc na dq systém souřadnic	35
5.2.2	Model PMSM motoru v rotorové soustavě souřadnic dq	37
5.2.3	Točivý moment motoru	38
5.3	Matematický model SPM	39
5.4	Výpočet ztrát stroje a jeho účinnosti	40
5.4.1	Ekvivalentní obvod pro výpočet ztrát v železe	40
5.4.2	Výpočet účinnosti	43
5.5	Proudové a napěťové omezení	43
5.5.1	Provozní limity IPM	46
5.5.2	Provozní limity SPM	48
6	Návrh motoru	51
6.1	Výběr rotoru	51
6.1.1	SPM	52
6.1.2	IPM	52
6.1.3	Magnety	52
6.2	Základní geometrické parametry	53
6.3	Návrh v modulu RMxpřt	54
6.4	Maxwell 2D	58
6.5	Zhodnocení návrhu	60
7	Měření na motoru	63
7.1	Měření elektrických veličin	63
7.1.1	Měření odporu vinutí	63
7.1.2	Měření indukčnosti vinutí	64
7.2	Měření mechanických veličin	65
7.2.1	Moment motoru	65
7.2.2	Točivý moment	65
8	Závěr	69

Literatura	74
Přílohy	I
Parametry motorů z RMxpřt	III
Datový list IGBT modulu	XI
Datový list materiálu Hiperco 50A	XII
Datový list motoru TG Drives N6-1800	XIII
Schéma výkonového měniče	XIV

Seznam obrázků

0.1	Graf bodů a disciplín [5]	4
2.1	Schéma zapojení jednoho motoru	9
2.2	Koncepce pohonu FSE.03	10
2.3	Koncepce pohonu FSE.01	12
2.4	Koncepce pohonu	14
2.5	Vybíjecí charakteristika článku Sony VTC-5 [6]	15
4.1	Motor Yasa 750 [22]	20
4.2	Graf momentu a výkonu Yasa 750 [22]	20
4.3	Motor Brusa HSM1-10.18.04 [23]	21
4.4	Motor Emrax 207 [24]	22
4.5	Motor AMK DT5-20-10 [27]	23
4.6	Graf momentu motoru AMK [27]	24
4.7	Parametry motorů TG Drives pro FSE.03 a FSE.04x	25
4.8	Součet momentů motorů a výsledný moment v závislosti na rychlosti	25
4.9	Grafy zrychlení na rychlosti	26
4.10	AMZ Zürich - zástavba a rotory	27
5.1	Typy synchronních motorů bez buzení [12]	30
5.2	System souřadnic a) abc , b) dq	30
5.3	Závislost vlastní indukčnosti na poloze rotoru	32
5.4	Závislost polohy rotoru na vzájemné indukčnosti	33
5.5	Transformace souřadnic	35
5.6	Ekvivalentní obvod v dq respektující ztráty v železe [14]	41
5.7	Ideální charakteristiky motoru [15]	44
5.8	Fázorový diagram a) SPM, b) IPM	45
5.9	Momenty vznikající v PMSM motor jako funkce proudového úhlu [19]	46
5.10	Provozní limity IPM [16]	47
5.11	Provozní limity SPM [16]	49
6.1	Typy rotorů v RMXprt	52

6.2	Typy vinutí statoru	54
6.3	Motory vykreslené v modulu RMxprt	55
6.4	Motor s magnety na povrchu rotoru s vinutím „Whole-coil“ (SPM)	56
6.5	Motor s magnety na povrchu rotoru s „Half-coil“ vinutím (SPM)	56
6.6	Motor s magnety uvnitř rotoru v jeho ose s rozloženým vinutím (IPM1)	57
6.7	Motor s magnety uvnitř rotoru v jeho ose s „Half-coil“ vinutím (IPM1)	57
6.8	Motor s magnety uvnitř rotoru v jednovrstvém uspořádání s rozloženým vinutím (IPM2)	58
6.9	Magnetizační křivka	59
6.10	Magnetická indukce a tok u SPM	59
6.11	Magnetická indukce a tok u IPM1 - rozložení vinutí	60
6.12	Magnetická indukce a tok u IPM1 - „Half-coil“ vinutí	61
6.13	Trojrozměrný model IPM motoru s magnetickou indukcí	62
6.14	Moment motoru	62
6.15	Průběh reluktančního momentu	62
7.1	Měření odporu vinutí	64
7.2	Doběhová charakteristika	66
7.3	Změřený moment v části konstantního momentu při $I \approx 200$ A	66

Seznam tabulek

2.1	Parametry baterie	14
3.1	Parametry pro výpočet dynamiky vozu	17
4.1	Parametry motoru YASA 750 [22]	19
4.2	Parametry motoru Brusa HSM1-10.18.04 [23]	21
4.3	Parametry motoru Emrax 207 [24]	22
4.4	Parametry motorů AMK [25–27]	23
4.5	Parametry motorů TG Drives	24
6.1	Vybrané parametry motorů z RMXprt	56
7.1	Parametry motoru TG Drives N6	63
7.2	Měření odporu vinutí	64
7.3	Měření indukčnosti vinutí	65
.1	Parametry motoru z RMXprt	III

Předmluva

Tým eForce FEE Prague Formula

Fakulta elektrotechnická Českého vysokého učení technického z Praze se bude letos po čtvrté účastnit mezinárodních studentských závodů Formula Student s formulí s elektrickým pohonem. Tým eForce FEE Prague Formula (dále jen eForce) chce jako většina týmů účastnících se soutěže Formula Student každý rok postavit lepší vozidlo než loňský rok, ani tým z Fakulty elektrotechnické není výjimkou. Proto na letošní ročník opět připravujeme zcela nový vůz vlastního návrhu od první skici přes výrobu až po finalizaci vozu a jeho testování. V současné době již vozidlo stojí na kolech včetně všech kapotází, elektrických krabic a některých řídicích jednotek. Nyní se pouze dokončují kabelové svazky a některé řídicí jednotky se ještě programují. Tým eForce čítá přes 30 studentů převážně z Fakulty elektrotechnické a Fakulty strojní ČVUT v Praze. Studenti si na projekt shánějí sami peníze nebo materiální dary od partnerů a sponzorů, zajišťují si propagační akce, staví kompletní závodní monopost a v neposlední řadě s ním závodí.

Formula Student

Formula SAE® představuje konstrukční soutěž určenou studentům technických vysokých škol, která vznikla v USA v roce 1981 pod patronací Rosse Brawna.¹ Od roku 1998 existuje její evropská odnož, Formula Student a od roku 2010 se v kategorii Electric mohou soutěže účastnit i vozy s čistě elektrickým pohonem.. Obě soutěže mají stejný cíl a téměř stejná pravidla. Každý rok se v rámci Formula Student/SAE pořádá 8 jednotlivých soutěží po celém světě. V současnosti v seriálu Formula Student/SAE soutěží více než 600 univerzitních týmů z celého světa. Formula Student/SAE zadává konstrukční úkol, který by mohla zadat jakákoliv automobilová výrobní firma. Úkolem je vývoj prototypu závodního vozu. Zákazník, pro něhož je vůz určen, je víkendový neprofesionální závodník holdující autokrosu² nebo sprintu. Vůz proto musí disponovat velkým výkonem ve smyslu co nejlepší akcelerace, brzdění a ovladatelnosti. Musí

¹Šéfkonstruktor několika stájí Formule 1 včetně Ferrari (1997-2006) a Mercedes (2010-2013)

²V americkém slova smyslu - závod mezi kužely na úzké trati

být levný, spolehlivý, snadno udržovatelný a musí být konkurenceschopný. Vůz by tedy měl být také esteticky na úrovni, pohodlný na používání a měl by využívat co nejvíce běžně dostupných součástí. Produkční plán je 1 000 vozů za rok. Cílem tohoto projektu je přivést do praxe studenty především technických vysokých škol a zvýšit jejich prestiž na trhu práce [5].

Pravidla soutěže

Jak jsem již nastínil v úvodu, soutěž svazují poměrně přísná pravidla pro stavbu tohoto závodního vozu. Nejpřísnějším pravidlem je pravděpodobně povinnost postavit nový rám vozu. Toto pravidlo nutí týmy neustále pokračovat ve vývoji vozu, ale ukládá tak velmi tvrdou práci během celého roku. Mezi základní pravidla pro elektrickou výzbroj patří maximální okamžitý odebíraný výkon 80 kW. Překročení maximálního výkonu znamená vyšší odběr než 80 kW po dobu 100 ms nebo klouzavý průměr přes 500 ms vyšší než 80 kW. Dále je omezeno maximální napětí při jakékoli disciplíně na 600 V DC, pro americké soutěže 300 V DC³. Pravidla definují plně galvanicky oddělené trakční a palubní napětí, umístění všech komponent pracujících s trakčním napětím uvnitř rámu (mimo motory) atd. K pravidlům se budu v mé práci často obracet, jelikož jsou pro návrháře poměrně svazující. Pro lepší celkovou představu o navrhovaném voze velmi stručně popíši pravidla, která se výslovně netýkají elektrické výzbroje. Úkolem je postavit vozidlo formulového typu, což znamená otevřenou karoserii, odkrytá kola a trubkový⁴ rám. Vozidlo musí mít minimální rozvor 1525 mm, jeho rám musí obsahovat hlavní oblouk a přední oblouk z definovaných trubek. Stejně tak velká část trubek je definována a pokud chceme jiný průřez nebo průměr trubek, tak lze použít pouze trubky s větším průřezem. Vpředu vozidla musí být umístěna deformovatelná část, která je schopna pohltit určité množství energie nárazu. Z dalších pravidel musí například pilot vyskočit z vozidla do 5 s, vozidlo se mimo prostory pro závodní disciplíny musí posunovat jen speciální pomůckou zvanou Push Bar atd. Celkem čítají pravidla asi 180 stran a každý podnik má ještě speciální dodatky [4].

Závody

Vrcholem sezony každé soutěže je přirozeně závodní klání. Představme si proto nyní celý průběh závodu Formula Student. Tato soutěž není čistě jen o zajetí nejrychlejších

³Náš případ, protože se chceme účastnit závodů v Michiganu

⁴Nemusí být nutně trubkový, ale musí se spočítat a experimentálně dokázat jeho pevnost

časů, ale je rozdělena na nebodovanou technickou přejímku a dvě bodované části – statické a dynamické disciplíny.

Technická přejímka

Ve všech soutěžích je nezbytné zkontrolovat, zda závodníci nedopují či si nepomáhají nějakými nekalými praktikami. Stejný postup je uplatňován při závodech Formula Student, kde jako první a pravděpodobně nejdůležitější disciplína je technická přejímka, která sice nemá vliv na statické disciplíny, ale bez ní nelze pokračovat v dynamické části závodu. Je rozdělena na 4 části, za které se postupně sbírají samolepky na kapotu vozu. Při první části se kontroluje kompletně technický stav vozidla, jeho shoda s pravidly a zároveň shoda s dokumenty odevzdanými před závody, funkčnost bezpečnostních prvků, jako jsou bezpečnostní tlačítka, zařízení kontrolující izolační stav, bezpečnostní pásy, rychlost vyskakujících pilotů. . . Po této části následuje náklonový test, kde je vozidlo nakláněno na rovné desce do boku až k úhlu 60° a nesmí se mu odlepit kola od desky. Po této zkoušce přichází na řadu test krytí, kdy je vozidlo zkrápěno vodou po dobu 2 minut a i po dalších dvou minutách nesmí hlídač izolačního odporu nahlásit chybu. Nakonec se jedou otestovat brzdy. Pilot rozjede vozidlo a na určené čáře musí zablokovat všechna kola a vozidlo se nesmí přetáčet na žádnou stranu ani škrtnout o zem. První den závodů máme úspěšně za sebou. Pokud by vozidlo neprošlo, zbývá ještě dost času vozidlo upravit a zkusit opakovat přejímku. Zároveň je ale nutné druhý den počítat se statickými disciplínami.

Statické disciplíny

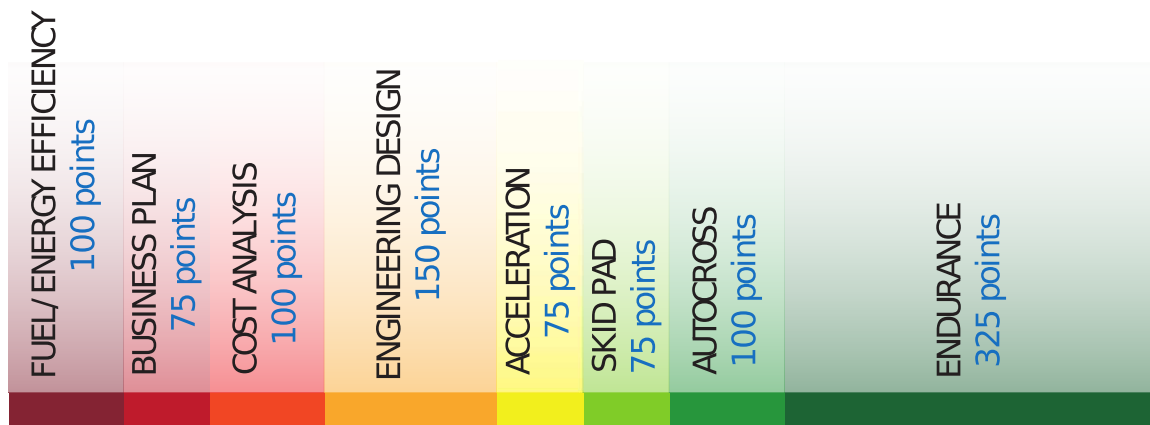
Přichází na řadu druhý den závodů a to ekonomicko-technické disciplíny. Ty jsou tři a to Business Plan, Cost Analysis a Engineering Design Event.

- **Business Plan** – marketingová studie výroby 1000 formulí pro potenciálního investora.
- **Cost Analysis** – hodnocení výše výrobních nákladů na vůz, zobrazuje cenu použitého materiálu a součástek při stavbě formule. Zároveň z něho lze vyčíst postup výroby a montáže jednotlivých sestav, včetně ocenění práce v jednotných cenách pro všechny týmy.
- **Engineering Design Event** – hodnocení technické vyspělosti a obhajování použitých řešení při návrhu a stavbě vozu. Při této disciplíně komisaři ocení vlastní důvtipné návrhy a protože jsou obvykle z motorsportu nebo automobilů, tak zároveň loví nápady a talenty.

Dynamické disciplíny

Teprve třetí den závodů si všichni částečně ověří, zda vozidlo dokáže obstát v těžké konkurenci ostatních týmů a zda se stovky hodin práce vyplatily.

- **Acceleration** – první dynamická disciplína ověřuje výkon vozu a schopnost jej přenést na vozovku na trati dlouhé 75 m. Vozy se na ní obvykle rozjedou na rychlost přes 100 kmh^{-1} a překonají tuto vzdálenost za čas okolo 4 s.
- **Skid Pad** – dynamická disciplína, která ověří perfektní nastavení podvozku jízdou na čas po trati ve tvaru osmičky.
- **Autocross** – odpolední disciplína třetího závodního dne, při které se už jede dvakrát jedno kolo na opravdové závodní trati a jezdci se zde mohou seznámit s tratí, která se pojede v hlavním závodě a případně doladit nastavení vozu. Autocross zároveň slouží jako kvalifikace do hlavního závodu.



Obrázek 0.1: Graf bodů a disciplín [5]

- **Endurance** – vrcholem celého klání je vytrvalostní závod Endurance, který se jede na 22 km a v jeho půli se střídají piloti. Tento závod dokonale prověří kvality vozidel a není neobvyklé, že polovina startovního pole nedojede. Trať není stavěná na zjištění maximální rychlosti, ale spíše na techniku a obratnost vozů. V pravidlech je předepsána jak šířka trati, tak poloměry zatáček a také přibližná průměrná rychlost do 50 kmh^{-1} a maximální rychlost 105 kmh^{-1} , kterou by se měly vozy pohybovat. Formule jsou na trať vypouštěny v časových odstupech. Aby se vyloučilo kontaktní předjíždění, trať hlídají maršálové a pokud by mělo jedno vozidlo předjíždět, pošlou pomalejší do předjížděcí zóny a nechají rychlejší vozidlo předjet. Styl jízdy kolo na kolo je kvůli bezpečnosti zakázán. Pod hodnocení hlavního závodu ještě spadá vyhodnocení spotřebované energie v hlavním závodě, které je bodování ve zvláštní kategorii.

Na obrázku 0.1 je znázorněno rozložení bodů v jednotlivých disciplínách. Body jsou rozdělovány podle vzorce:

$$Body = a \cdot \frac{\frac{T_{max}}{T_{your}} - 1}{\frac{T_{max}}{T_{min}} - 1} + b, \quad (0.1)$$

kde a je koeficient váhy disciplíny od 47 do 250 bodů a b je počet bodů za účast od 0 do 50 bodů. Výsledný maximální součet je 1 000 bodů.

1 Kapitola 1

Úvod

Jak jsme se dozvěděli v předmluvě, má celá soutěž poměrně pevně daná pravidla a je na kreativitě týmů, jak se jim podaří postavit vůz dle pravidel a zároveň tak, aby byl co nejlehčí, nejjobratnější, nejrychlejší.

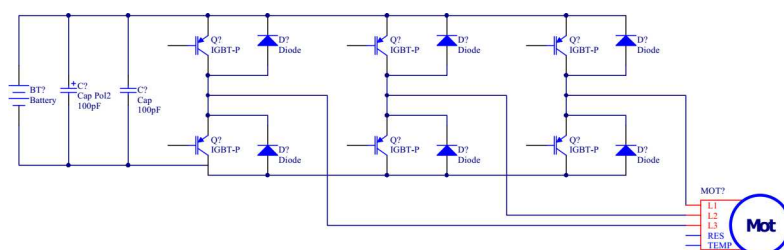
Mým úkolem a cílem práce, je provést základní výpočty dynamiky vozu, kde bude zjištěno, jaký je potřebný výkon vozu v rámci regulí soutěže, jaký typ pohonu vozu bude vhodné zvolit pro vozidlo. Dále bych se chtěl věnovat průzkumu trhu při výběru vhodného motoru.

Praktickou částí a největším přínosem mé práce i pro další vývoj týmu eForce bude kompletní návrh motoru pro naši formuli s použitím prostředků metody konečných prvků (MKP, FEA) i analytických výpočtů z teorie strojů. Pro výpočty použiji program Wolfram Mathematica a pro MKP návrh a simulace program ANSYS Maxwell včetně jeho doplňku RMXprt a 2D i 3D řešičů. Závěrem práce provedu základní měření pro ověření parametrů motoru, který bude později osazen do vozidla Formula Student týmu eForce FEE Prague Formula.

2 Kapitola 2

Pohon elektrické formule

Pohon elektrické formule se obecně skládá z baterie článků, typicky na bázi lithia, výkonového měniče a motoru, jak je znázorněno na obrázku 2.4. Pro návrh vhodného



Obrázek 2.1: Schéma zapojení jednoho motoru

motoru je vždy důležitý jeho výkon, moment, otáčky a přetížitelnost. Tyto parametry je nezbytné volit ve správném poměru, aby komponenty nevycházely zbytečně těžké. Proto bych chtěl hned na úvod provést výpočet dynamiky vozidla, podrobněji se seznámit s použitým pohonem v předchozí generaci elektrické formule s označením FSE.03 a prozkoumat možné typy pohonů používané pro vozidla Formula Student.

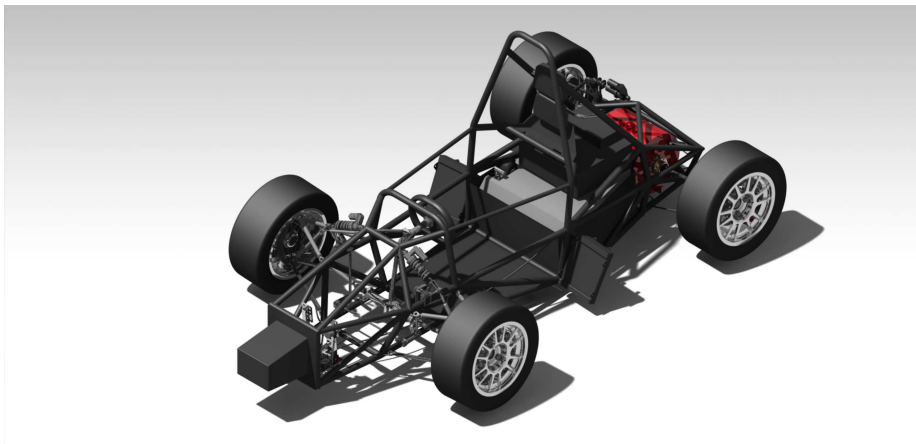
2.1 Specifikace vozidla

2.1.1 FSE.03

Vozidlo třetí generace bylo pokračovatelem vývoje FSE.02 se zachováním stejného pohonu včetně baterií, jen s námi vyvinutým výkonovým měničem. Jeho hmotnost se díky aeropaketu mírně zvedla na 278 kg, ale její výkony se zlepšily. Model vozu se zvýrazněným motorem je na obrázku 2.2.

Parametry

- maximální rychlost 140 km h^{-1}
- hmotnost 278 kg, tzn. asi 350 kg i s pilotem
- pohon obou zadních kol
- zrychlení 0-75 m 4,4 s
- hmotnost obou motorů 40 kg
- zrychlení vozu $a = \frac{2 \cdot \Delta s}{\Delta t^2} = \frac{2 \cdot 75}{4,4^2} = 7,75 \text{ m s}^{-2}$
- výkon motoru 2 x 35 kW
- točivý moment na kole 450 Nm
- maximální přenositelný moment jednoho kola v přímém směru 380 Nm



Obrázek 2.2: Koncepte pohonu FSE.03

2.1.2 FSE.04x

Na začátku sezony, na podzim 2014 jsme si stanovili následující požadavky a parametry jako závazné pro vývoj nové formule. Dnes již můžeme říct, že jsme některé dokonce překonali a jde především o hmotnost vozu:

Požadavky

- maximální rychlost 120 km h⁻¹
- hmotnost nižší než 230 kg, tzn. 300 kg i s pilotem
- pohon všech čtyř kol
- zrychlení 0-75 m pod 3,6 s, což odpovídá zrychlení 0-100 km h⁻¹ za 3,3 s
- maximální hmotnost motoru včetně převodovky 20 kg

Parametry

- maximální přenositelný moment jednoho kola v přímém směru 330 Nm
- maximální přenositelný moment předního kola při akceleraci 30 Nm
- zrychlení vozu $a = \frac{2 \cdot \Delta s}{\Delta t^2} = \frac{2 \cdot 75}{3,6^2} = 11,57 \text{ m s}^{-2}$
- průměr pneumatiky 16“ = 406 mm, $r=203$ mm, obvod 1276 mm
- možnost použití převodovky

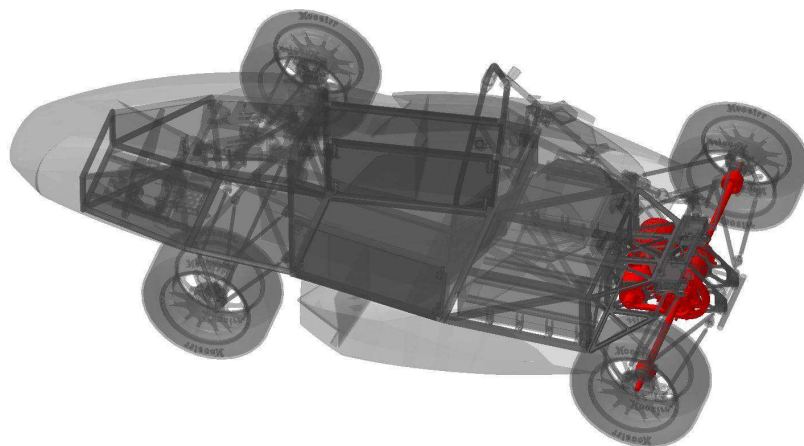
2.2 Koncepce pohonu

Podle pravidel soutěže Formula Student není omezen počet motorů a prakticky ani jejich umístění. Proto bych chtěl rozebrat možnosti pohonu z hlediska počtu poháněných kol a počtu motorů. Vyřadil jsem možnost použití jednoho motoru na pohon jednoho kola kvůli nedostatečné adhezi a tím i možnosti akcelerace jednoho poháněného kola.

2.2.1 Pohon zadní nápravy jedním motorem

Tento osvědčený koncept známý prakticky ze všech spalovacích vozů byl preferovaný u většiny týmů v počátcích elektrické skupiny Formula Student od roku 2010. I náš první monopost FSE.01 byl poháněn jedním motorem. Podle mých statistik ze sezony 2014 používalo tuto koncepci 40 týmů z 90 [28]. Ač tuto koncepci používá nejpočetnější skupina týmů, jedná se především o týmy z druhé poloviny výsledkové listiny, týmy, které staví svůj první monopost, nemají dostatek zkušeností nebo předělávají formule se spalovacím motorem. Vyjímkou je FS Team Tallinn z Tallinna Tehnikakõrgkool, jejichž tým dosáhl na první místo ve Formula SAE/Electric Italy 2014 a na

páté místo ve Formula Student Austria 2014. Většinou se pro tento typ pohonu používá nízkootáčkového motoru např. axiálního motoru YASA 750, do kterého je místo osy vestavěn diferenciál Drexler nebo je poháněn řetězovým převodem a moment je tedy přenášen na zadní kola.



Obrázek 2.3: Koncepce pohonu FSE.01

Tato koncepce má velkou výhodu v jednoduchosti konstrukce, její snadné zástavbě i možnosti použití znalostí ze spalovacích formulí. Podobně jako tomu bylo například v případě první elektrické formule z ČVUT, jejímž vývojem se zabýval Ondřej Fric, který ale navrhl použití vysokootáčkového motoru, planetové a řetězové převodovky [21]. Celý jeho koncept je znázorněn na obrázku 2.3.

Díky použití jednoho motoru odpadají problémy s EMC způsobené druhým motorem obvykle umístěným těsně vedle, většího počtu převodových ústrojí apod. Nevýhody jsou celkem zřejmé a to sice nemožnost regulace momentu na každém zadním kole zvláště, problematické nastavení svornosti diferenciálu, kdy je vždy nutné diferenciál demontovat z vozu, rozebrat a přenastavit namísto mnohem jednoduššího přenastavení konstant v řídicí jednotce.

2.2.2 Pohon zadní nápravy dvěma motory

Jakýsi mezistupeň mezi jedním a čtyřmi motory je pohon každého zadního kola samostatným motorem. Tuto koncepci jsme používali i v našich monopostech FSE.02 a 03 a je zobrazena na obrázku 2.2. Tuto možnost volí většina týmů, kterým se zdá pohon všech kol komplikovaný, ale už jsou na vyšší úrovni, kdy si chtějí otestovat možnosti kontroly trakce. Pohon dvěma motory používalo v loňské sezoně asi 35 týmů. Většina z nich s velmi slušnými výsledky. I pro náš tým byla tato koncepce velmi přelomová a ve své první sezoně s FSE.02 jsme díky problémům s výkonovými měniči nedosáhli

plného výkonu motorů, což jsme ale vylepšili ve voze FSE.03, se kterým jsme získali druhé místo na Formula SAE/Electric Italy 2014. Při použití dvou motorů lze opět použít dva menší motory s převodovkou nebo použít koncepci s nízkootáčkovými motory s nominálními otáčkami asi 1 000 ot/min (při použití 13“ ráfků) nebo použití vysokootáčkových motorů s převodovkami. Pro vysokootáčkové motory týmy volí otáčky obvykle mezi 8 000 až 40 000 ot/min dle typu motoru. V případě, že by byl povolen pohon pouze zadní nápravy, by tato koncepce jistě dominovala.

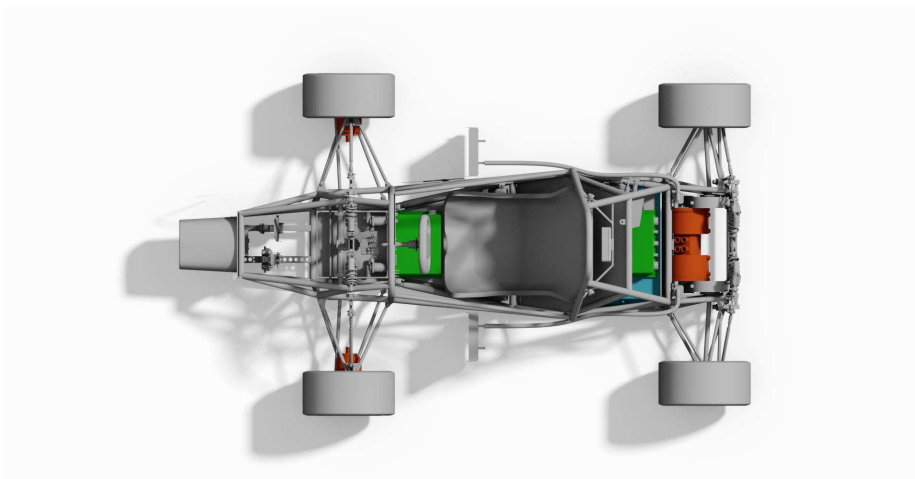
Výhodou tohoto uspořádání je možnost plné kontroly momentu na každém zadním kole, tedy i možnost sofistikovanější kontroly trakce. Výkon pak lze přesouvat například v zatáčce nebo při odlišných površích na kolo s větší adhezí a docílit lepšího výkonu než při použití diferenciálu. Dva menší motory bývají výrazně levnější, než jeden stejně výkonný a hmotnost se většinou nezvýší. Nevýhodou u většiny týmů bývá problém s výkonovými měniči, které jsou v minimálním prostoru formule umístěny těsně vedle sebe a jsou tedy velmi náchylné k rušení v případě dvou nezávislých měničů. V případě, kdy jeden měnič spíná proudy strmým sepnutím IGBT prvku a druhý měnič zrovna měří proud nebo polohu rotoru na AD převodníku, může se stát, že se měření zaruší a změří se neadekvátní hodnota. Tím pak vznikají chyby ve spínání a možné poškození IGBT prvků nebo motoru. Tento problém jsme vyřešili vývojem jednoho měniče, který měl synchronizované spínání výkonových modulů a měření v mezičase. Poté již bylo možné využít kdykoli plný výkon motorů od společnosti TG Drives.

2.2.3 Pohon všech kol

Pravděpodobně nejsložitější, ale i nejprogresivnější variantou pohonu je nezávislý pohon každého kola. Tento typ jsme zvolili i pro letošní model FSE.04x nejen proto, že první tři týmy dle World Ranking List používají pohon 4x4 [28]. Většinou zde týmy nepoužívají nízkootáčkové motory, ale snaží se jít na fyzikální maximum s otáčkami, aby motory byly co nejlehčí a daly se zabudovat přímo do kol bez výrazného zhoršení ovladatelnosti vozu. Většina týmů zde používá stejný typ motoru pro přední i zadní nápravu. Tuto cestu jsem nezvolil kvůli maximálnímu přenesitelnému momentu na předních kolech, jak popisuji v sekci 2.1. Schéma našeho pohonu je na obrázku 2.4, kde je vidět umístění celé trakční cesty.

Výhody použití pohonu 4x4 je především v lepší distribuci výkonu mezi jednotlivá kola použitím pokročilé kontroly trakce nebo nejlépe torque vectoringu, tudíž v rovnoměrnějším opotřebení pneumatik, lepší ovladatelnosti i za zhoršených podmínek při jízdě na mokru a mnoho dalšího. Nevýhody tohoto pohonu mohou plynout z vyšší hmotnosti či náročnější zástavbě čtyř motorů s převodovkami. Také samotné řízení

všech motorů může být problémem.



Obrázek 2.4: Koncepce pohonu
modrá - trakční baterie, zelená - výkonové měniče, červená - motory

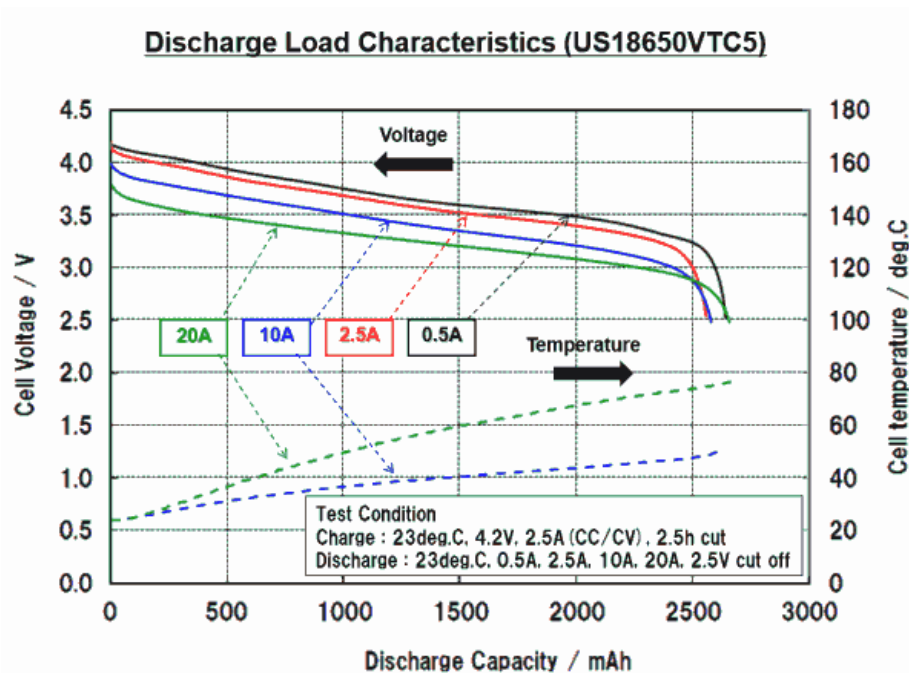
2.3 Trakční baterie

Vozidlo je vybaveno trakční baterií složenou z Lithium-Iontových článků typu Sony VTC-5 s parametry shrnutými v tabulce 2.1. Podle pravidel soutěže nesmíme překročit výkon odebraný z baterie o velikost 80 kW. Z tabulky 2.1 tedy snadno zjistíme, že při minimálním napětí baterie 180 V a proudu 400 A je maximální výkon 72 kW. Takto nízký výkon je ale až od napětí 2,77 V na článek, nacházíme se tedy v oblasti, kdy napětí už velmi prudce klesá a článek již má poslední asi 3 % kapacity, jak je patrné z charakteristiky článku 2.5.

Jmenovité napětí	259,2 V
Maximální napětí	302,4 V
Minimální napětí	180 V
Maximální proud	330 A
Maximální špičkový proud (10 s)	400 A
Konfigurace článků	72s11p
Celkový počet článků	792
Kapacita článku	2,6 Ah
Celková kapacita	7,4 kWh

Tabulka 2.1: Parametry baterie

Výkon 80 kW tedy můžeme dělit libovolně mezi motory s vědomím, že při akceleraci v přímém směru je na zadních kolech maximální přenositelný moment 350 Nm. Ten se ještě může v zatáčce pro vnější kolo zvýšit a na předních kolech je maximální moment



Obrázek 2.5: Vybíjecí charakteristika článku Sony VTC-5 [6]

20 Nm. Z toho by vyplývá obrovský nepoměr předních a zadních motorů, ale přední motory jdou použít především při rekuperaci a jako pomoc při průjezdu zatáčkou. Toto téma detailněji rozpracovává kolega Stanislav Divín ve své diplomové práci na téma: Adaptivní skluzová regulace pohonu elektromobilu [7]. Parametrům motorů se budu detailněji věnovat v kapitole 2.5.

2.4 Výkonový měnič

Mezi akumulátorem a motory je kromě pojistky a stykačů nejdůležitější výkonový měnič pro řízení celého pohonu. Koncepce pohonu je na obrázku 2.4. Z centrální baterie umístěné téměř v těžišti vozu je rozvedeno stejnosměrné napětí co nejblíže předním a zadním motorům do jejich výkonového měniče. Vždy dva motory jsou napájeny z jednoho dvojměníče, který zajišťuje spínání výkonových prvků, měření polohy a proudu v různé okamžiky. V měniči jsou použity inteligentní výkonové moduly firmy Fuji Electric 7MBP400VEA060-50. Každý modul ovládá jeden motor a jeho parametry jsou: Nominální proud 400 A (68%), proudová špička 800 A (1 ms), maximální vstupní napětí 600 V. Spínací frekvence je konstantně 16 kHz. Inteligentní výkonové moduly mají zabudované budiče IGBT tranzistorů, napájecí, proudové, podpětové, teplotní a další ochrany [8].

2.5 Motory

Jak už bylo popsáno, pro pohon vozu byly zvoleny čtyři motory. Tento požadavek vyplynul díky lepšímu využití trakce a zároveň možnosti řízení jednotlivých kol. V další kapitole bude na základě průzkumu trhu a nebo mých simulací rozhodnuto, jaký motor se do vozu použije. Tento průzkum byl prováděn paralelně s výběrem vhodné koncepce a i na jeho základě jsme posuzovali vhodnost použití jednoho či více motorů.

Požadavek točivého momentu na každé ze zadních kol byl 330 Nm a na každé přední kolo 30 Nm, jak vyplývá ze sekce 2.1.2. Protože se v zatáčce přenositelné momenty na vnějších kolech zvyšují, rozhodli jsme se pro točivý moment 350 Nm na zádním kola a na přední kola 50 Nm. Tento požadavek jsme se rozhodli splnit použitím převodovek pro snížení hmotnosti motorů a celého pohonného ústrojí. Jak je patrné z kapitoly 4.

Maximální otáčky motorů jsme chtěli udržet pod $9\,000\text{ ot min}^{-1}$ kvůli použitým výkonovým prvkům a značným odstředivým hmotám rotoru. První požadavek byl zastavět všechny motory do kol, což se ale na zadní nápravě nepovedlo kvůli příliš vysoké hmotnosti motoru s převodovkou i tím zvýšení hmotnosti neodpružených hmot.

3 Kapitola 3

Stanovení základních parametrů motoru

Podle jasně zadaných parametrů dynamiky vozidla jsem do tabulky 3.1 shrnul jízdní odpory a parametry potřebné pro dostatečnou dynamiku vozu. Z ní budu vycházet při dalších výpočtech.

název	veličina a jednotka	velikost
hmotnost vozu	m (kg)	300
tíhové zrychlení	g (m s^{-2})	9,81
součinitel valivého odporu	ξ	0,02
hustota vzduchu	r_0 (kg m^{-3})	1,29
součinitel odporu vzduchu DRS ON	$C_x \cdot S_x$	0,95
součinitel odporu vzduchu DRS OFF	$C_x \cdot S_x$	1,51

Tabulka 3.1: Parametry pro výpočet dynamiky vozu

Mezi základní jízdní odpory patří valivý odpor, který vypočteme jako

$$F_t = m \cdot g \cdot \xi = 300 \cdot 9,81 \cdot 0,02 \doteq 59 \text{ N} \quad (3.1)$$

dále pak součinitel odporu vzduchu, který je u našeho vozidla s použitím systému DRS¹ různý pro jízdu v přímém směru a jízdu v zatáčce. Pro výpočet budeme uvažovat především jízdu v přímém směru. Při jízdě v zatáčce se uplatňují i další odpory, které nebudeme blíže zkoumat. Rovnici vyjadřuji pro maximální rychlost 120 km h^{-1} , tedy $33,33 \text{ m s}^{-1}$.

$$F_0 = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_x \cdot r_0 \cdot v^2 = \frac{0,95 \cdot 1,29 \cdot 33,33^2}{2} \doteq 681 \text{ N} \quad (3.2)$$

¹„Drag Reduction System“ funguje na principu sklopení části křídla do polohy s nižším součinitelem odporu a tím pádem nižším přtlakem, který však na rovině nepotřebujeme.

Celkový jízdní odpor při maximální rychlosti tedy je

$$F_b = F_t + F_0 = 59 + 680 \doteq 740 \text{ N} \quad (3.3)$$

z velikosti jízdního odporu lze snadno získat minimální točivý moment při maximální rychlosti a z něho potřebný výkon ze vztahu:

$$M_{v-max} = F_b \cdot r = 740 \cdot 0,203 = 150 \text{ Nm} \quad (3.4)$$

$$P_{v-max} = M_{v-max} \cdot \omega = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{o_{kola}} = 150 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 33,3}{1,276} = 24\,657 \text{ W} \doteq 25 \text{ kW} \quad (3.5)$$

Tento výkon je nezbytný k pouhému udržení rychlosti a vozidlo už dále nezrychluje. Motory je tak třeba dimenzovat na vyšší výkon, resp. moment kvůli dynamice zrychlení.

V kapitole 4 jsem provedl součet momentů jednotlivých motorů společnosti TG Drives urychlující vozidlo, do grafu 4.8 jsem také umístil odpor vozu vypočtený v této kapitole a rozdíl těchto veličin, což je moment, který urychluje vozidlo. Zároveň jsem vytvořil graf 4.9, ve kterém je naznačené okamžité zrychlení vozu až do rychlosti 100 km h^{-1} . V tomto grafu je naznačeno i průměrné zrychlení, které činí $12,68 \text{ m s}^{-2}$, což je ještě nepatrně vyšší hodnota, než jsme plánovali.

4 Kapitola 4

Výběr vhodného motoru

V minulé kapitole jsem uvedl parametry pohonu potřebné pro konkurenceschopnost při použití ve voze Formula Student. Tato kapitola se tedy bude logicky věnovat výběru motoru s parametry, které by odpovídaly našemu použití a který by byl zároveň co nejlehčí a splňoval zástavbové rozměry.

Motory budu vybírat podle jejich počtu a umístění, jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.

4.1 YASA 750

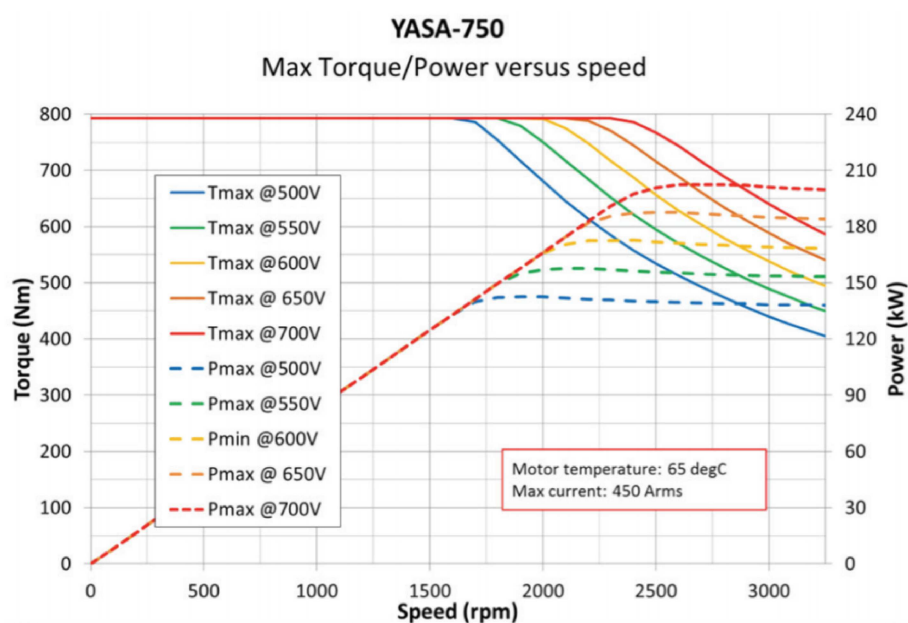
Velmi známý výrobce motorů YASA Motors používá své motory například pro zástavbu do vozů původně určených pro pohon spalovacím motorem. Tento motor je velmi vhodný pro zástavbu s jedním motorem, kdy je buď umístěn přímo doprostřed zadní osy a do něho je vložen diferenciál Drexler nebo je předsunut před osu a diferenciál je poháněn řetězovým převodem. Parametry tohoto motoru jsou shrnuty v tabulce 4.1. Výhodou tohoto motoru je vysoký točivý moment i výkon. Nevýhodou mohou být otáčky, které je vhodné redukovat směrem dolů a tím pádem je celá sestava poměrně těžká. Její cena také není z nejnižších.

Maximální točivý moment	750 Nm
Nominální točivý moment	400 Nm
Nominální otáčky	2 000 1/min
Maximální otáčky	3 250 1/min
Nominální výkon	75 kW
Maximální výkon	200 kW
Hmotnost	33 kg
Typ motoru	Axiální
Cena	160 000 Kč

Tabulka 4.1: Parametry motoru YASA 750 [22]



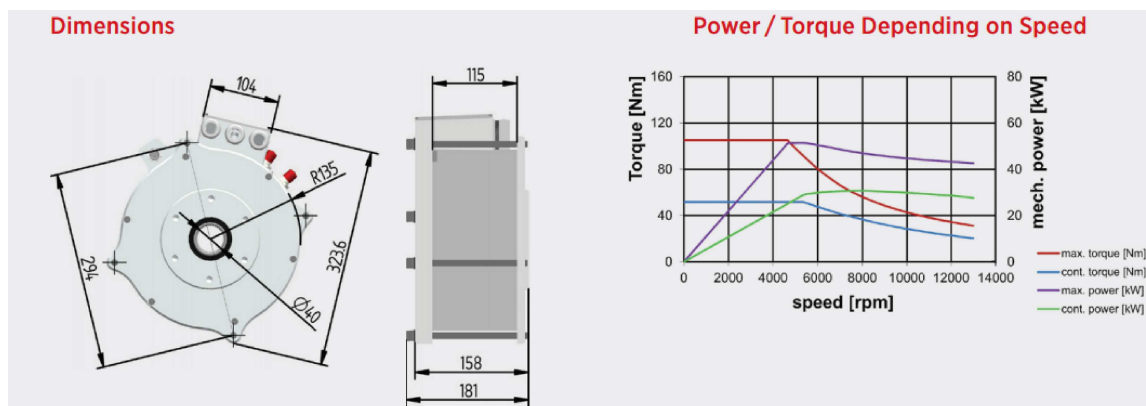
Obrázek 4.1: Motor Yasa 750 [22]



Obrázek 4.2: Graf momentu a výkonu Yasa 750 [22]

Maximální točivý moment	105 Nm
Nominální točivý moment	52 Nm
Nominální otáčky	2 000 1/min
Maximální otáčky	13 000 1/min
Nominální výkon	28 kW
Maximální výkon	51 kW
Hmotnost	25 kg
Typ motoru	Hybridní
Cena	315 100 Kč

Tabulka 4.2: Parametry motoru Brusa HSM1-10.18.04 [23]



Obrázek 4.3: Motor Brusa HSM1-10.18.04 [23]

Tento motor používal v sezoně 2014 například tým FS Tallinn z Estonska, Oxford Brookes z Velké Británie nebo SDU-Vikings z Dánska.

4.2 Brusa HSM1-10.18.04

Švýcarský výrobce elektromotorů najde použití především pro pohon obou zadních kol, vzhledem k výkonu jeho nevhodnějšího motoru HSM1-10.18.04. Tento motor je označován jako hybridní, jedná se tedy o reluktanční motor se slabšími magnety vestavěnými v rotoru. Díky této konstrukci má motor velmi dlouhou oblast konstantního výkonu [22]. Motory tohoto výrobce jsou těžké pro zástavbu do kola a je nutné u nich použít reduktory. Shrnutí jejich parametrů je v tabulce 4.2

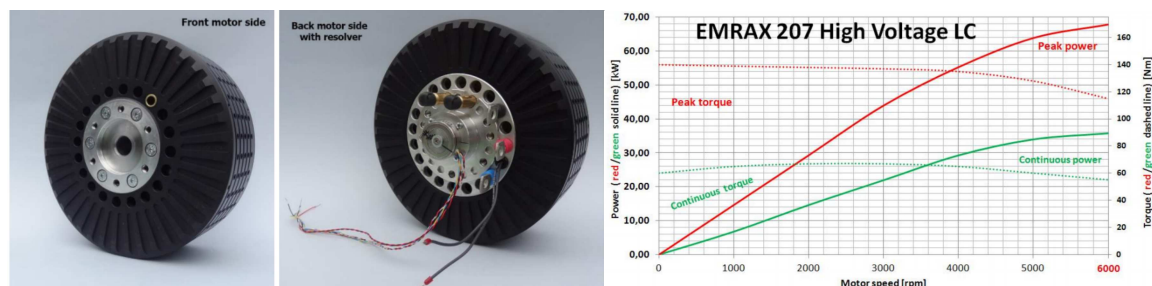
Tento motor používala v sezónách 2013 a 2014 například formule z STU Bratislava.

4.3 Enstroj Emrax 207

Slovenský výrobce Enstroj vyrábí motory pro použití do elektrovozidel pod označením Emrax. Nejmenší a nejslabší má průměr 207 mm a z toho pramení i jeho označení

Maximální točivý moment	160 Nm
Nominální točivý moment	80 Nm
Nominální otáčky	5 000 1/min
Maximální otáčky	7 000 1/min
Nominální výkon	32 kW
Maximální výkon	80 kW
Hmotnost	9,4 kg
Typ motoru	Axiální
Cena	52 000 Kč

Tabulka 4.3: Parametry motoru Emrax 207 [24]



Obrázek 4.4: Motor Emrax 207 [24]

Emrax 207. Tento motor je velmi oblíben pro svou hmotnost pouhých 9 kg. Používá se často ve dvojici, která pohání pomocí řetězového nebo řemenového převodu nezávisle kola zadní nápravy. Pro montáž do kola je tento motor ale stále těžký. Jeho výkony však vypadají velmi zajímavě a neméně zajímavá je jeho cena, která je nejnižší ze všech porovnávaných motorů. Přivedení výkonu do motoru ve mně nebudí přílišnou důvěru, když si představím, že izolační stav a krytí před vodou zajišťuje dle návodu pouze smršťovací bužírka. Pro porovnání jsou jeho parametry opět shrnuty v tabulce 4.3.

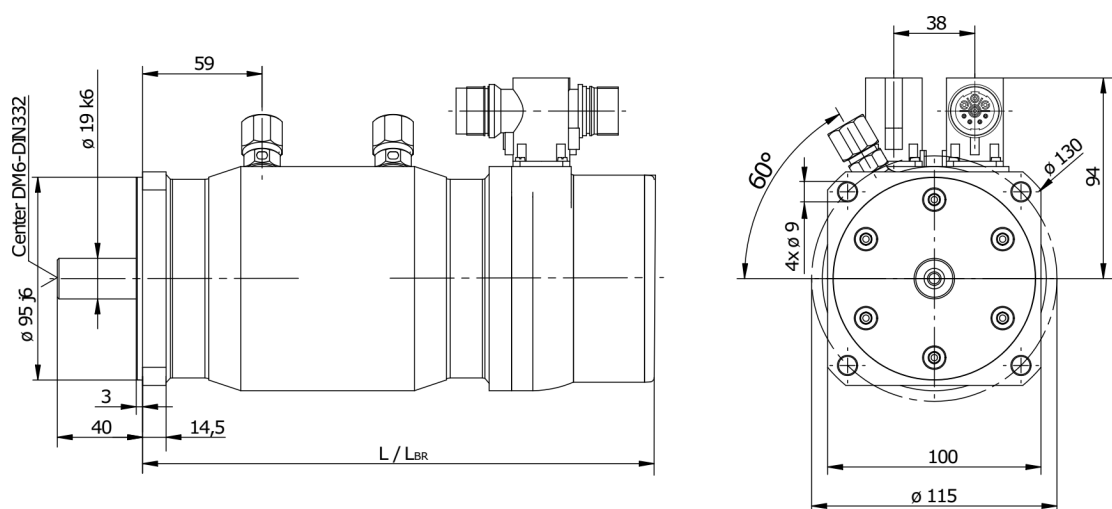
Tyto motory byly v sezoně 2014 použity například ve vozech týmů Formula Group T z Belgie, Schanzer Racing z Německého Ingolstadtu nebo BME Formula Racing Team z Maďarské Budapešti.

4.4 AMK DT5

Firma AMK se sídlem v Německu se specializuje na výrobu servomotorů například do obráběcích strojů. Jejich motory jsou ale tak všestranné, že je několik týmů s velmi dobrými výsledky používá ve svých vozech. Jejich parametry jsou totiž velice zajímavé a firma evidentně umí mnohem víc, než má v katalogu. Podle týmů, které používají jejich motory dokáží pracovat s otáčkami až 20 000 1/min a tím výrazně

	katalog	FS Delft	DHBW Stuttgart
Typ	DT5-20-10	DT5-14-10	DT5-26-10
Maximální točivý moment	60 Nm	28 Nm	60 Nm
Nominální točivý moment	19 Nm	14 Nm	25 Nm
Nominální otáčky	6 000 1/min		
Maximální otáčky	8 000 1/min	20 000 1/min	16 000 1/min
Nominální výkon	12 kW		
Maximální výkon	30 kW	27 kW	42 kW
Hmotnost	12,4 kg	4 kg	8 kg
Typ motoru	PMSM	PMSM	PMSM

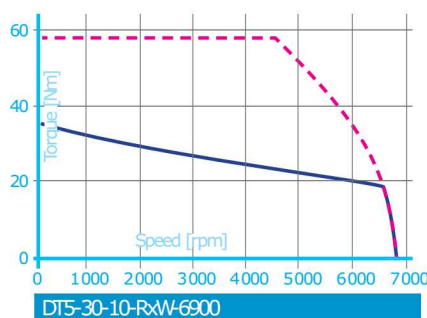
Tabulka 4.4: Parametry motorů AMK [25–27]



Obrázek 4.5: Motor AMK DT5-20-10 [27]

snížit hmotnost motorů. Bohužel se mi nepodařilo zjistit přesnou cenu motorů, ale měla by se pohybovat okolo 200 000 Kč za jeden motor.

Jak bylo shrnuto v tabulce 4.4 firma přímo spolupracuje s týmy elektroformule z nizozemského Delftu a německého Stuttgartu, jimž upravuje motory na míru a dosahuje tak zvláště v případě Delftu vynikajícího poměru výkon/hmotnost. DHBW Stuttgart používá dva motory na zadní nápravě, FS Delft používá pohon 4x4 a motory má vestavěné přímo v kolech, což při jejich hmotnosti 4 kg není problém. Tento koncept se zdá být jako jeden z nejlepších, jen se mi jeví zbytečné používat stejně výkonné motory i pro přední kola. Studenti pracující na formuli v Delftu mi tvrdili, že je výhodné mít takto silné motory pro rekuperaci, čemuž ale moc nevěřím, protože většinou lze baterii nabíjet proudy maximálně 8x menšími, než je vybíjecí proud.



Obrázek 4.6: Graf momentu motoru AMK [27]

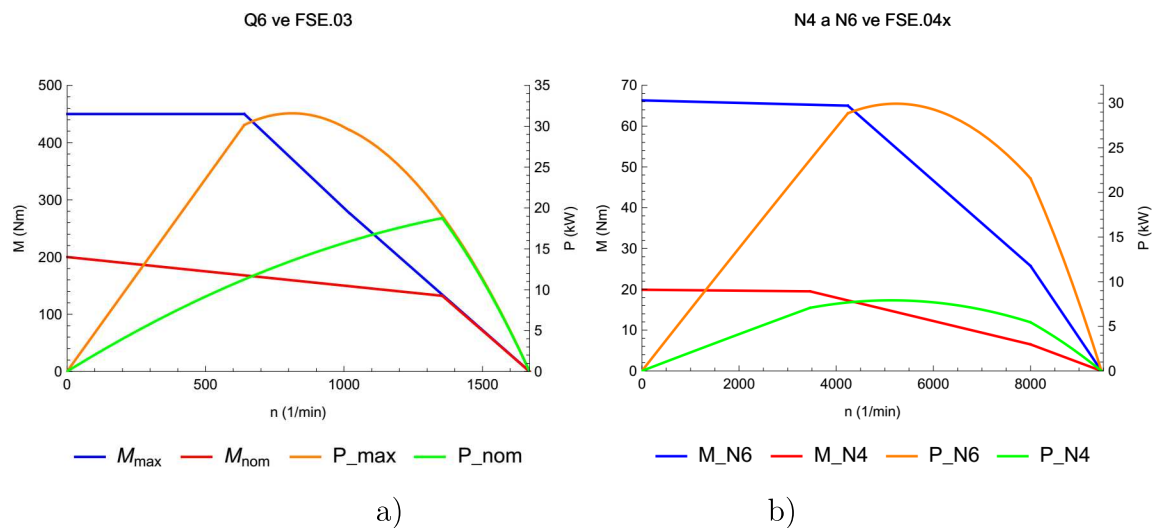
Typ / rok	Q6/2014	N6-zadní/2015	N4-přední/2015
monopost / počet kusů	FSE.03 / 2	FSE.04 / 2	FSE.04 / 2
Maximální točivý moment	450 Nm	66 Nm	20 Nm
Nominální točivý moment	150 Nm	10 Nm	4,5 Nm
Nominální otáčky	1 000 1/min	6 666 1/min	8 000 1/min
Maximální otáčky	1 670 1/min	9 460 1/min	9 460 1/min
Nominální výkon	19 kW	9 kW	4 kW
Maximální výkon	32 kW	30 kW	8 kW
Hmotnost	19 kg	9 kg	3,5 kg
Typ motoru	PMSM	PMSM	PMSM

Tabulka 4.5: Parametry motorů TG Drives

4.5 TG Drives

Česká společnost TG Drives dodává servopohony pro stroje a zařízení v průmyslové automatizaci. Náš tým s ní spolupracuje už tři roky a vždy se pro nás snaží přizpůsobit motor z jejich portfolia nebo vyvinout nový motor dle našich požadavků. I pro letošní ročník jsme je proto oslovili, aby pro nás zkusili navrhnout motory. Loňský model využíval motory této společnosti s přímým náhonem na zadní nápravu. Tyto motory byly o něco těžší, než vysokootáčkový motor s převodovkou, ale jednoduchost konstrukce bez přidání částí jako jsou právě náročná převodovka byla v loňském roce prioritou. Do tabulky 4.5 jsem shrnul parametry motorů z loňské (Q6) a letošní (N4, N6) sezony, které nám firma nabídla. Tyto parametry jsou názorněji zaneseny v grafech 4.5. Na prvním grafu je zanesen jak maximální, tak nominální výkon, na druhém je pro přehlednost již jen maximální výkon, ale pro přední i zadní motory zároveň.

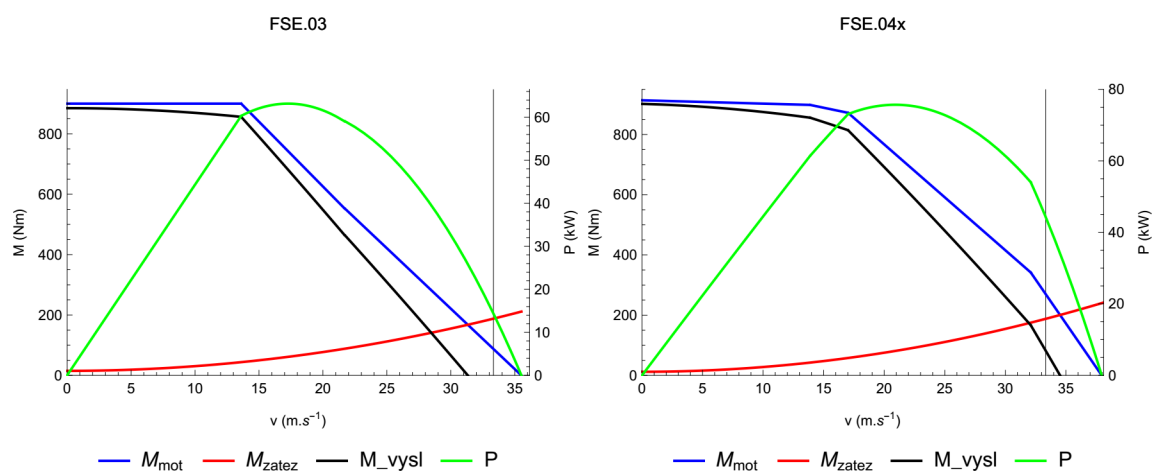
Aby bylo snazší ukázat, která koncepce bude mít lepší dynamické vlastnosti, jsem sestrojil součet všech momentů, které jsou omezeny přenositelným momentem v danou chvíli a dal jsem tyto momenty do grafu společně se zátěžným momentem pro



Obrázek 4.7: Parametry motorů TG Drives pro FSE.03 a FSE.04x

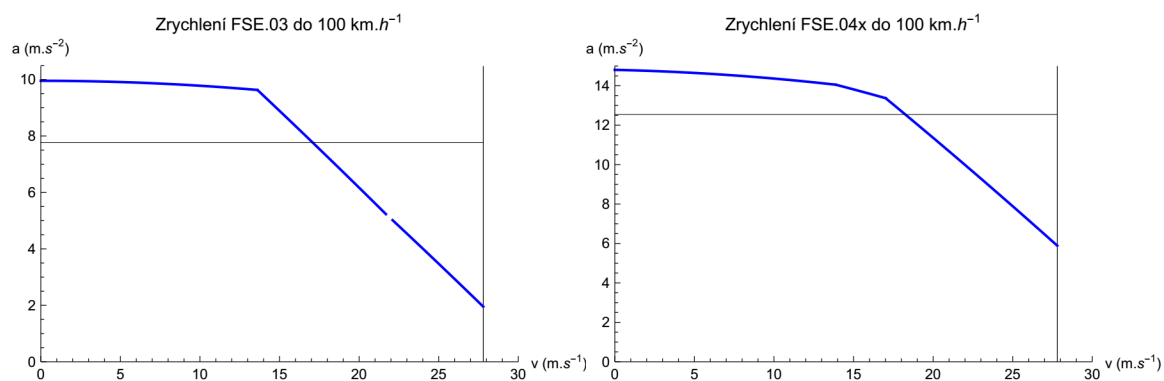
- a) Výkon a moment motoru Q6 - přímý náhon, dva motory na zadní nápravě
 b) Výkon a moment motorů N4, N6 – s převodovkou $i=5,3$, na nápravě 2 motory

danou rychlost vozu, výsledným momentem a celkovým výkonem pro vozy FSE.03 a FSE.04. Tyto grafy jsou na obrázku 4.8. Černá svislá čára značí rychlost $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Je zde vidět maximální rychlost, která u vozu FSE.03 činila $31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a u vozu FSE.04 by měla být $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 4.8: Součet momentů motorů a výsledný moment v závislosti na rychlosti

Dynamické parametry motorů možná ještě lépe zachycují grafy zrychlení v závislosti na rychlosti na obrázku 4.9. Černá čára značí průměrné zrychlení do $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, které u FSE.03 činilo $7,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a u FSE.04x by mělo s těmito motory dosáhnout až $12,68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Zrychlení z 0 na $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ by tak mělo trvat 3,43 s. a měly by se při něm projevit postupně 3 omezení: nejprve adhezní limit povrchu, poté výkonový limit 80 kW pro čerpání z baterie dle pravidel a nakonec výkonový limit motoru.



Obrázek 4.9: Grafy zrychlení na rychlosti

4.6 Vývoj vlastního motoru

Poslední možností, kterou dnes volí stále více týmů je návrh vlastního motoru přímo pro vozidlo Formula Student. Takovýto motor je obvykle počítán s minimálními bezpečnostními koeficienty a na zatížení maximálně 22 km na trati endurance a pak úplné vychladnutí. Podle normy IEC 34-1 by se tedy jednalo o provoz typu S2-20min. Tuto cestu volí ty nejzkušenější týmy a ještě většinou na vývoji spolupracují s vývojáři a výrobcí motorů. Pokud budeme chtít i nadále zlepšovat své výkony, tak se bez návrhu vlastního motoru nebo zaplacení ceny okolo jednoho milionu korun za 4 motory pravěpodobně neobejdeme. Vzhledem k ceně naší formule se zdá být mnohem rozumnější zkusit vyvinout vlastní motor a to je také druhá část mé práce.

Mezi týmy, které už svůj motor vyvinuli se řadí například tým KA-raceing z Karlsruhe nebo vedoucí tým současného hodnocení AMZ¹ Zürich ze Švýcarska. Studenti z Karlsruhe vyvíjejí vysokootáčkový PMSM motor s 20 000 1/min, výkonem 30 kW, točivým momentem 30 Nm a převodovkou s poměrem 12,6:1. Těmito motory mají osazeno každé kolo.

Ještě progresivnější tým je z ETH Zürich. Tento tým si vyvíjí vlastní reluktanční motory, jejichž maximální otáčky jsou 40 000 1/min. Každý ze čtveřice motorů má výkon 35 KW a jsou zabudovány v kolech. S těmito motory tým vytvořil světový rekord ve zrychlení, když z nuly na stokilometrovou rychlost dosáhl za 1,785 s po méně než 30 m trati. Jen pro zajímavost přikládám obrázek rotorů a zástavby do kola. Více parametrů jsem nedokázal zjistit.

¹Akademischer Motorsportverein Zürich



Obrázek 4.10: AMZ Zürich - zástavba a rotory

4.7 Závěr rešerše

Evidentně nejlepší cestou je vyrobit si motor přímo na míru, což ale není vůbec jednoduchá cesta a proto jsme se vydali směrem objednání motorů dle našich požadavků od firmy TG Drives a zároveň budu i v této práci simulovat motor, který by byl ještě lehčí a výkonnější, než nám dodala firma TG Drives.

V původním záměru bylo mnou vymodelovaný motor vyrobit a zároveň změřit jeho charakteristiky, což se z časových důvodů nestihlo a já doufám, že někdo mou práci převezme a příští rok bude jezdit formule týmu eForce s motory s mým základem. Vzhledem k úkolu změření charakteristik motoru jsem byl nucen změřit parametry motoru TG Drives N6, o tom ale až v kapitole 7.

Kapitola 5

5

Matematický model synchronního motoru

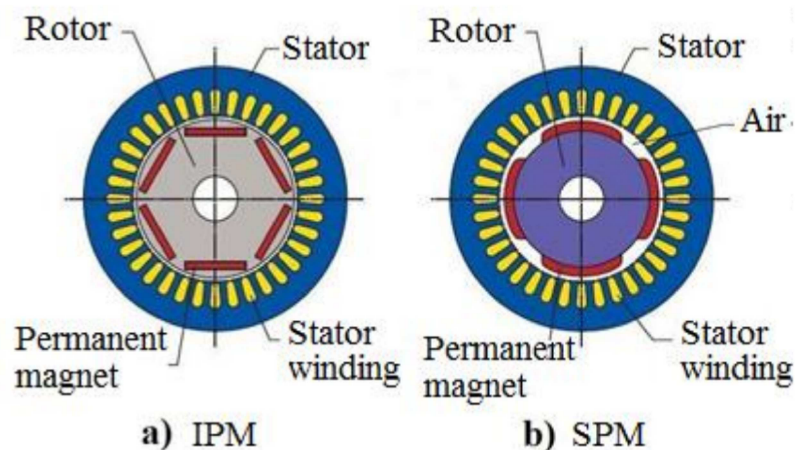
V této kapitole matematicky popíši synchronní motory s permanentními magnety. Budu počítat účinnost, ztráty a provozní omezení tohoto typu motoru.

5.1 Synchronní stroj

Synchronní jsou obvykle stejnosměrně buzené stroje s buzením zajišťovaným vinutím na rotoru. Toto vinutí je napájeno stejnosměrným proudem přes kroužky nebo bezkroužkovým budičem. Takovéto motory nejsou schopny se samy rozjet. Pro jejich start však lze použít klec nakrátko.

Tato práce se ale zabývá synchronními motory s permanentními magnety (PMSM). Na obrázku jsou tyto typy motorů přehledně rozdělené. U PMSM motorů se buzení realizováno permanentními magnety, které jsou upevněny na rotoru a vytváří konstantní magnetické pole. Tyto motory lze dělit na IPM (magnety uvnitř rotoru) a SPM (magnety na povrchu rotoru). U uvnitř montovaných magnetů lze pozorovat kolísání indukčnosti závislé na poloze rotoru. Tento rotor se chová obdobně jako rotor s vyniklými póly, což je způsobeno nižší permeabilitou (vyšší reluktancí) permanentních magnetů než má ocel rotoru. Tento typ motoru se v anglické literatuře označuje jako „Inverse salient machine“ nebo „PMSM with isotropic rotor.“ Naproti tomu u povrchově montovaných magnetů je permeabilita magnetů podobná permeabilitě vzduchu a rotor se tak jeví jako hladký. V anglické literatuře nazývané jako „non-salient“ nebo „anisotropic rotor.“

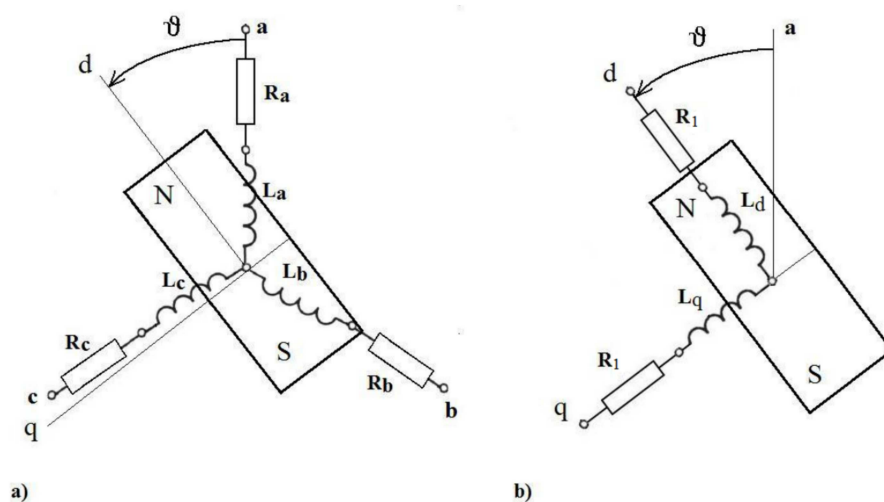
Ani jeden typ tohoto motoru se nedokáže rozběhnout připojením k síti, ale je nutné jeho řízení pomocí výkonového měniče. Následující část práce se bude zabývat matematickými modely těchto dvou typů motorů bez budícího vinutí.



Obrázek 5.1: Typy synchronních motorů bez buzení [12]

5.2 Matematický model IPM

Abychom si ulehčili práci a zpřehlednili popis motoru, použijeme jednu z transformací do dvousložkového souřadného systému. Jedna možnost je využití Clarkovy transformace - obvykle značené jako přechod z abc na $\alpha\beta$, což je systém svázaný se státorem a poté použití Parkovy transformace, obvykle značené jako přechod z $\alpha\beta$ do rotorového systému souřadnic dq . Protože se rotor otáčí synchronně, jsou periodické konstanty transformace $\alpha\beta \rightarrow dq$ konstantní a jediný rozdíl je v jejich úhlu θ . Druhou možností je přímá transformace $abc \rightarrow dq$. Tuto možnost jsem zvolil v práci pro jednodušší výklad. Pro snazší vysvětlení jsem zvolil obrázek 5.2 [2, 3, 13].


 Obrázek 5.2: Systém souřadnic a) abc , b) dq

Pro odvození matematického modelu zavádíme následující zjednodušení:

- a) Všechny přechodné děje v napájecím napětí odezněly, všechna napětí jsou harmonická.
- b) Vliv saturace magnetického obvodu je zanedbán. To znamená, že je motor provozován v lineární části magnetizační charakteristiky. Díky tomu jsou vztahy pro proudy a magnetické toky lineární, vlastní a vzájemné indukčnosti jsou nezávislé na proudu.
- c) Činný odpor a indukčnost každé fáze jsou stejné (rovnoměrné) a nezávislé na frekvenci.
- d) Statorové vinutí je rozmístěno rovnoměrně po obvodu a je sinusové. Tento předpoklad odráží skutečnost, že skutečné vinutí stroje je distribuované mezi velký počet statorových drážek. Vliv drážek je zanedbáván a vinutí je nahrazeno proudovou vrstvou na rozhraní vzduchové mezery.

Sinusově rozložené vinutí znamená nahrazení distribuovaného vinutí vinutím s různou hustotou vodičů sinusově po obvodu stroje. V důsledku toho se předpokládá sinové prostorové rozložení magnetomotorické síly ve vzduchové mezeře. Z toho plyne i zanedbání vyšších harmonických složek magnetomotorické síly.

Napěťové rovnice pro statorové vinutí jsou z obrázku 5.2 vyjádřeny jako:

$$u_i = R_i \cdot i_i + \frac{d\psi_i}{dt} \quad i = a, b, c, \quad (5.1)$$

kde R_i je odpor příslušného vinutí, i_i je proud protékající tímto vinutím a ψ_i je příslušný spřažený magnetický tok.

Podle bodu c) můžeme pro odpory vinutí psát

$$R_a = R_b = R_c = R_i. \quad (5.2)$$

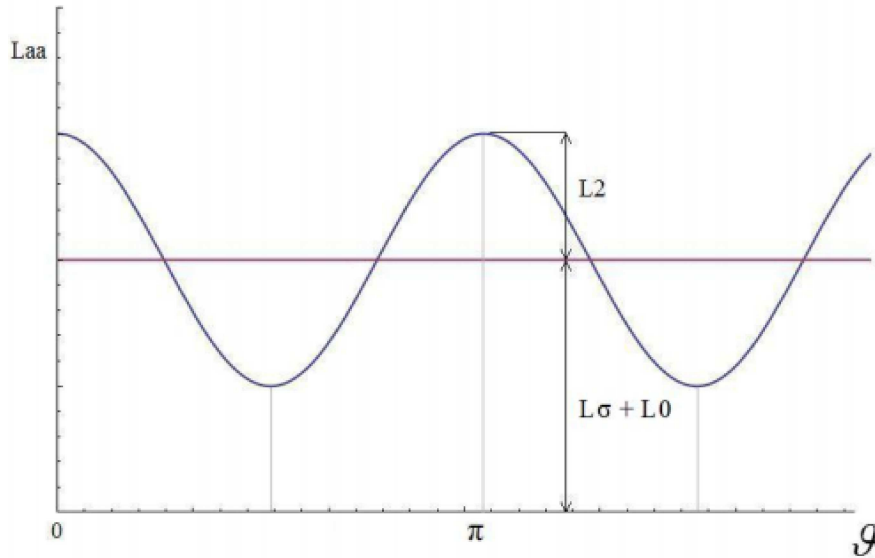
Podle bodu a) je statorové vinutí napájeno symetrickým napětím a proto můžeme psát

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad i_a + i_b + i_c = 0. \quad (5.3)$$

Z toho vyplývá, že stator nepotřebuje vyvedený střed.

Protože má IPM motor vyšší příčnou složku indukčnosti než podélnou ($L_q > L_d$), říkáme mu rotor s vyniklými póly. Během jeho rotace se periodicky střídá vlastní a vzájemná indukčnost. S polohou rotoru souvisí i magnetický tok ψ_a, ψ_b, ψ_c , které vyjádříme jako

$$\psi_a = L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + \Psi_m \cdot \cos \vartheta, \quad (5.4)$$



Obrázek 5.3: Závislost vlastní indukčnosti na poloze rotoru

$$\psi_b = L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + \Psi_m \cdot \cos(\vartheta - 120^\circ), \quad (5.5)$$

$$\psi_c = L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c + \Psi_m \cdot \cos(\vartheta - 240^\circ), \quad (5.6)$$

kde Ψ_m je magnetický tok PM, L_{xx} jsou vlastní indukčnosti statoru a L_{xy} jsou vzájemné indukčnosti statoru. Vlastní indukčnosti se mění v průběhu otáčení rotoru podle obrázku 5.3. Nejvyšší indukčnost je dosažena, když je osa vinutí zarovnána s podélnou osou magnetu.

V případě dvoupólového stroje má magnetická vodivost nejvyšší velikost pro úhly $\vartheta = 0, 180^\circ$. Z toho vyplývá, že nejnižší hodnota vlastní indukčnosti je pro úhly $\vartheta = 90, 270^\circ$. Periodická závislost vlastní indukčnosti může být přibližně vyjádřena jako

$$L_{aa} = L_\sigma + L_0 - L_2 \cdot \cos 2\vartheta, \quad (5.7)$$

$$L_{bb} = L_\sigma + L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 120^\circ), \quad (5.8)$$

$$L_{cc} = L_\sigma + L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 240^\circ), \quad (5.9)$$

Výraz $L_\sigma + L_0$ zde značí velikost vlastní indukčnosti, L_σ je rozptylová indukčnost a L_0 je střední hodnota vlastní indukčnosti mezi d a q osou, L_2 je kolísání indukčnosti,

která se mění s dvojnásobkem frekvence.

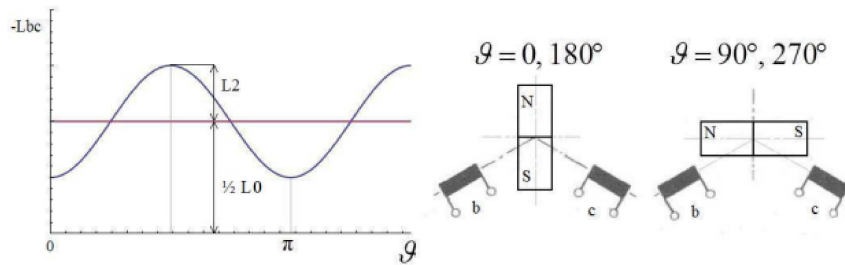
Indukčnosti L_2 a L_0 lze zapsat v následující podobě

$$L_0 = \frac{N^2}{2} \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_d} + \frac{1}{\mathfrak{R}_q} \right) = \frac{1}{2}(L_d + L_q), \quad (5.10)$$

$$L_2 = \frac{N^2}{2} \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_d} - \frac{1}{\mathfrak{R}_q} \right) = \frac{1}{2}(L_d - L_q), \quad (5.11)$$

kde \mathfrak{R}_d a \mathfrak{R}_q jsou reluktance podél os d a q . N je počet závitů každé cívky.

Podobně jako vlastní indukčnosti, tak i vzájemné indukčnosti statoru se mění při otáčení rotoru, protože se mění magnetická vodivost společného magnetického obvodu. Vlastní indukčnost L_{bc} je maximální pro $\vartheta = 90, 270^\circ$ a minimální pro $\vartheta = 0, 180^\circ$, jak je vidět na obrázku 5.4. Pokud je statorové vnutí dvou fází vzá-



Obrázek 5.4: Závislost polohy rotoru na vzájemné indukčnosti

jenně posunuto o 120° a $\cos(120^\circ) = -1/2$, vzájemné indukčnosti jsou záporné

$$L_{bc} = -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2\vartheta, \quad (5.12)$$

$$L_{ca} = -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 120^\circ), \quad (5.13)$$

$$L_{ab} = -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 240^\circ) \quad (5.14)$$

Výraz $-\frac{1}{2}L_0$ je střední hodnota vzájemní indukčnosti. Vzájemné a vlastní indukčnosti rotoru neexistují díky absenci rotorového budícího vinutí stejně, jako vzájemné indukčnosti mezi státorem a rotorem.

Zpětné elektromotorické napětí (Back-EMF) buzené permanentními magnety může být pro každou fázi psáno jako

$$e_a = \frac{d}{dt} \Psi_m \cdot \cos \vartheta = -\Psi_m \cdot \omega \sin \vartheta \quad (5.15)$$

$$e_b = \frac{d}{dt} \Psi_m \cdot \cos(\vartheta - 120^\circ) = -\Psi_m \cdot \omega \sin(\vartheta - 120^\circ) \quad (5.16)$$

$$e_c = \frac{d}{dt} \Psi_m \cdot \cos(\vartheta - 240^\circ) = -\Psi_m \cdot \omega \sin(\vartheta - 240^\circ) \quad (5.17)$$

Při vyjádření prostorového vektoru zpětného magnetomotorického napětí můžeme psát

$$e = \frac{d\hat{\psi}_m}{dt} = \frac{d(\Psi_m e^{j\vartheta})}{dt} = j\Psi_m \cdot \omega \cdot e^{j\vartheta} = j\omega\hat{\psi}_m \quad (5.18)$$

Pokud provedeme substituci indukčností z rovnic magnetického toku 5.4, 5.5, 5.6 dostaneme soustavu rovnic s periodicky se časově proměnlivými koeficienty, které mohou být vyjádřeny z matrici jako

$$[\psi] = [L] \cdot [i] + [\psi_m], \quad (5.19)$$

matice statorového magnetického toku zde reprezentuje

$$[\psi] = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

a matice indukčností je ve formě

$$[L] = \begin{bmatrix} L_\sigma + L_0 - L_2 \cdot \cos 2\vartheta & -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 240^\circ) & -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 120^\circ) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 240^\circ) & L_\sigma + L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 120^\circ) & -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2\vartheta \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 120^\circ) & -\frac{1}{2}L_0 - L_2 \cdot \cos 2\vartheta & L_\sigma + L_0 - L_2 \cdot \cos 2(\vartheta - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

matice proudů je zapsána jako

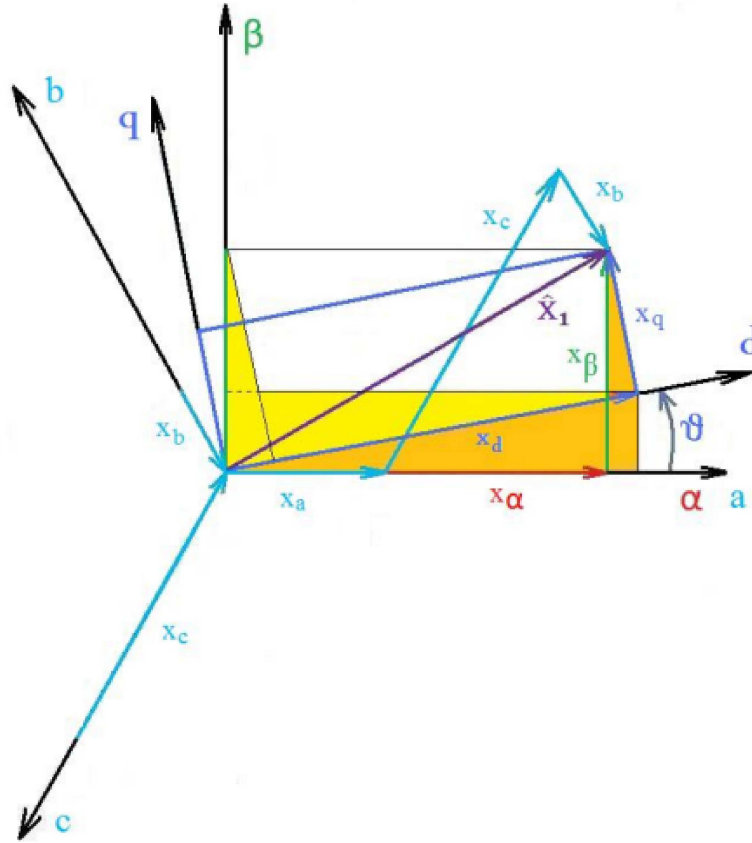
$$[i] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

a konečně matice toků permanentních magnetů je

$$[\psi] = \begin{bmatrix} \Psi_m \cdot \cos \vartheta \\ \Psi_m \cdot \cos(\vartheta - 120^\circ) \\ \Psi_m \cdot \cos(\vartheta - 240^\circ) \end{bmatrix}. \quad (5.23)$$

5.2.1 Přímá transformace abc na dq systém souřadnic

Lineární transformace je prostředkem k tomu, aby se veličiny nezávislé na poloze rotoru staly konstantami. Mezi tyto veličiny řadíme napětí, proud a magnetický tok. Transformace do rotorového systému souřadnic ($dq0$) se často používá právě pro synchronní stroje. Symbolem d se značí podélná osa ¹ a osa q se nazývá příčná.



Obrázek 5.5: Transformace souřadnic

Obrázek 5.5 ukazuje vztah mezi třífázovým souřadným systémem abc a dvoufázovými systémy dq pro rotor a $\alpha\beta$ pro stator.

$$\hat{X}_1 = x_d + jx_q = (x_\alpha + jx_\beta)e^{-j\vartheta} = \sqrt{\frac{2}{3}}(x_a + x_b \cdot e^{j120^\circ} + x_c \cdot e^{j240^\circ}) \cdot e^{j\vartheta}, \quad (5.24)$$

kde \hat{X}_1 reprezentuje prostorový vektor napětí, proudu nebo spřaženého magnetického toku. Transformační konstanta $\sqrt{2/3}$ značí neměnný výkon.

¹směrem k severu magnetu

V maticovém zápisu můžeme Parkovu transformaci z abc do $dq0$ zapsat jako

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \cos(\vartheta - 120^\circ) & \cos(\vartheta - 240^\circ) \\ -\sin \vartheta & -\sin(\vartheta - 120^\circ) & -\sin(\vartheta - 240^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

a z ní vyjádřená inverzní Parkova transformace pro převedení ze systému $dq0$ zpět do třífázového systému abc

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\vartheta - 120^\circ) & -\sin(\vartheta - 120^\circ) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\vartheta - 240^\circ) & -\sin(\vartheta - 240^\circ) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix}. \quad (5.26)$$

Pro odvození transformovaných napěťových rovnic je nejprve potřeba vyjádřit rovnici magnetického toku v závislosti na fázi z rovnice 5.26

$$\psi_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_d \cdot \cos \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_q \cdot \sin \vartheta + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \psi_0. \quad (5.27)$$

Následně tuto rovnici zderivujeme podle času, kde $\vartheta = \omega t + \vartheta_0$ a dostaneme

$$\frac{d\psi_a}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\psi_d}{dt} \cos \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \omega \psi_d \cdot \sin \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\psi_q}{dt} \sin \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \omega \psi_q \cdot \cos \vartheta + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d\psi_0}{dt}, \quad (5.28)$$

poté zavedu substituci do napěťových rovnic fáze a $\frac{d\psi_a}{dt} = u_a - R_a \cdot I_a$ podle rovnice 5.1 pro u_a a i_a použijeme transformované hodnoty z 5.26

$$\frac{d\psi_a}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_d \cdot \cos \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_q \cdot \sin \vartheta + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_0 - R_1 \cdot \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_d \cdot \cos \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_q \cdot \sin \vartheta + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_0 \right) \quad (5.29)$$

porovnáním rovnic 5.28 a 5.29 dostáváme

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\psi_d}{dt} \cos \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \omega \psi_q \cdot \cos \vartheta = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_d \cdot \cos \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot R_1 \cdot i_d \cdot \cos \vartheta \quad (5.30)$$

$$-\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \omega \psi_d \cdot \sin \vartheta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\psi_q}{dt} \sin \vartheta = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_q \cdot \sin \vartheta + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot R_1 \cdot i_q \cdot \sin \vartheta \quad (5.31)$$

Statorový sprážený magnetický tok je transformován a tak ho vložíme do rovnice Parkovy transformace 5.25

$$\psi_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_a \cdot \cos \vartheta + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_b \cdot \cos(\vartheta - 120^\circ) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_c \cdot \cos(\vartheta - 240^\circ) \quad (5.32)$$

$$\psi_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_a \cdot \sin \vartheta + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_b \cdot \sin (\vartheta - 120^\circ) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \psi_c \cdot \sin (\vartheta - 240^\circ) \quad (5.33)$$

toky ψ_a , ψ_b , ψ_c získáme z rovnic 5.4, 5.5, 5.6.

5.2.2 Model PMSM motoru v rotorové soustavě souřadnic dq

Úpravou rovnic 5.30 a 5.31 dostáváme transformované napěťové rovnice pro statorového vinutí v následujícím tvaru

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \quad (5.34)$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt}, \quad (5.35)$$

Neuvažujeme zbytkové proudy, protože jsme použili zjednodušení na souměrnou napájecí síť.

Napětí generované časově proměnným magnetickým tokem $d\psi_d/dt$ a $d\psi_q/dt$ jsou nazývány transformační napětí. Napětí generované otáčením rotoru $\omega\psi_d$ a $\omega\psi_q$ jsou nazývány rotačními napětími. Spřažený magnetický tok podélné a příčné indukčnosti po aplikaci rovnice 5.32 jsou ve tvaru

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + \Psi_m \quad (5.36)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q, \quad (5.37)$$

kde podélná synchronní indukčnost L_d a příčná indukčnost L_q jsou vyjádřeny jako

$$L_d = L_\sigma + \frac{3}{2}(L_0 + L_2) \quad (5.38)$$

$$L_q = L_\sigma + \frac{3}{2}(L_0 - L_2). \quad (5.39)$$

Poměr podélné a příčné indukčností se nazývá poměr vyniklosti (saliency ratio) a je vyjádřen

$$\xi = \frac{L_q}{L_d}. \quad (5.40)$$

V případě IPM je tento poměr vyšší než 1. Dosazením rovnic 5.36 a 5.37 do napěťových rovnic 5.34 a 5.35 dostaneme následující

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \quad (5.41)$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega \cdot (L_d \cdot i_d + \Psi_m) + L_q \frac{di_q}{dt}. \quad (5.42)$$

V rovnici 5.42 je výraz obsahující zpětné magnetomotorické napětí (Back-EMF) díky permanentním magnetům. Střední hodnota je

$$E_m = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \Psi_m = 4,44 \cdot \phi_m \cdot f \cdot N \cdot k_{w1}, \quad (5.43)$$

kde N je počet závitů jedné fáze, ϕ_m je základní tok ve vzduchové mezeře a k_{w1} je základní koeficient vinutí

5.2.3 Točivý moment motoru

Vnitřní moment stroje je dán z výkonové bilance. Za předpokladu výkonové nezávislosti pro okamžitý příkon můžeme napsat.

$$p_{in} = u_d i_d + u_q i_q = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c. \quad (5.44)$$

Pokud dosadíme příkon do napěťových rovnic 5.41 a 5.42 a upravíme je, dostaneme tvar, ve kterém se příkon rozdělí mezi Jouleovo teplo statorového vinutí, magnetickou energii a vnitřní výkon.

$$p_{in} = R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) + (L_d + L_q) \frac{d}{dt} (i_d^2 + i_q^2) + \omega (L_d - L_q) i_d \cdot i_q + \omega \cdot \Psi_m \cdot i_q. \quad (5.45)$$

Vnitřní výkon vyplývá z rotačních napětí jako

$$p_i = \omega (L_d - L_q) i_d \cdot i_q + \omega \cdot \Psi_m \cdot i_q = \omega (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d). \quad (5.46)$$

Použitím převodu mezi mechanickou ω_{mech} a elektrickou úhlovou rychlostí ω , kde mechanická rychlost je p_p -krát nižší, než elektrická rychlost, dostáváme

$$\omega = p_p \cdot \omega_{mech} \quad (5.47)$$

a vydělením vnitřního výkonu úhlovou rychlostí můžeme vyjádřit moment obecného synchronního stroje

$$T = \frac{p_i}{\omega_{mech}} = p_p (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d). \quad (5.48)$$

Po dosazení spležených magnetických toků z rovnic 5.36 a 5.37 dostáváme pro třífázový IPM

$$T = \frac{3}{2} p_p \cdot \Psi_m \cdot i_q + \frac{3}{2} p_p \cdot (L_d - L_q) i_d \cdot i_q. \quad (5.49)$$

S použitím rovnice 5.40 můžeme tuto rovnici přepsat na

$$T = \frac{3}{2} p_p [\Psi_m \cdot i_q - L_d (\xi - 1) \cdot i_d \cdot i_q]. \quad (5.50)$$

Rovnice 5.49 je složena ze dvou částí, první je magnetický moment PM, druhá je reluktanční moment daný anizotropií rotoru.

Rovnice pro vyrovnání zátěžného momentu je

$$T - T_z - B_{mech} \cdot \omega_{mech} = J_{tot} \frac{d\omega_{mech}}{dt}, \quad (5.51)$$

kde B_{mech} je součinitel tření, T_z je zátěžný moment a J_{tot} je celkový moment setrvačnosti.

5.3 Matematický model SPM

Velmi nízká permeabilita permanentních magnetů (v porovnání s μ_r vzduchu), které se používají pro motory způsobuje velmi nízkou „vyniklost“ u motory typu SPM (magnety na povrchu rotoru). To znamená, že $\xi \simeq 1$, pak $L_d = L_q = L_1$.

Rovnice spřaženého magnetického toku jsou ve stejné podobě jako 5.4, 5.5, 5.6, ale vlastní indukčnosti statoru si jsou rovny nebo konstantní

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_0. \quad (5.52)$$

Podobně vzájemné indukčnosti jsou vyjádřeny jako

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = L_0 \cdot \cos 120^\circ = -\frac{1}{2} L_0. \quad (5.53)$$

Matice indukčností $[L]$ do rovnice 5.19 je

$$[L] = \begin{bmatrix} L_0 & -\frac{1}{2}L_0 & -\frac{1}{2}L_0 \\ -\frac{1}{2}L_0 & L_0 & -\frac{1}{2}L_0 \\ -\frac{1}{2}L_0 & -\frac{1}{2}L_0 & L_0 \end{bmatrix}. \quad (5.54)$$

Rovnice napětí statoru po transformaci do dq souřadnic mohou být psány jako

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega \cdot L_1 \cdot i_q + L_1 \frac{di_d}{dt}, \quad (5.55)$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega \cdot (L_1 \cdot i_d + \Psi_m) + L_1 \frac{di_q}{dt}, \quad (5.56)$$

kde $L_1 = L_\sigma + L_0$. Protože indukčnosti L_d a L_q jsou stejné, točivý moment sestává pouze z magnetického momentu

$$T = \frac{3}{2} p_p \cdot \Psi_m \cdot i_q. \quad (5.57)$$

5.4 Výpočet ztrát stroje a jeho účinnosti

Jak bylo zmíněno výše, příkon motoru se částečně ztratí v Jouleově ztrátách ve vinutí (ztráty v mědi). To však nejsou jedinné ztráty, které PMSM motory mají. Jako další jdou uvažovat ještě mechanické ztráty, ztráty vířivými proudy a ztráty v železe. Tyto ztráty nebyly uvažovány v modelu stroje a budou vyjádřeny později.

Mechanické ztráty ΔP_{mech} jsou způsobeny třením v ložiscích a ventilací vzduchu motorem. Třecí ztráty jsou lineární s otáčkami a ventilační závisí na otáčkách kvadraticky.

Ztráty rozptylem ΔP_s jsou primárně způsobeny nerovnoměrným rozložením vinutí v drážkách, nesinusovým magnetomotorickým napětím. Ztráty rozptylem jsou závislé na zátěži a nelze je tak přesně stanovit.

5.4.1 Ekvivalentní obvod pro výpočet ztrát v železe

Ve feromagnetických částech stroje, jakými jsou stator a rotor včetně magnetů jsou generovány ztráty vířivými proudy ΔP_e . V plechách statoru a rotoru působí ještě hysterézní ztráty ΔP_h . Tyto ztráty jsou souhrně nazývány magnetické ztráty.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_e \quad (5.58)$$

Hysterézní ztráty vznikají přemagnetováváním feromagnetického materiálu, kde se část energie převede na teplo. Tyto ztráty jsou úměrné druhé mocnině frekvence a magnetické indukce.

$$\Delta P_h = f \cdot B_{max}. \quad (5.59)$$

Hysterézní ztráty jsou též přímo úměrné ploše hysterézní smyčky.

Ztráty vířivými proudy vznikají, protože feromagnetický materiál je vodivý a magnetický tok kolem sebe indukuje elektrický proud a tento proud opět vytváří magnetické pole, které zeslabuje budící magnetické pole. Pro ztráty vířivými proudy platí vztah

$$\Delta P_h = \frac{(f \cdot B_{max} \cdot r)^2}{\rho}, \quad (5.60)$$

kde f je frekvence buzení, B_{max} je maximální indukce, r je tloušťka materiálu a ρ je

rezistivita materiálu.

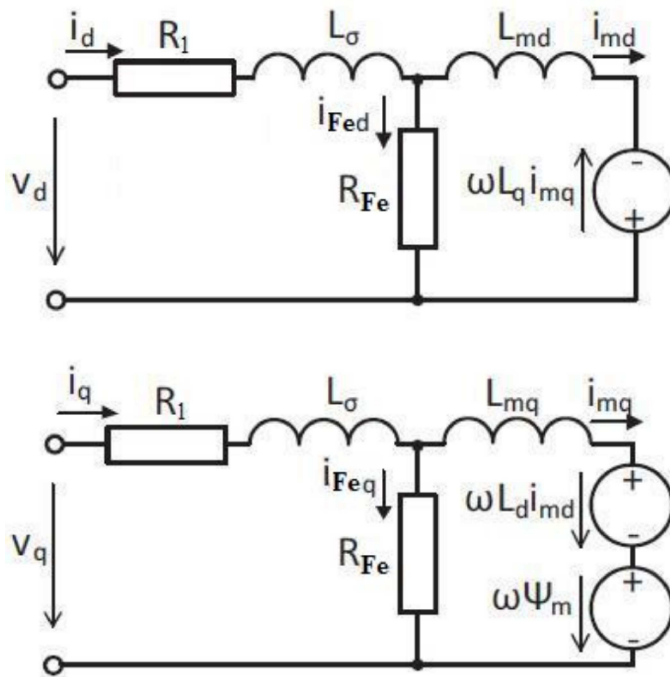
Ztráty v rotoru jsou zanedbatelné, protože rotuje synchronně se statorovým polem a ztráty rozptylem v mědi a železe jsou zanedbatelné. Je však potřeba dávat pozor na teplotu rotoru, která může způsobit odmagnetování permanentních magnetů. Většina použitých rovnic pro výpočet ztrát v železe vychází z Steinmetzovy rovnice

$$\Delta P_{Fe} = k \cdot f^\alpha \cdot B_{max}^\beta, \quad (5.61)$$

kde k, α, β jsou materiálové konstanty, které se určují experimentálně. Tato rovnice platí pouze pro sinové průběhy buzení.

Stator je vždy tvořen z plechů, které jsou od sebe oddělené magneticky nevodivou vrstvou, která snižuje ztráty vířivými proudy. Pokud motor produkuje harmonické průběhy do rotoru, je rotor také tvořen plechy.

Obrázek 5.6 ukazuje ekvivalentní obvod PMSM včetně ztrát v železe.



Obrázek 5.6: Ekvivalentní obvod v dq respektující ztráty v železe [14]

Statorové proudy jsou rozděleny na magnetizační proud a proud rezistorem, který reprezentuje ztráty v železe.

$$i_d = i_{Fed} + i_{md} \quad (5.62)$$

$$i_d = i_{Feq} + i_{mq} \quad (5.63)$$

Podobně vlastní indukčnosti jsou rozděleny na

$$L_d = L_\sigma + L_{md} \quad (5.64)$$

$$L_q = L_\sigma + L_{mq}. \quad (5.65)$$

Z toho napěťové rovnice jsou vyjádřeny následovně

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_{mq} + L_\sigma \frac{di_d}{dt} \quad (5.66)$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega \cdot (L_d \cdot i_{md} + \Psi_m) + L_\sigma \frac{di_q}{dt} + L_{mq} \frac{di_{mq}}{dt}. \quad (5.67)$$

Nyní můžeme vyjádřit proud tekoucí odporem R_{Fe} z obrázku 5.6 v podobě

$$i_{Fed} = \frac{1}{R_{Fe}} (-\omega \cdot L_q \cdot i_{mq} + L_{md} \frac{di_{md}}{dt}) \quad (5.68)$$

$$i_{Feq} = \frac{1}{R_{Fe}} \left(-\omega \cdot (L_d \cdot i_{md} + \Psi_m) + L_{md} \frac{di_{md}}{dt} \right). \quad (5.69)$$

Elektrické ztráty rozdělíme na Jouleovy ztráty v mědi a v železe

$$\Delta P_{el} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} = \frac{3}{2} R_1 (i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2} R_{Fe} (i_{Fed}^2 + i_{Feq}^2) \quad (5.70)$$

Substitucí z rovnic 5.67, 5.68, 5.69 ve stacionárním stavu (nulová derivace a konstantní elektrická úhlová rychlost $\omega = \Omega$) dostaneme následující rovnice [14]

$$\Delta P_{Cu} = \frac{3}{2} R_1 \left[\left(I_{md} - \frac{\Omega \cdot L_q \cdot I_{mq}}{R_{Cu}} \right)^2 + \left(I_{mq} + \frac{\Omega (\Psi_m + L_d \cdot I_{md})}{R_{Cu}} \right)^2 \right] \quad (5.71)$$

$$\Delta P_{Fe} = \frac{3}{2} \frac{\Omega^2}{R_{Fe1}} \left[(L_q \cdot I_{mq})^2 + (\Psi_m + L_d \cdot I_{md})^2 \right] \quad (5.72)$$

Napěťové rovnice SPM jsou podobné ($L_d = L_q = L_1$), takže ztráty v železe a mědi jsou stejné. Napětí osy d pro synchronní reluktanční motor je stejné jako 5.66 a pro osu q platí vztah 5.67, jen zde chybí magnetický tok $\Psi_m = 0$. Stejně lze řešit rovnice 5.71 a 5.72.

5.4.2 Výpočet účinnosti

Pro výpočet účinnosti je potřeba nejprve vyjádřit celkové ztráty P_{tot} , které se spočítají jako součet všech dílčích ztrát, tedy

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_s. \quad (5.73)$$

Poté lze účinnost jednoduše vyjádřit jako podíl výstupního mechanického výkonu P_{out} a elektrického příkonu P_{in}

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P_{tot}} = \frac{P_{in} - \Delta P_{tot}}{P_{in}} \quad (5.74)$$

5.5 Proudové a napěťové omezení

Pro řízení motoru je vhodné udržovat velikost napětí a úhel proudu k dosažení nejvyššího momentu při konstantním proudu, tedy konstantním magnetickém toku. Vztah mezi napětím a proudem je patrný z rovnice 5.43

$$\omega = \frac{E_1}{\psi_1} = \frac{E_m}{\Psi_m}, \quad (5.75)$$

kde E_1 je indukované elektromotorické napětí generované celkovým magnetickým tokem ψ_1 .

Napájecí napětí je součet fázorů elektromotorického napětí a proudu vinutím s odporem R_1 .

$$\hat{U}_1 = \hat{E}_1 + R_1 \cdot \hat{I}_1 \quad (5.76)$$

Při zanedbání úbytku napětí na vinutí 5.76 vidíme, že otáčky jsou přímo úměrné napětí (t.j. $\omega \approx U_1$). Maximální otáčky jsou tedy evidentně omezeny výstupním napětím výkonového měniče

$$\sqrt{u_d^2 + u_d^2} \leq U_{1max}, \quad (5.77)$$

kde U_{1max} je amplituda prostorového vektoru statorového napětí. Tato oblast se nazývá oblast konstantního momentu.

Při zvyšování otáček dochází k oslabování magnetického toku stejně jako dochází ke snižování momentu motoru, což je zřejmé ze vztahu 5.75.

Magnetický tok můžeme přibližně považovat rovný spřaženému magnetickému toku.

$$\omega \approx \frac{1}{\phi} \approx \frac{1}{\psi_1}, \quad (5.78)$$

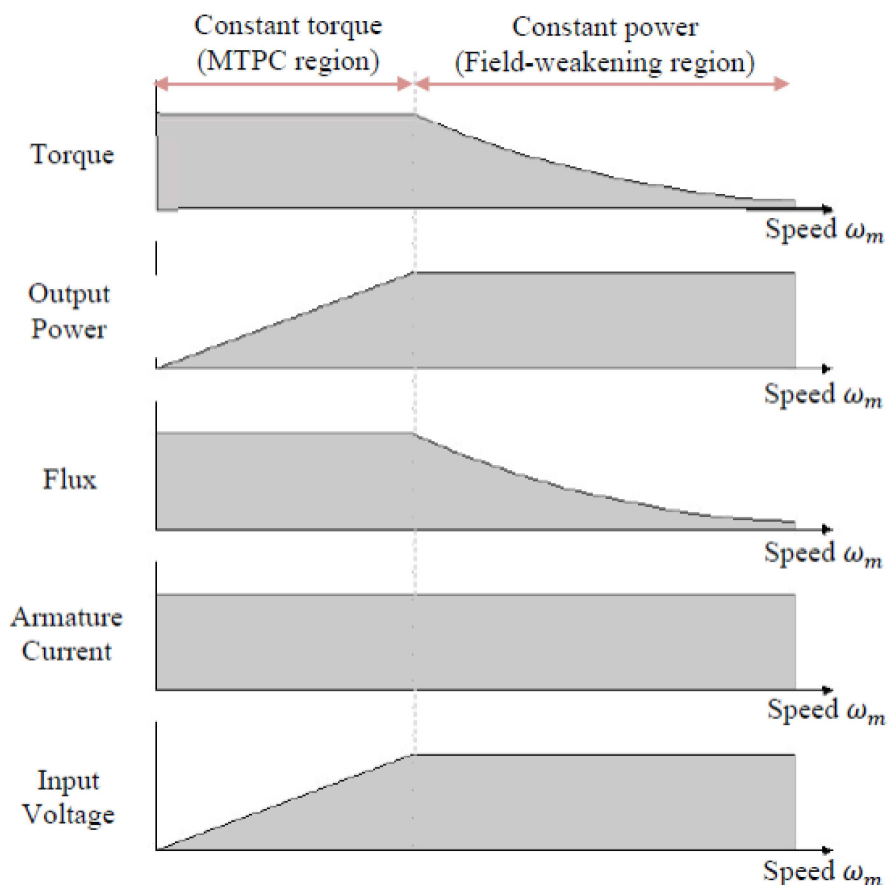
kde je sprážený magnetický tok pro IPM

$$\psi_1 = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} = \sqrt{(L_d \cdot i_d + \Psi_m)^2 + (L_d \cdot i_d)^2}. \quad (5.79)$$

Maximální točivý moment vytvářený strojem je závislý na proudovém omezení, což je dáno parametry stroje. Proudový limit lze vyjádřit jako

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{1max}, \quad (5.80)$$

kde I_{1max} je amplituda prostorového vektoru statorového proudu. Tato oblast se na obrázku 5.7 nazývá oblast odbuzování (FW region) nebo oblast konstantního výkonu (CPSR - constant power speed region). [15]



Obrázek 5.7: Ideální charakteristiky motoru [15]

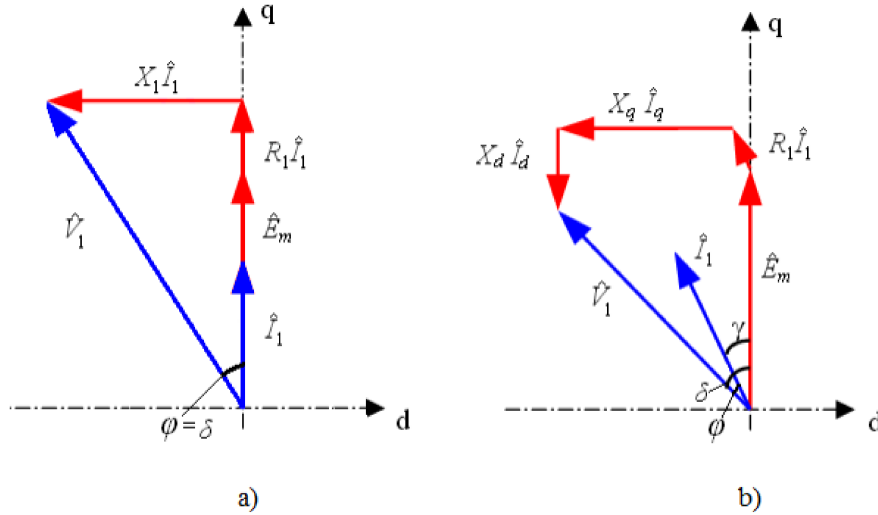
Použitím napěťových rovnic IPM ve fázorovém tvaru 5.41, 5.42 získáme

$$\hat{U}_1 = R_1 \cdot \hat{I}_1 + jX_d \cdot \hat{I}_d - jX_q \cdot \hat{I}_q + \hat{E}_m, \quad (5.81)$$

podobně z rovnic 5.55 a 5.56 pro SPM získáme

$$\hat{U}_1 = R_1 \cdot \hat{I}_1 + jX_1 \cdot \hat{I}_1 + \hat{E}_m. \quad (5.82)$$

Tyto rovnice mohou být použity ke konstrukci fázorového diagramu pro SPM a IPM jako na obrázku 5.8



Obrázek 5.8: Fázorový diagram a) SPM, b) IPM

Použitím proudového úhlu γ , který je definován jako úhel mezi osou q , která má stejný směr jako vektor indukovaného napětí \hat{E}_m a vektorem statorového proudu \hat{I}_1 . Složky d a q statorového proudu tedy jsou

$$I_d = -I_1 \cdot \sin \gamma \quad (5.83)$$

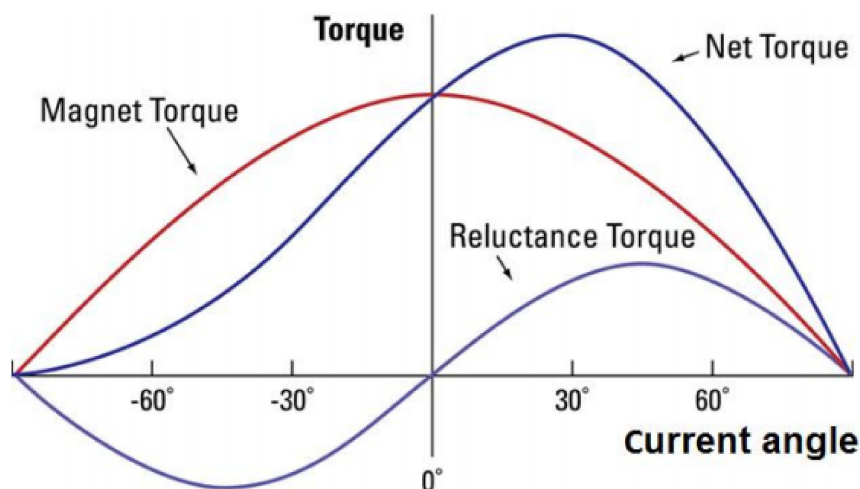
$$I_q = I_1 \cdot \cos \gamma. \quad (5.84)$$

Pak je moment produkovaný synchronním strojem za použití rovnic 5.49 a 5.83, 5.84 vyjádřen jako

$$T = \frac{3}{2} p_p \cdot \Psi_m \cdot I_1 \cdot \cos \gamma + \frac{3}{4} p_p \cdot L_d (\xi - 1) I_1^2 \cdot \sin 2\gamma. \quad (5.85)$$

Pro danou hodnotu statorového proudu může být maximální moment získán vhodným úhlem. V případě momentu od magnetů rotoru, tedy prvního členu v 5.85 je úhel $\gamma = 0^\circ$. Pokud je úhel $\gamma > 0^\circ$, motor pracuje v oblasti odbuzování a reluktanční moment (druhý člen v 5.85) je maximální pro úhel $\gamma = 45^\circ$. Toto tvrzení ale platí pouze pro ideální motor, kde se neuplatňuje saturace. Indukčnosti L_d , L_q , zvláště u IPM motorů, nejsou konstantní, ale velmi se mění s nasycením [18]. Proto je úhel

proudu γ k dosažení maximálního momentu různý pro různé uspořádání motoru. Obrázek 5.9 ilustruje momenty produkované PMSM motorem.



Obrázek 5.9: Momenty vznikající v PMSM motor jako funkce proudového úhlu [19]

5.5.1 Provozní limity IPM

K vyjádření provozních limitů uvažujeme zjednodušující předpoklady: ustálený stav, sinusové napájecí napětí a proud s konstantní amplitudou a frekvencí. Proto mají napětí a proudy rotorového souřadného systému (U_d, U_q, I_d, I_q) konstantní amplitudu.

V ustáleném mohou být napěťové rovnice 5.34, 5.35 přepsány do tvaru [16]

$$U_d = R_1 \cdot I_d - \Omega \cdot L_q \cdot I_q \quad (5.86)$$

$$U_q = R_1 \cdot I_q + \Omega \cdot (L_d \cdot I_d + \Psi_m). \quad (5.87)$$

Substitucí rovnic 5.86 a 5.87 do rovnice 5.77 a se zanedbáním odporu statorového vinutí dostáváme

$$(\Omega \cdot L_q \cdot I_q)^2 + (\Omega \cdot (L_d \cdot I_d + \Psi_m))^2 \leq U_{1max}^2 \quad (5.88)$$

a po úpravě tohoto vztahu můžeme psát

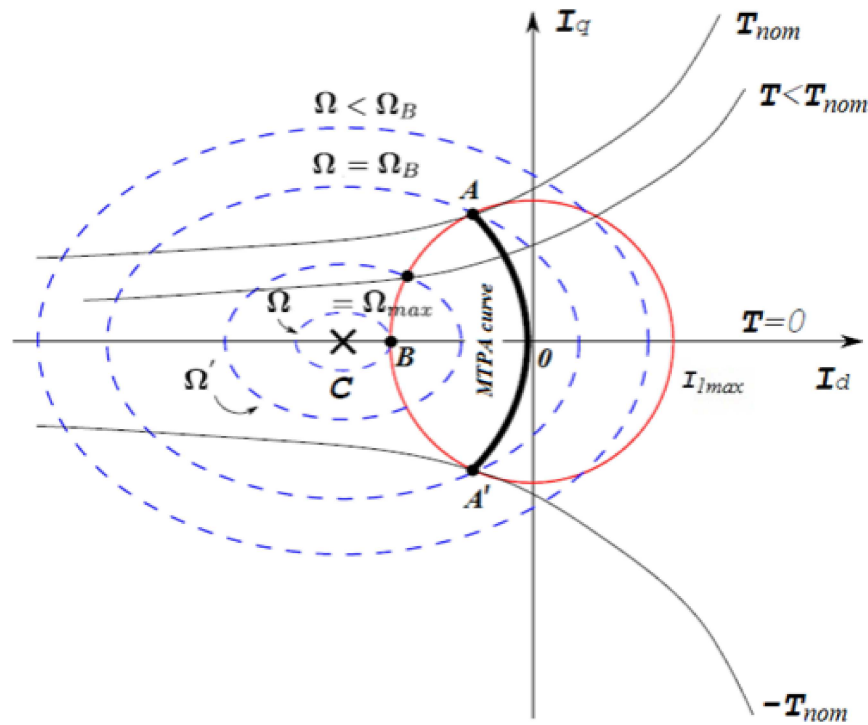
$$\left(\frac{L_q}{L_d} I_q\right)^2 + \left(I_d + \frac{\Psi_m}{L_d}\right)^2 \leq \frac{U_{1max}^2}{(\Omega \cdot L_d)^2} \quad (5.89)$$

Tyto rovnice popisují napěťové limity IPM motoru. Tyto limity lze reprezentovat jako elipsy, jejichž poloměr se zmenšuje se vzrůstajícími tačkami rotoru. Střed elips

C je umístěn v

$$I_{Cd} = -\frac{\Psi_m}{L_d}; \quad I_{Cq} = 0. \quad (5.90)$$

Proudový limit je reprezentován kružnicí, jejíž radius je rovný I_{1max} . Vše je dobře znázorněno na obrázku 5.10



Obrázek 5.10: Provozní limity IPM [16]

Každý provozní bod motoru musí splňovat aktuální limit proudového omezení a k němu příslušící napětí, které se vztahuje k momentální rychlosti rotoru.

V oblasti nízké rychlosti rotoru je elektrická rychlost nižší než základní elektrická rychlost Ω_B a indukované napětí je nižší než napájecí napětí. Kružnice proudu je celý uvnitř napěťové elipsy a proud je omezen pouze parametry motoru. Pokud se vektor proudu pohybuje po křivce A-A', pak je motor provozován s maximálním točivým momentem na jednotku proudu podle 5.85, protože každý bod na této křivce je tečným bodem mezi hyperbolou konstantního momentu a kružnicí proudu. Tato křivka se nazývá maximální moment na jednotku proudu.² V této oblasti se vždy nachází nominální moment. V bodě A se nachází pozitivní hodnota nominálního momentu, v bodě A' negativní hodnota (brzdná). Použitím MTPA řízení lze minimalizovat proud potřebný na vyvinutí momentu stejně jako ztráty motoru. MTPA řízení je metoda vektorového řízení, kde se řídí proudy i_d a i_q . Základní rychlost je rychlost, ve které

²MTPA - maximum torque per ampere

začíná odbuzování magnetického pole a pro IPM může být podle [20] vyjádřen jako determinant kvadratické rovnice

$$\Omega_B = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.91)$$

$$a = (L_q \cdot I_q)^2 + (L_d \cdot I_d)^2 + \Psi_m^2 + 2L_d \cdot \Psi_m \cdot i_d, \quad (5.92)$$

$$b = 2(L_d - L_q)R_1 \cdot i_d \cdot i_q + 2R_1 \cdot \Psi_m \cdot i_q, \quad (5.93)$$

$$c = R_1^2(iL_d - L_q)$$

V oblasti vysoké rychlosti rotoru je elektrická rychlost vyšší než základní elektrická rychlost Ω_B , napájecí napětí je již maximální a indukované napětí je vyšší než napájecí. Vyšší indukované napětí postupně snižuje točivý moment až k bodu B, kde už není možnost dalšího roztáčení motoru viz obrázek 5.10.

Motory s permanentními magnety nemají oddělený a říditelný zdroj magnetického toku v vzduchové mezeře a proto se používá osa d pro snižování magnetického toku. Z rovnice 5.85 je vidět, že pro daný moment je potřeba nižší statorový proud s větší hodnotou vyniklosti a tokem magnetů. Nižší proud ale znamená vyšší statorové napětí, což už je na hraně napájecího napětí nebo výkonového měniče, ale může toho být docíleno při odbuzování.

Rychlost se zvyšuje na maximum a když je v bodě B, je nulový moment a motor nezrychluje. Maximální otáčky s podmínkou $I_q = 0$ a $I_d = -I_{1max}$ může být odvozeno ze vztahu 5.88 jako

$$\Omega_{max} = \frac{U_{1max}}{\Psi_1} = \frac{U_{1max}}{\Psi_m - L_d \cdot I_{1max}}. \quad (5.94)$$

Z tohoto vztahu plyne, že vysokého odbuzovacího výkonu je dosaženo když je spřažený tok magnetů dán

$$\Psi_m = L_d \cdot I_{1max}. \quad (5.95)$$

Oblast konstantního výkonu reprezentovaná šířkou oblasti odbuzování může být vyjádřena jako

$$CPSR = \frac{\Omega_{max}}{\Omega_B} \quad (5.96)$$

Běžně používané vektorově řízené asynchronní motory mají poměr CSCR 4:1.

5.5.2 Provozní limity SPM

Analogicky jako u IPM napěťové rovnice pro SPM 5.86 a 5.98 v ustáleném stavu mohou být zapsány jako

$$U_d = R_1 \cdot I_d - \Omega \cdot L_1 \cdot I_q \quad (5.97)$$

$$U_q = R_1 \cdot I_q + \Omega \cdot (L_1 \cdot I_d + \Psi_m). \quad (5.98)$$

Po dosazení rovnic 5.97 a 5.98 do rovnice 5.77 a po zanedbání odporu rotoru dostaneme

$$(\Omega \cdot L_1 \cdot I_q)^2 + (\Omega \cdot (L_1 \cdot I_d + \Psi_m))^2 \leq U_{1max}^2 \quad (5.99)$$

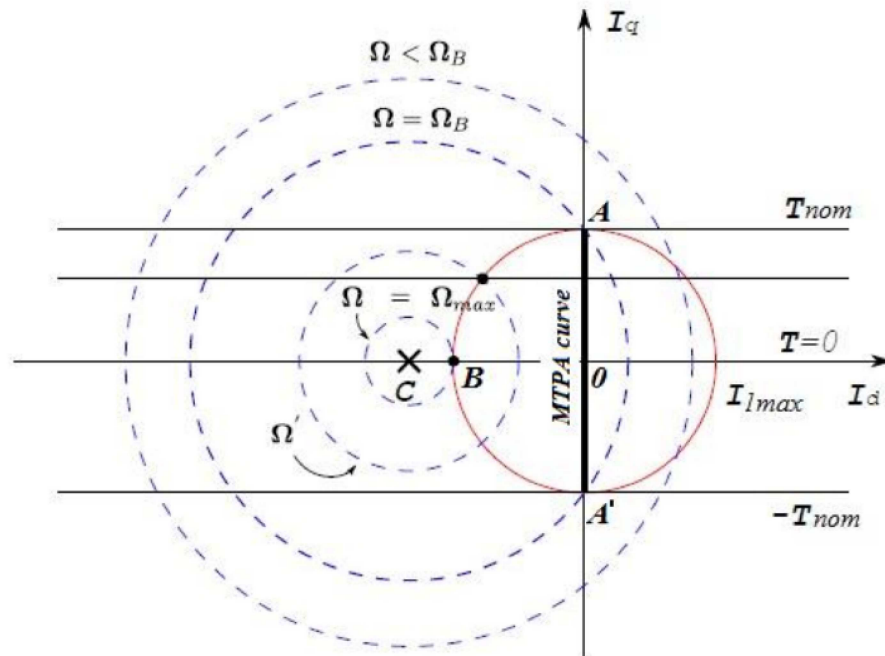
a konečně modifikací rovnice 5.99 je možné vyjádřit napěťový limit SPM ve formě

$$I^2 + \left(I_d + \frac{\Psi_m}{L_1} \right)^2 \leq \frac{U_{1max}^2}{(\Omega \cdot L_1)^2} \quad (5.100)$$

Tato rovnice reprezentuje množinu kružnic, jejichž střed se nachází v bodě

$$I_{Cd} = -\frac{\Psi_m}{L_1}; \quad I_{Cq} = 0. \quad (5.101)$$

Proudový limit je reprezentován kružnicí s radiem I_{1max} . Z rovnice momentu 5.49 lze vyvodit, že motor s hladkým rotorem nemůže produkovat reluktanční moment, tudíž i_d se neuplatní na tvorbě momentu a je potřeba jej držet nulový ve všech okamžicích pro dozažení maximálního proudu na ampér (MTPA). Křivka konstantního momentu je horizontální a trajektorie MTPA (A-A') leží na ose q . V oblasti konstantního výkonu se vektor přesouvá až do bodu B, kde už není žádný další moment k urychlení rotoru. Vše vykresluje obrázek 5.11. Základní rychlost Ω_B pro SPM (bod



Obrázek 5.11: Provozní limity SPM [16]

A) může být vyjádřena dosazením $I_d = 0$ a $I_q = I_{1max}$ do rovnice 5.91.

$$\Omega_B = \frac{U_{1max}}{\Psi_m - L_1 \cdot I_{1max}}. \quad (5.102)$$

Prodávané motory jsou často charakterizovány hodnotou magnetického toku magnetů, která je mnohem vyšší než $L_1 \cdot I_{1max}$. Tudíž maximální otáčky budou mírně vyšší než základní rychlost (o 10-20%) [16].

6 Kapitola 6

Návrh motoru

Vlastní návrh motoru budu provádět v grafickém prostředí programu ANSYS Maxwell a jeho vývojářích RMXprt a Maxwell Design. Pro optimalizaci motoru jsem opakoval vždy stejnou simulaci několikrát a provedl zhodnocení výsledků, stejně tak tomu bude i v případě této práce. Zabýval jsem se simulací synchronního motoru s permanentními magnety na povrchu rotoru i uvnitř rotoru. Motor se pak chová jako synchronní motor s hladkým rotorem a s vyniklými póly.

Základní parametry zadané do vývojáře RMXprt jsou

Výstupní výkon

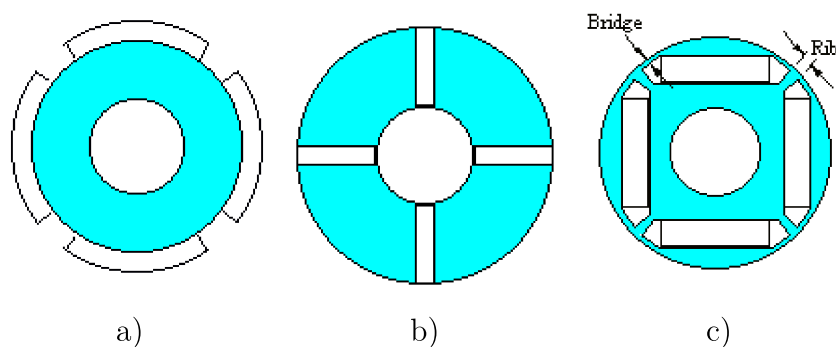
- maximální otáčky $n_{max} = 10\,000$ 1/min, tzn. $\omega_{max} = 3\,142$ s⁻¹
- nominální otáčky $n_n = 6\,000$ 1/min, tzn. $\omega_n = 1\,884$ s⁻¹
- maximální moment $T_{max} = 70$ Nm

Napájení

- minimální napětí baterie $U_{min} = 180$ V
- nominální napětí baterie $U_n = 180$ V
- maximální napětí baterie $U_{max} = 302$ V
- maximální příkon $P_{max} = 80$ kW

6.1 Výběr rotoru

Prvním krokem v simulaci je výběr vhodného typu rotoru. Celkem RMXprt nabízí tři typy rotorů, jeden hladkého typu (a) a dva s vyniklými póly (b, c) z obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Typy rotorů v RMXprt

6.1.1 SPM

Jen zopakují, že SPM¹ je rotor s magnety umístěnými na povrchu. Permanentní magnety na povrchu rotoru se chovají jako hladký rotor, jak bylo vysvětleno v kapitole 5.3 Matematický model SPM. Protože zde není „vyniklost“ mezi osou d a q , nevzniká u tohoto typu motoru reluktanční moment. Tento fakt sice způsobuje praktickou nemožnost odbuzování, ale na druhou stranu je tento rotor snadné vyrobit a při „Half-coil“ vinutí tak má o něco menší celkovou délku.

6.1.2 IPM

Rotor s magnety uvnitř plechů - IPM² existuje v mnoha uspořádáních permanentních magnetů. Základní typy však jsou dva: rotor s koncentrovaným tokem (dále IPM1) a jednovrstvé uspořádání (dále IPM2).

Více vrstev permanentních magnetů zvyšuje moment a efektivitu, ale snižuje oblast konstantního výkonu. V rotoru jsou u jednovrstvého uspořádání často volná místa, kterým se říká bariéry toku. Ty slouží ke zvýšení reluktančního momentu. Jednovrstvý rotor je pravděpodobně nejsnazší pro výrobu, ale má vyšší ztráty v magnetech díky jejich velkému povrchu, což lze částečně eliminovat jejich segmentací a tím snížením vířivých ztrát. Rotor s koncentrovaným tokem se tak nazývá, protože pólový nástavec produkuje vyšší hustotu magnetického toku ve vzduchové mezeře než samotný magnet.

6.1.3 Magnety

Ve všech rotorech jsem použil NdFeB35 magnety, které jsou relativně běžně dostupné a jejich charakteristika je připravena v knihovnách ANSYS Maxwell.

¹Surface permanent magnet

²Internal permanent magnet

6.2 Základní geometrické parametry

Tato část návrhu bude vycházet především z [3] a bude s ní pak dále uvažováno při simulacích. Nominální točivý moment jsem stanovil ze známého vzorce

$$T_n = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_n} = \frac{15\,000}{2 \cdot \pi \cdot 100} \doteq 24 \text{ Nm} \quad (6.1)$$

Dále chci určit průměr rotoru

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{P}{\chi \cdot c_{mech} \cdot f_n}} = \sqrt[3]{\frac{15\,000}{0,4535 \cdot 350 \cdot 300}} \doteq 103 \text{ mm}, \quad (6.2)$$

kde χ pro synchrovní vícepólový stroj vypočteme z následujícího vztahu (Table 6.5 [3]) a c_{mech} z Figure 6.2 [3].

$$\chi = \frac{\pi}{4 \cdot p} \cdot \sqrt{p} = 0,4535. \quad (6.3)$$

Dále vypočteme ekvivalentní délku rotoru, ze které v rovnici 6.5 získáme tečné napětí

$$l_{ekv} = \chi \cdot D_r = 0,4535 \cdot 103 \doteq 46,8 \text{ mm} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{Ftan} = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot D_r \cdot l_{ekv}} = \frac{2 \cdot 24}{\pi \cdot 103 \cdot 46,8} \doteq 30,4 \text{ kPa}. \quad (6.5)$$

To nám poslouží k určení objemu rotoru

$$V_r = \frac{T}{2 \cdot \sigma_{Ftan}} = \frac{24}{2 \cdot 30,4} \doteq 0,39 \text{ dm}^3. \quad (6.6)$$

Následně vypočteme z empirického vztahu délku vzduchové mezery jako

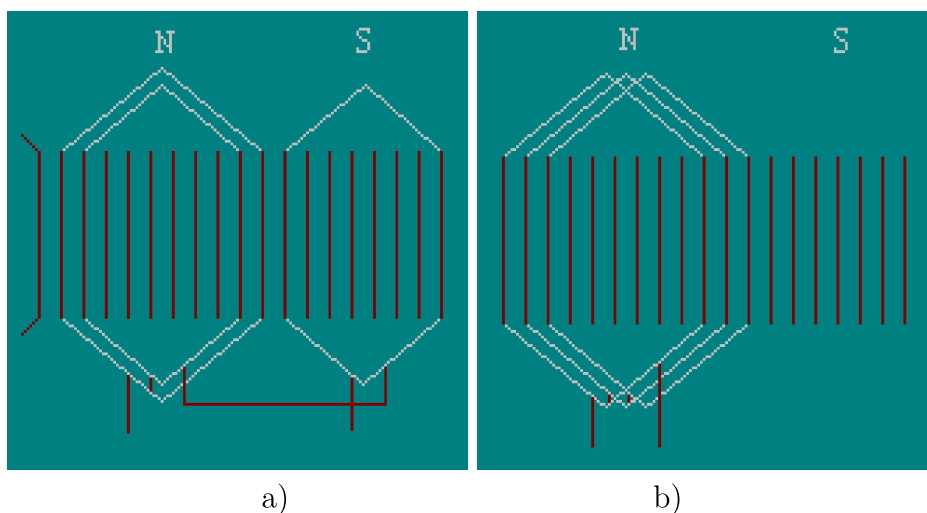
$$\delta = \frac{0,18 + 0,006 \cdot P^{\frac{2}{5}}}{1\,000} + 0,0007 \doteq 1,16 \text{ mm}. \quad (6.7)$$

Tím známe základní rozměry rotoru a můžeme určit průměr statoru

$$D_s = D_r + 2 \cdot \delta = 103 + 2 \cdot 1,2 \doteq 105,3 \text{ mm}. \quad (6.8)$$

Dále určíme jeho počet drážek z následujícího vztahu, kde q počet drážek na pól a fázi a je zvolen 2.

$$Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 36, \quad (6.9)$$



Obrázek 6.2: Typy vinutí statoru

rozteč statorových drážek je tedy

$$\tau_u = \pi \frac{D_s}{Q} = \pi \frac{105,3}{36} = 9,22 \text{ mm} \quad (6.10)$$

a rozteč pólů statoru můžeme vyjádřit jako

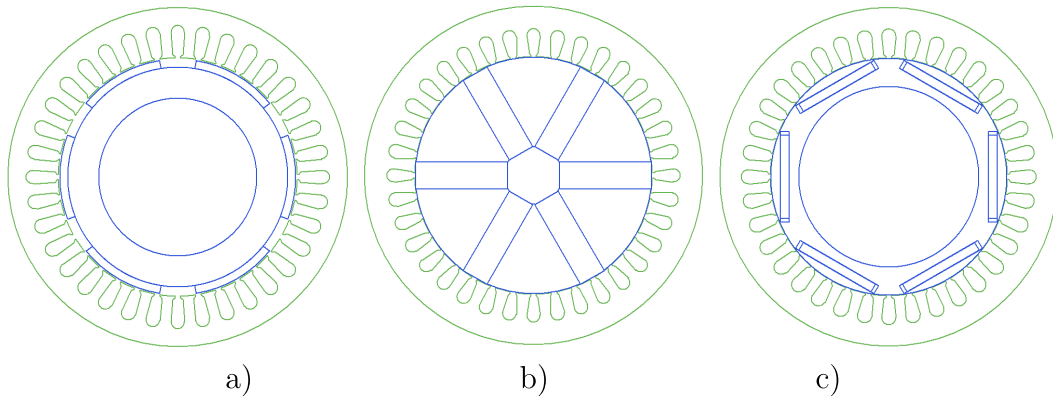
$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_s}{2p} = \frac{105,3\pi}{6} = 55 \text{ mm}. \quad (6.11)$$

Z těchto rozměrů už lze zadat parametry motoru do programu RMXprt a simulovat tak tento motor.

6.3 Návrh v modulu RMXprt

V modulu RMXprt programu ANSYS Maxwell jsem začal s tvorbou tří strojů s označením „Adjust-Speed Synchronous Machine,“ což je synchronní stroj s permanentními magnety vhodný pro změny otáček. Jeden stroj byl s magnety na povrchu rotoru, chovající se tedy jako hladký rotor a dva s vyniklými póly, jak je vidět na obrázku 6.1. Každému tomuto stroji jsem přiřadil vypočtené parametry a každý stroj jsem odsimuloval dvakrát, jednou pro „Whole-coil“ a jednou pro „Half-coil“ vinutí. Rozdíl v těchto vinutích je patrný z obrázku . Zkoušel jsem vždy několik desítek iterací s různými parametry především velikosti magnetů, abych docílil co nejlepších výsledků. Rozměry statorové drážky jsem nechal vypočíst RMXprtem. Výsledky jsem shromáždil do přílohy Parametry motorů z RMXprt, jelikož by výsledná tabulka zbytečně zabrala několik stran textu v práci.

Modul RMXprt zároveň dokáže vygenerovat grafy, na kterých vidíme výkon, účinn-



Obrázek 6.3: Motory vykreslené v modulu RMXprt

- a) magnety na povrchu rotoru
- b) magnety uvnitř rotoru směřující do osy motoru - rotor s koncentrovaným tokem
- c) jednovrstvé uspořádání magnetů uvnitř rotoru

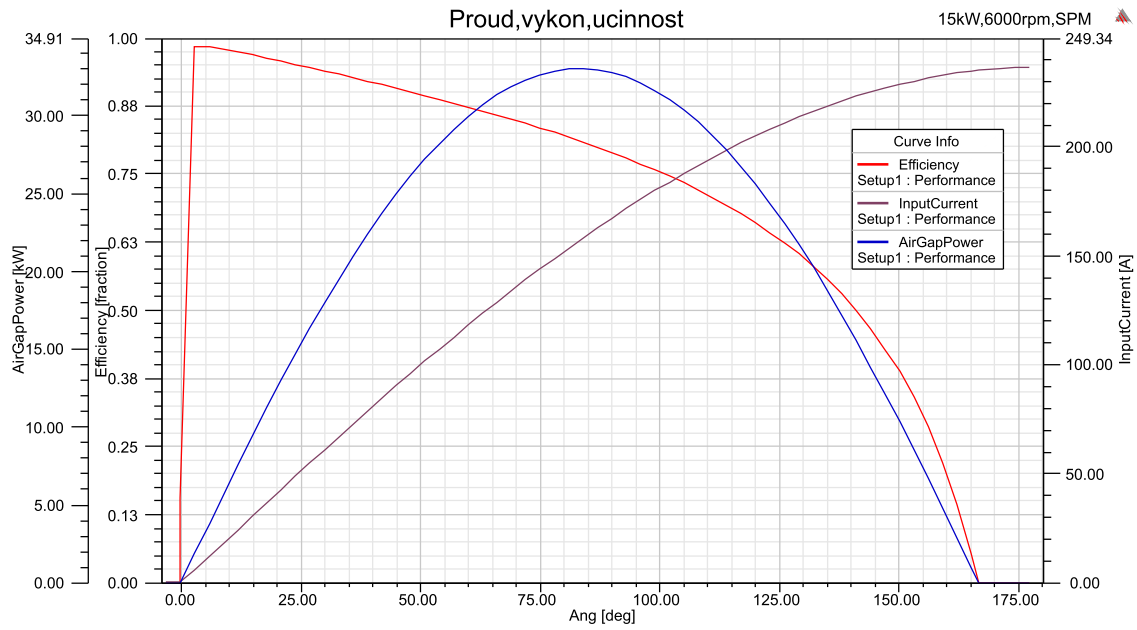
nost a proud v závislosti na elektrickém úhlu motoru. Tyto grafy jsem zpracovával pro každý simulovaný stroj a na jejich základě jsem se dále rozhodoval s jakými motory pokračovat v simulaci. Tyto grafy pro porovnání zařazuji. Zajímavé zjištění bylo, že pro všechny konfigurace vyšlo „Half-coil“ vinutí minimálně v některém z parametrů, obvykle ve většine hůře, než rozložené.

Motor s magnety na povrchu rotoru vycházel pro dané parametry už od počátku velmi dobře a oproti vzoru z prostředí Maxwell nebylo prakticky potřeba velké úpravy. Jeho parametry jsou na obrázku 6.4. Pro tento motor vycházelo velmi dobře i „Half-coil“ vinutí, proto jsem jej také přidal do dalšího výběru. Jeho charakteristiky ukazuje obrázek 6.5.

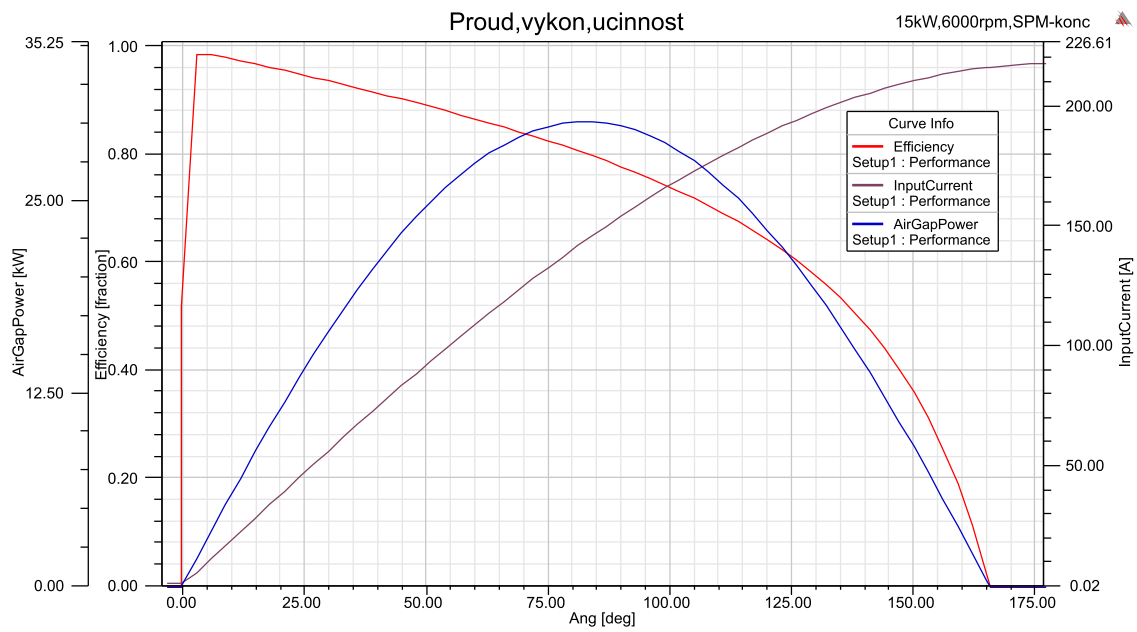
Dalším motorem byl motor s magnety uvnitř rotoru, umístěnými kolmo k ose rotoru (s koncentrovaným tokem). Jeho graf je 6.6. Graf pro „Half-coil“ vinutí je na obrázku 6.7, protože motor měl horší parametry, tak jsem ho nezařazoval ani do dalšího kola. V porovnání s SPM mají oba motory výrazně vyšší špičkový výkon, který ale nastupuje při vyšších elektrických úhlech, kdy už mírně klesá účinnost.

Další volba byla opět motor s magnety uvnitř rotoru, ale umístěné těčně k průměru uvnitř rotoru. Tento motor má výhodu v pomalejším klesání účinnosti v závislosti na zátěžném úhlu, ale jeho špičkový výkon je nižší než u motoru s koncentrovaným tokem a zároveň jeho moment nastupuje při vyšších úhlech. Jeho charakteristiku vystihuje obrázek 6.8. V konfiguraci s „Half-coil“ vinutím měl opět nižší výkon i účinnost.

Pro shrnutí těchto parametrů si dovoluji udělat nejzákladnější přehled z přílohy Parametry motorů z RMXprt, který je vyjádřen v tabulce 6.1. Je zde patrné, že SPM motor má lepší účinnost, ale výrazně nižší přetížitelnost než IPM motory. Všechny motory jsou počítány na $P_n = 15 \text{ kW}$ při 6000 1/min. Protože motor IPM2 nedopadl



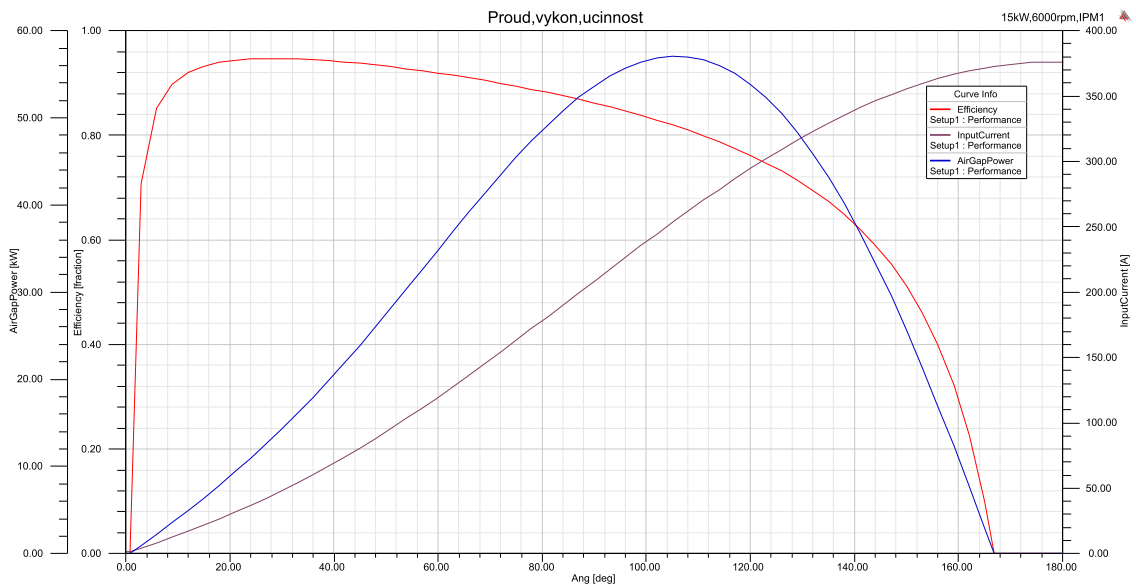
Obrázek 6.4: Motor s magnety na povrchu rotoru s vinutím „Whole-coil“ (SPM)



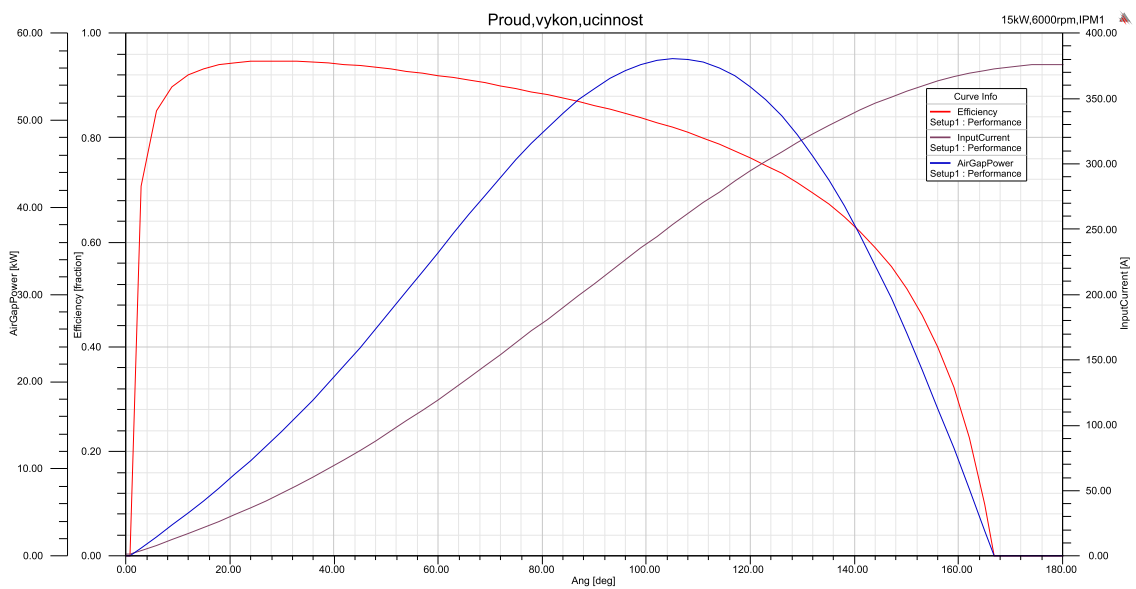
Obrázek 6.5: Motor s magnety na povrchu rotoru s „Half-coil“ vinutím (SPM)

	IPM1	IPM1	IPM2	IPM2	SPM	SPM
Vinutí	whole	half	whole	half	whole	half
η_n (%)	94,5	94,7	93,7	93,3	95,1	95
θ_n (°)	31	23,9	50	51	26,5	27
P_{max} (kW)	57	51,5	33	31,7	29	30,4
η_{Pmax} (%)	82	81	85	85,5	81,5	83

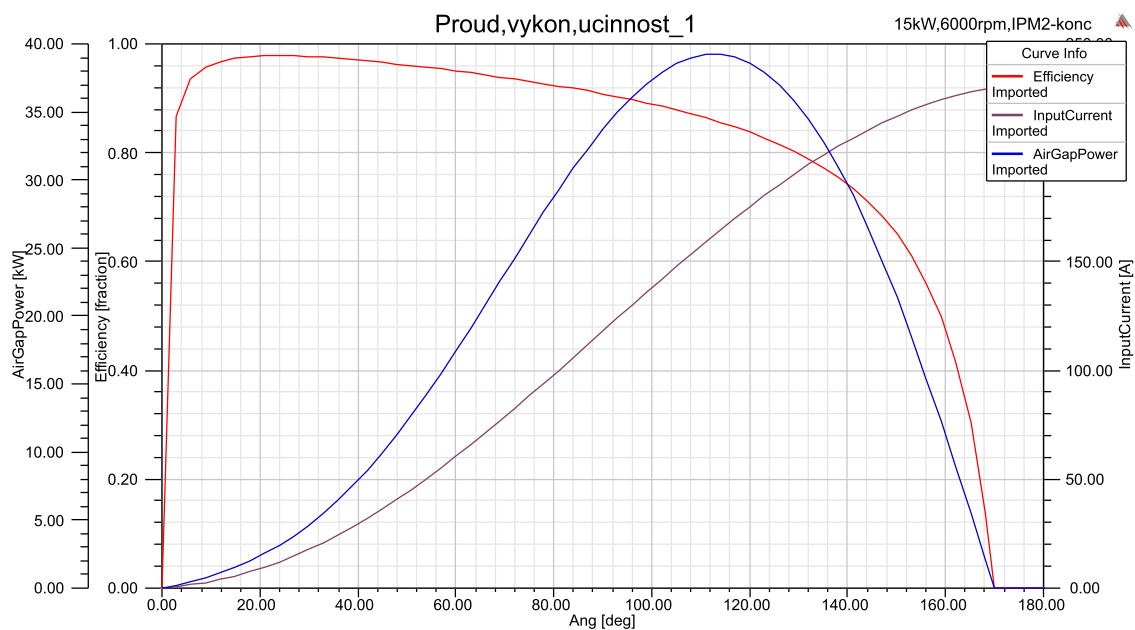
Tabulka 6.1: Vybrané parametry motorů z RMxprt



Obrázek 6.6: Motor s magnety uvnitř rotoru v jeho ose s rozloženým vinutím (IPM1)



Obrázek 6.7: Motor s magnety uvnitř rotoru v jeho ose s „Half-coil“ vinutím (IPM1)

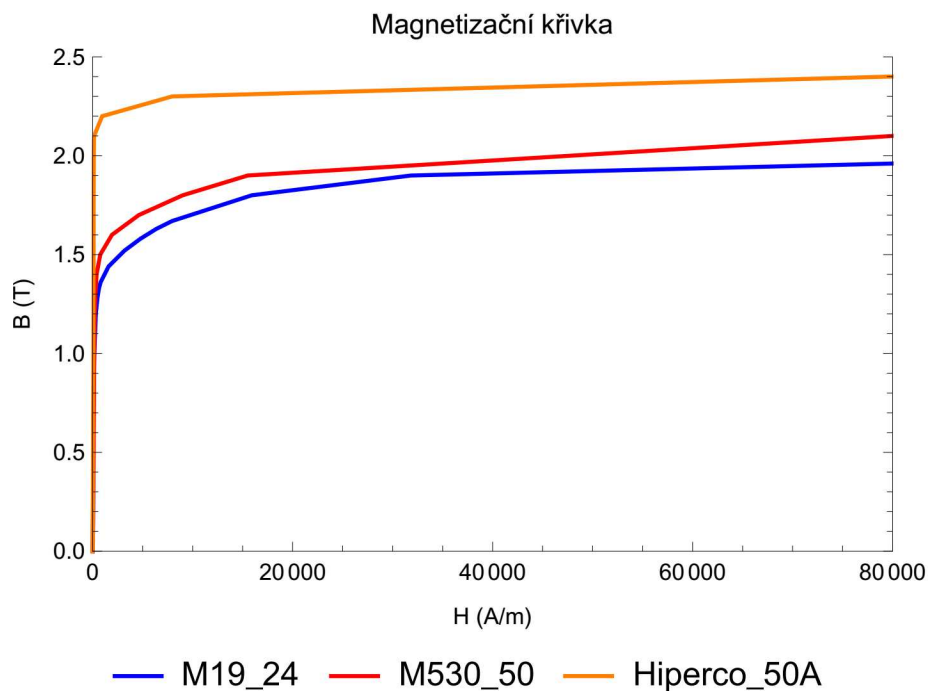


Obrázek 6.8: Motor s magnety uvnitř rotoru v jednovrstvém uspořádání s rozloženým vinutím (IPM2)

nejlépe, dovolím si ho z dalšího hodnocení vynechat. Zkoušel jsem jeho simulaci i v Maxwell 2D a nedopadla příliš dobře. Zuby statoru byly neúměrně přesycovány. Dále se tedy budu soustředit na motor SPM s „Half-coil“ vinutím a IPM1 s oběma typy vinutí.

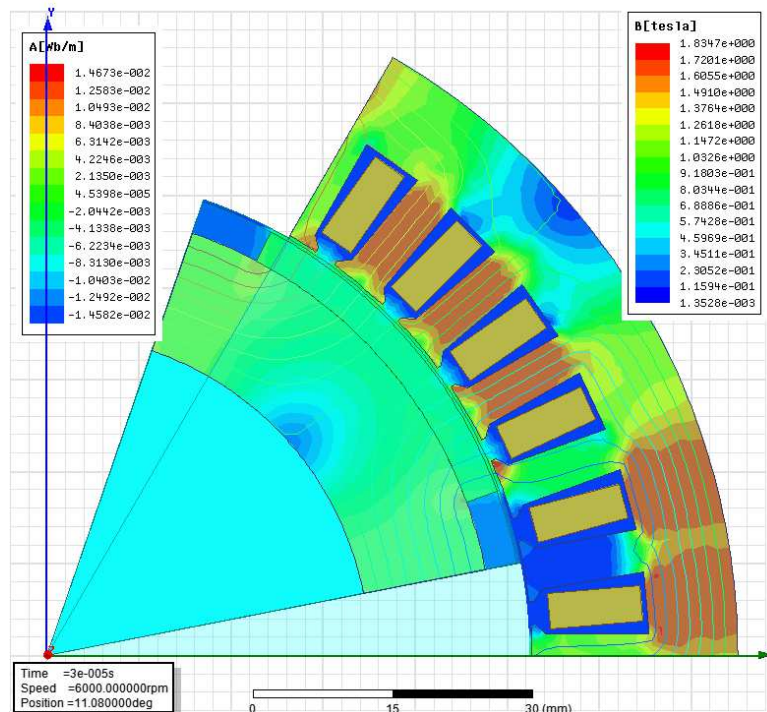
6.4 Maxwell 2D

Jak jsem již zmínil, dalšímu zkoumání jsem podrobil čtyři typy motorů a to motor s magnety na povrchu s „Whole-coil“ i „Half-coil“ vinutím, motor s magnety uvnitř rotoru umístěné do osy a s jednovrstvými uspořádanými magnety. Tím dalším krokem bylo vygenerování dvourozměrného modelu v modulu Maxwell 2D. Modelování probíhalo řešičem Transient (přechodný děj), kdy byla motoru udělena nominální rychlost a zkoumáno sycení železa a jeho ztráty. Pro stator byl použit speciální elektrotechnický plech vyvinutý pro letecké a jiné náročné aplikace. Tento plech se prodává pod názvem Hiperco 50A a jeho datový list je přiložen Datový list materiálu Hiperco 50A. Křivka magnetizace tohoto plechu je porovnána s běžně používanými plechy typu M530-50 a M19-24 na obrázku 6.9. Tento plech se vyznačuje velmi vysokou možností sycení, kdy „koleno“ magnetizační charakteristiky začíná až nad indukci 2 T. Výsledky výše uvedených simulací můžeme vidět na obrázcích 6.10 až 6.12. Simulace byla vždy prováděna pro několik časů od počátku a vždy nejhorší případ konkrétního uspořádání byl vybrán do této práce. U motoru s magnety na povrchu (obrázek 6.10)

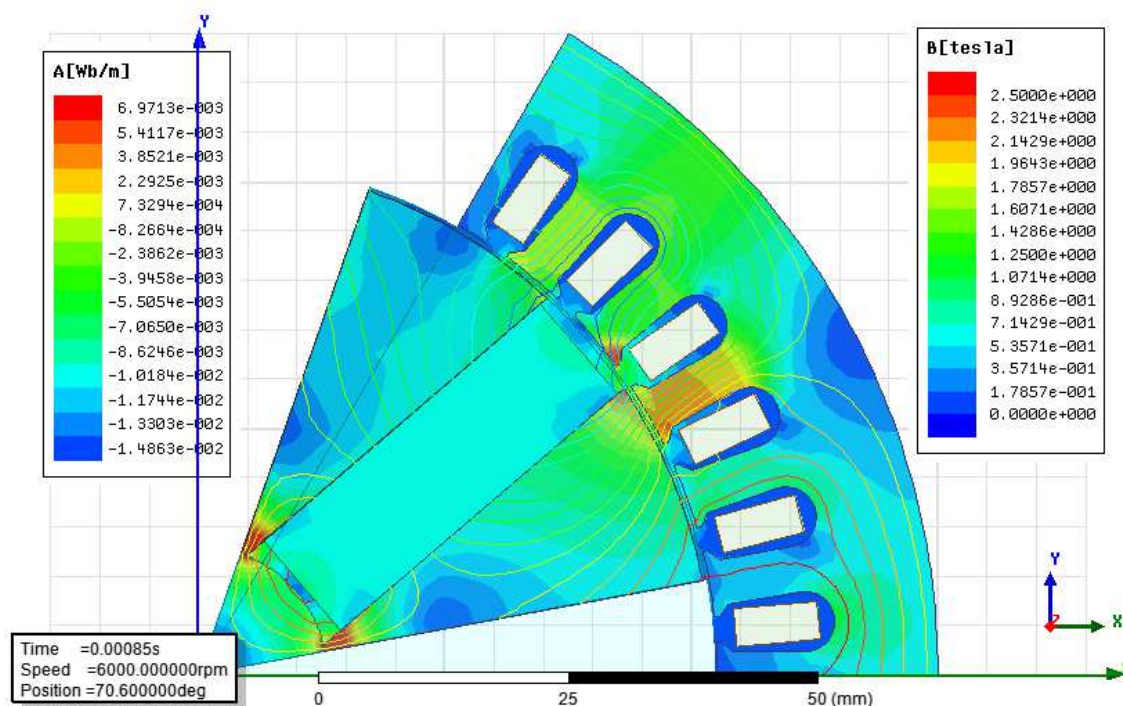


Obrázek 6.9: Magnetizační křivka

rotoru je syčení statoru evidentně nejmenší z daných uspořádání. Toto syčení plně vyhovuje použitým plechům, které evidentně nejsou přesyceny. Na dalším obrázku je



Obrázek 6.10: Magnetická indukce a tok u SPM



Obrázek 6.11: Magnetická indukce a tok u IPM1 - rozložení vinutí

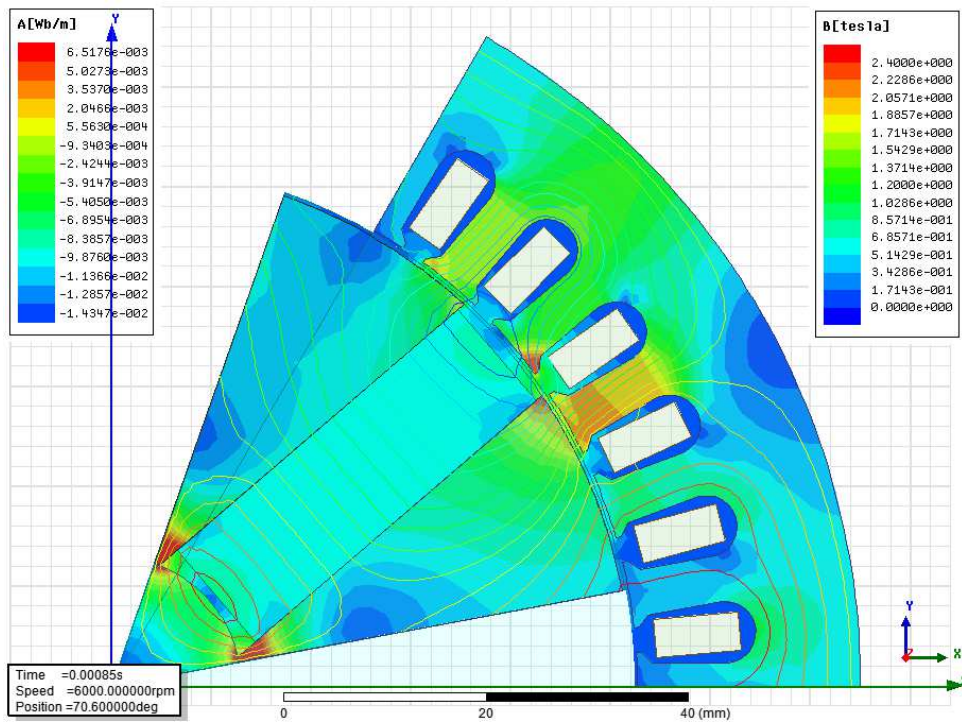
ukázka IPM, který už se velmi blíží materiálovým limitům použitých plechů. Špička v jednom místě zubu dokonce ukazuje 2,4 T, ale to bude pravděpodobně způsobeno naprosto ostrým rohem zubu a ve skutečnosti se na vzniklém radiusu indukce rozloží.

Protože motor IPM1 vyšel velmi dobře i v simulaci rozložení magnetické indukce a magnetického toku. Odsimuloval jsem jej pro přechodový stav i v rozšíření Maxwell 3D, kde jsem došel k velice podobným výsledkům, dokonce se indukce ještě více rozložila, takže na satorových zubech nevznikaly tak velké špičky a tím pádem si myslím, že podle tohoto řešení lze motor vyrobit. Jeho podrobný popis je uveden v příloze v tabulce Parametry motorů z RMxprt. Trojrozměrný model motoru je na obrázku 6.13.

Z programu Maxwell jsem dále získal graf momentu motoru, proudy satorovým vinutím při maximálním momentu na obrázku 6.14 a graf průběhu reluktančního momentu 6.15.

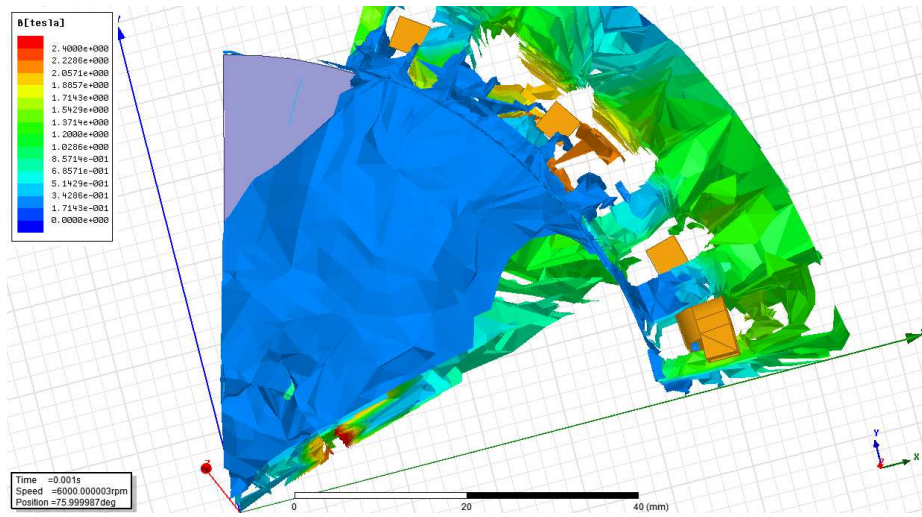
6.5 Zhodnocení návrhu

Jelikož je toto můj téměř první návrh motoru od základu až k simulacím, tak bych jej rád ještě jednou detailněji prošel a zkusil simulaci provést i v jiných programech, než se pustím do výroby tohoto motoru. Zároveň už nebyl před dokončením této práce

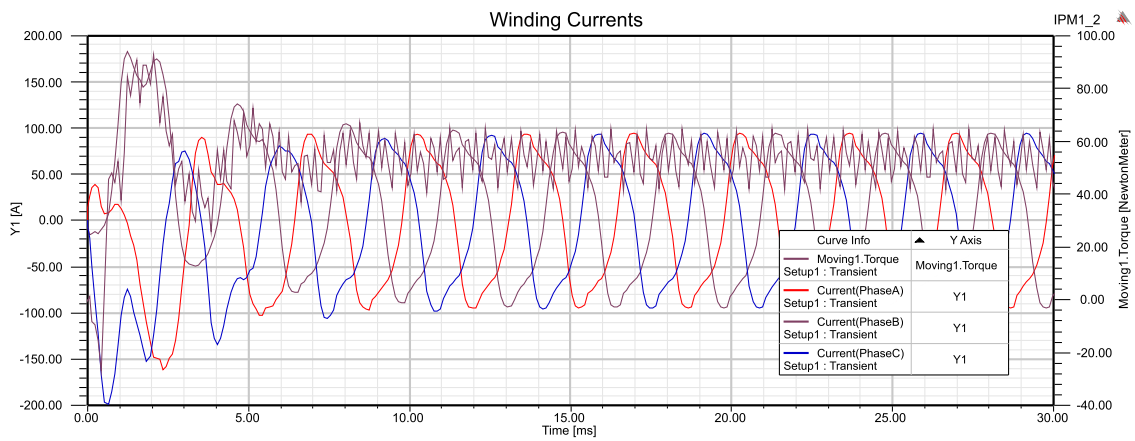


Obrázek 6.12: Magnetická indukce a tok u IPM1 - „Half-coil“ vinutí

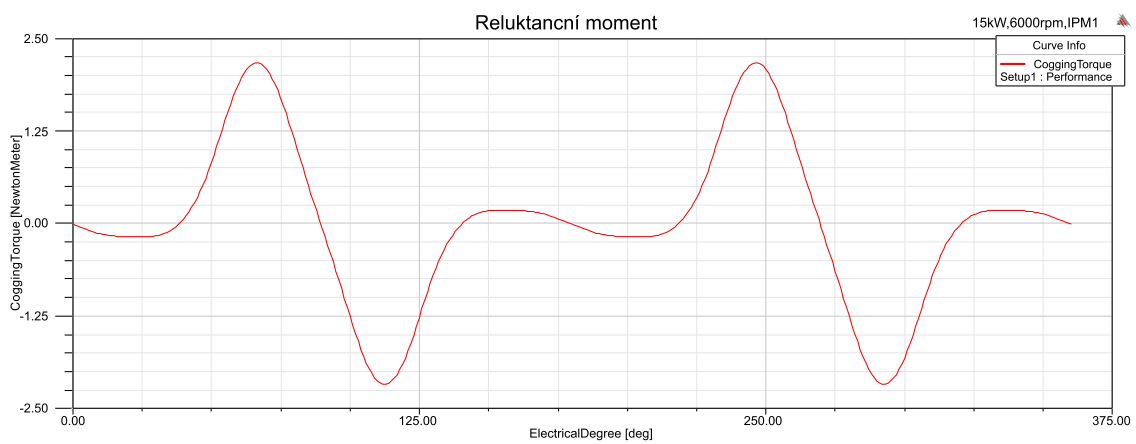
dostatečný čas na výrobu a proto tento motor zatím bohužel zůstává pouhou simulací. Věřím však, že se k této simulaci buď já nebo nějaký můj následovník časem vrátí a dotáhne ji do fáze realizace a zařadíme se tím k absolutní světové špičce, kdy bude na naší formuli i motor vlastní výroby a bude plně konkurenceschopný.



Obrázek 6.13: Trojrozměrný model IPM motoru s magnetickou indukcí



Obrázek 6.14: Moment motoru



Obrázek 6.15: Průběh reluktančního momentu

7 Kapitola 7

Měření na motoru

Jak jsem již zmínil v minulé kapitole, nebyla výroba mého návrhu motoru realizována a proto jsem se pro tuto kapitolu rozhodl provést měření na motoru N6-1800, který je vyroben firmou TG Drives a bude namontován na zadní nápravě vozu FSE.04x. jeho nominální údaje jsou shrnuty v tabulce 7.1. Chybějící údaje jsou v datovém listu v příloze práce Datový list motoru TG Drives N6-1800.

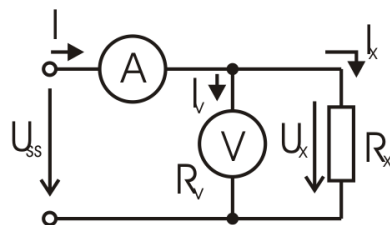
7.1 Měření elektrických veličin

7.1.1 Měření odporu vinutí

Na motoru jsme dále měřili odpor vinutí čtyřbodovou metodou zobrazenou na obrázku 7.1, kde je místo R_x byly postupně zapojeny jednotlivé vývody motoru. jelikož je udávaný odpor v datovém listu přímo na svorkách stroje, nebylo potřeba dále nic dopočítávat. Měření bylo prováděno postupně pro 3 hodnoty proudu a z napětí pak byl spočítán odpor. Výsledky jsou zaneseny v tabulce 7.2. Měření proudu bylo prováděno na bočníku a napětí bylo pro téměř nulový proud I_v měřeno digitálním

Typ	N6-1800
Maximální točivý moment	66 Nm
Nominální točivý moment	10 Nm
Nominální otáčky	6 666 1/min
Maximální otáčky	9 460 1/min
Nominální výkon	9 kW
Maximální výkon	30 kW
Hmotnost	9 kg
Typ motoru	PMSM - SPM

Tabulka 7.1: Parametry motoru TG Drives N6



Obrázek 7.1: Měření odporu vinutí

	I (A)	U (mV)	R_x (m Ω)	R_{vysl} (m Ω)
fáze UV	40	1 180	29,5	29,67
	20	893	29,77	
	10	595	29,75	
fáze UW	40	1 185	29,6	29,75
	20	895	29,83	
	10	596	29,8	
fáze VW	40	1 189	29,7	29,9
	20	900	30	
	10	599	29,95	

Tabulka 7.2: Měření odporu vinutí

přístrojem HP 34401a.

Během celého měření odpor nepatrně, ale přesto viditelně vzrůstal. To může být způsobeno oteplením vinutí při měření nebo jen nepřesností měření.

7.1.2 Měření indukčnosti vinutí

Dalším měřením bylo měření indukčnosti ohmovou metodou střídavým proudem. Tato metoda je založena na různých impedancích pro stejnosměrný a střídavý proud procházející cívkou. Schéma měření bylo stejné jako pro měření odporu vinutí 7.1, jen bylo napájeno střídavým proudem o frekvenci 50 Hz. Pokud cívkou prochází střídavý proud, objeví se její indukance X_L a cívka tak má impedanci

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \quad (7.1)$$

odkud po úpravě dostaneme pro indukčnost vztah

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (7.2)$$

Z tohoto vztahu lze tedy jednoduše určit indukčnost. Odpor vinutí použijeme z předchozího měření. Výsledky jsem shromáždil do tabulky 7.3. Výsledky se mírně liší od udávaného stavu (asi o 15 %). To může být způsobeno polohou rotoru, protože i tam

	U (V)	I (A)	Z (m Ω)	L (mH)
1	5	50	96	0,29
2	4,2	43	97,7	0,296
3	3,7	32	116	0,356
			\bar{L} (mH)	0.314

Tabulka 7.3: Měření indukčnosti vinutí

má vliv na indukčnost.

Dále jsme změřili indukované napětí, které při maximálních otáčkách 9 500 1/min dosahovalo hodnoty $U_p=280$ V, což je přesně dle přílohy Datový list motoru TG Drives N6-1800, kdy v otáčkách 9 460 1/min má být nulový moment, tedy i nulový rozdíl indukovaných napětí.

7.2 Měření mechanických veličin

Dále probíhalo měření točivého momentu, momentu setrvačnosti a následné vyhodnocení těchto veličin.

7.2.1 Moment motoru

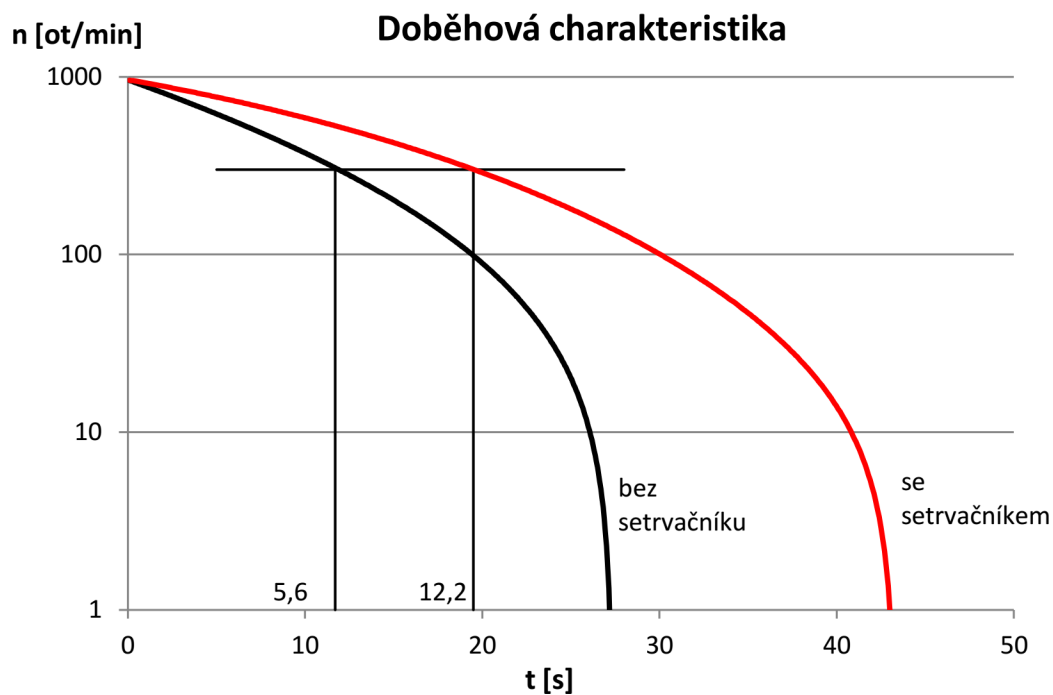
Moment setrvačnosti jsme měřili z doběhové charakteristiky tak, že jsme změřili dobůh nezatíženého stroje a dobůh stroje zatíženého známým momentem setrvačnosti $J_z = 21,5$ kg·cm². Měření jsme provedli roztočením motoru měničem na 1 000 1/min a zaznamenáním času, kdy rotor dosáhne 500 1/min. Tento čas byl přesně zaznamenám měničem. Výstup je na obrázku 7.2. Výsledný moment strvačnosti se pak zjistí ze vztahu

$$J = J_z \frac{t_1}{t_2 - t_1} = 21,5 \frac{5,6}{12,2 - 5,6} = 18,24 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad (7.3)$$

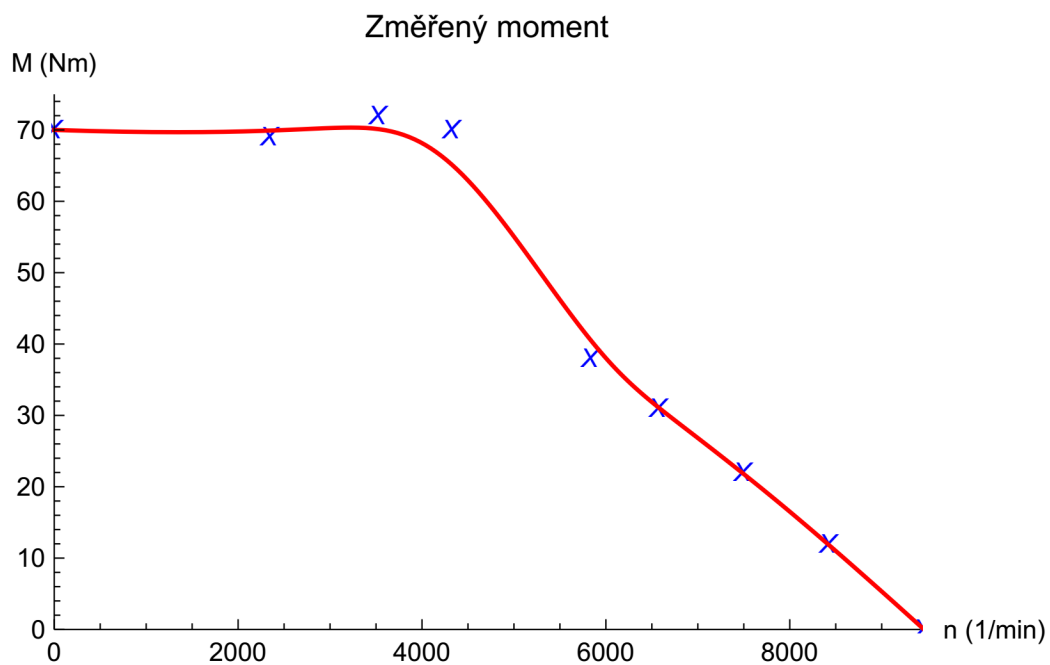
Změřený moment rotoru je jen nepatrně rozdílný a za to pravděpodobně může nepřesnost při měření otáček nebo času.

7.2.2 Točivý moment

Měření točivého momentu probíhalo pouze v rámci ověření, zda je motor schopen generovat maximální moment 66 Nm až do otáček 4 240 1/min při proudu 202 A a moment 20 Nm při 8 000 1/min. výsledek je na obrázku 7.3. Počáteční a koncový bod jsem doplnil ručně, abych mohl křivku proložit od počátku až do konce. Teoreticky bychom ještě mohli zvýšit proud, resp. zatížení, ale nechtěli jsme motor zbytečně přetěžovat.



Obrázek 7.2: Doběhová charakteristika

Obrázek 7.3: Změřený moment v části konstantního momentu při $I \approx 200$ A

Tímto jsme se dozvěděli, že motor splňuje veškeré výkonové požadavky deklarované výrobcem a lze ho tedy bez obav namontovat do formule a prosvést na něm zatížení v reálném závodě.

8

Kapitola 8

Závěr

V průběhu práce jsem představil požadavky na pohon vozidla Formula Student. Detailně jsem specifikoval jeho jízdní odpory a typ zatěžování pohonného ústrojí vozidla. Věnoval jsem se výpočtům zrychlení a potřebného momentu na jeho dosažení. Porovnal jsem výkonové parametry vozu FSE.03 a požadované parametry pro vůz FSE.04x, který by měl být dle návrhů výrazně rychlejší na akceleraci s možností rychlejšího průjezdu zatáčkami.

V další části práce jsem se zabýval pohledem na špičkové týmy, jejich typy pohonů a zároveň používané motory. Z nabízených variant jsem vyhodnotil jako nejlepší použití pohonu všech čtyř kol s použitím motorů firmy TG Drives a nebo s motory vlastního návrhu. Návrh motorů jsem jakožto těžiště mé práci i realizoval, ale bohužel už nedošlo k jejich výrobě. Tuto část práce nechávám otevřenou pro další zkoumání například při závěrečných pracích, během kterých může dojít i k jejich výrobě.

Závěrem práce jsem provedl měření na dodaném motoru N6-1800 od firmy TG Drives a shledal jsem tento motor plně odpovídající technickému listu a tím pádem vhodný pro provoz ve vozidle Formula Student týmu eForce FEE Prague Formula.

Literatura

- [1] VOŽENÍLEK, Petr, NOVOTNÝ, Vladimír, MINDL Pavel. Elektromechanické měniče. 2. vyd. V Praze: ČVUT, 2011. 219 s. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří; HAMATA, Václav; VOŽENÍLEK, Petr. Elektrické stroje. Prague : CTU, Faculty of Electrical Engineering 1993. 311 p. ISBN 80-01-02109-2.
- [3] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of Rotating Electrical Machines[online]. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2008, s. 531 [cit. 2014-11-21]. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [4] 2015 Formula SAE® Rules. 2015 Formula SAE® Rules [online]. 2015, 1.0.0 [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: http://www.fsaeonline.com/content/2015FSAERules09_14_15_FINAL.pdf
- [5] SVOBODA, Jindřich. CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE. CTU CarTech Formula Student/SAE Team. třetí. Praha, 2012.
- [6] Li-Ion rechargeable battery technical information. Powerstream [online]. 2013 [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://www.powerstream.com/p/us18650vtc5-vtc5.pdf>
- [7] DIVÍN, Stanislav. Adaptivní skluzová regulace pohonu elektromobilu. Praha, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická 2015. Diplomová práce.
- [8] Specification 7MBP400VEA060-50. FUJI [online]. 2012 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.fujielectric-europe.com/sites/default/files/FEE_Files/Semi/IGBT-Modules/7MBP400VEA060-50.pdf
- [9] BRADÁČ, A.; KREJČÍŘ, P.; LUKAŠÍK, L.; OŠLEJŠEK, J.; PLCH, J.; KLEDUS, M.; VÉMOLA, A. Soudní inženýrství. Brno: Cerm, s.r.o., 1997. s. 1-725. ISBN: 80-7204-057- X.

- [10] ISLAM, Mohammed Rakibul. Cogging Torque, Torque Ripple and Radial Force Analysis of PMSM. Akron, 2009. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/71410767/Cogging-Torque-Torque-Ripple-and-Radial-Force-Analysis-of-Pmsm>. Disertační. The Graduate Faculty, University of Akron. Vedoucí práce Dr. Iqbal Husain.
- [11] PAVELKA, Jiří, ČEŘOVSKÝ Zdeněk, LETTL, Jiří. Výkonová elektronika. Vyd. 3. přeprac. Praha: ČVUT, 2007. 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [12] KANG, Jun. Řízení motorů s permanentními magnety bez snímačů otáček [online]. Control Engineering Česko. [cit. 2014-12-17]. <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/rizeni-motoru-spermanentnimi-magnety-bez-snimacu-otacek/>.
- [13] BARCARO, Massimo. Design and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles. PhD diss. Universita degli studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Italy 2011 [online]. [cit. 2014-12-17]. http://paduaresearch.cab.unipd.it/3497/1/Phd_Thesis_ELECR.pdf
- [14] BIEL, Zdeno; VITTEK, Ján; HRKEL Michal. Permanent Magnet Synchronous Motor Loss Minimization Control Strategies. University of Zilina, Department of Power Electrical Systems, Žilina. IEEE Trans.
- [15] CHONG, Lester. Design of an Interior Permanent Magnet Machine with Concentrated Windings for Field Weakening Applications. PhD diss. The university of new south Wales, Australia 2011[online]. [cit. 2014-12-17]. http://www.unsworks.unsw.edu.au/primo_library/libweb/action/dlDisplay.do?vid=UNSWORKS&docId=unsworks_10672&fromSitemap=1&afterPDS=true
- [16] LEE, Seong, Taek. Development and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Field Excitation Structure. PhD diss., University of Tennessee, 2009 [online]. [cit. 2014-12-17]. http://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/613
- [17] HRADEČNÝ, Lukáš. Selection of alternative topology of electrical machine for electrical CTU formula. Prague : CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2014. 94 p. Thesis supervisor Ing. Vít Hlinovský, CSc.
- [18] MILLER, T.J.E. SPEED's Electric Machines, with problems and solutions. CD-adapco 2002 - 2011.

- [19] MURRAY, Aengus. Design platforms enable variable-speed motor control in energyefficient appliances [online]. EE Times. [cit. 2014-12-17]. http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272381
- [20] KIM, J. M. and SUL, S. K. Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux-Weakening Operation. IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. 33, pp.43 - 48 1997.
- [21] FRIC, Ondřej. Konstrukce vozu kategorie Formula Student Electric. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta strojní, 2011.
- [22] YASA 750 - Axial Flux Motor. YASA Motors [online]. 2014 [cit. 2014-12-124]. Dostupné z: http://www.yasamotors.com/wp-content/uploads/2014/07/Datasheet-YASA-750_en-ID-15637.pdf
- [23] Brusa - HSM1. Brusa [online]. 2013 [cit. 2014-12-12]. Dostupné z: http://www.brusa.eu/fileadmin/Diverses/Download/Datenblaetter/BRUSA_DB_EN_HSM1-10.18.04.pdf
- [24] Enstroj manual for Emrax Motors. Enstroj [online]. 2014 [cit. 2014-12-12]. Dostupné z: http://www.enstroj.si/images/stories/manual_for_emrax_motor_december_2014_new.pdf
- [25] FSTeam Delft - DUT14. FSTeam Delft [online]. 2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://fsteamdelft.nl/en/cars/dut14.html>
- [26] DHBW Engineering Stuttgart - eSleek 14. DHBW Engineering Stuttgart [online]. 2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.dhbw-engineering.de/index.php/fahrzeug/esleek14.html>
- [27] DYNASYN Servomotors DT and DP. AMK - DYNASYN [online]. 2013 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: http://amk-group.com/en/system/files/Servo_motors_DT_eng_0.pdf
- [28] Formula Student Electric - World Ranking. Mazur [online]. 2015 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://mazur-events.de/fs-world/?cl=2>
- [29] Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice. Elektro [online]. 2014 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast-13092>

- [30] Traction Permanent Magnet Synchronous Motor Torque Control with Flux Weakening. RADIOENGINEERING [online]. 2009 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09_04_601_605.pdf

- [31] Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel. Vědeckotechnický sborník ČD [online]. 2010 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: <http://vtsb.cd.cz/VTS/CLANKY/vts29/2908.pdf>

- [32] ANSYS Maxwell V16 Training Manual: Maxwell Transient Solvers. ANSOFT Maxwell [online]. 2013 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L05_Transient_Solvers.pdf