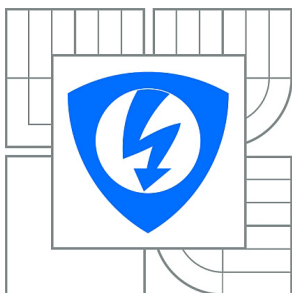


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ANALÝZA, NÁVRH A OPTIMALIZACE AUTOMOBILOVÉHO STARTÉRU

ANALYSIS, DESIGN AND OPTIMIZATION OF AUTOMOTIVE STARTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

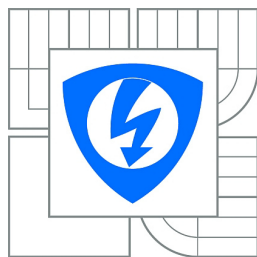
Bc. MARTIN BENETKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, CSc.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Sílnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Martin Benetka

ID: 119358

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Analýza, návrh a optimalizace automobilového startéru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte rozbor problematiky spouštění spalovacích motorů a určete základní technické požadavky pro startér.
2. Analyzujte charakteristiky startéru a spalovacího motoru a způsob určení spouštěcích parametrů.
3. Provedte, podle zadaných vstupních parametrů, elektromagnetický návrh startéru analyticky.
4. Návrh ověřte výpočtem pomocí programu Maxwell.
5. Nakreslete rozměrový náčrt stroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Koziej E., Mazsyny elektryczne pojazdów samochodowych. WNT Warszawa, 1984, ISBN 83-204-0515-7
- [2] Hájek V., Kuchyňková H., Requirements and design of the starting system. XIV. International symposium on Electrical Machines - ISEM 2006. ČVUT, Praha, 2006, s. 69 - 78, ISBN 80-01-03548-4
- [3] Hájek V., Kuchyňková H.: Starter Motor Dimension. XLII International Symposium on Electrical Machines SME 2006. Cracow University of Technology, Poland, s. 99 - 102, ISBN 83-88309-36-6
- [4] T. Denton, Automobile Electrical and Electronics Systems" Butterworth-Heinemann, Oxford 2001 ISBN 0-340-73195-8

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí práce: prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na automobilové spouštěče, problematiku při používání za nízkých teplot, jejich konstrukci a charakteristiky. První část práce je teoretická, jsou v ní popsány jednotlivé druhy spouštěčů, princip funkce, konstrukce, výhody a také nevýhody jejich použití. Dále pak problematika spouštění spalovacích motorů a základní technické požadavky kladené na spouštěče. Část práce je též věnována popisu a významu jednotlivých charakteristik spouštěčů i spalovacích motorů. Poslední část teoretické části je věnována metodě konečných prvků a programů, které tuto metodu využívají.

Praktická část je zaměřena na analytický elektromagnetický výpočet startéru, jehož výsledkem jsou pracovní charakteristiky spouštěče. Vypočtené hodnoty se porovnávají s hodnotami, které byly měřeny přímo na startéru. Další porovnání je s hodnotami z výpočtu programu RMxpert a výpočtem metodou konečných prvků za pomoci programu Maxwell. V této části se nachází také návrh na zlepšení rozložení magnetické indukce ve statoru stroje.

Abstract

This thesis aims at automotive starters, their construction, characteristics and problems with starting at low temperatures. There are kinds of starters, function principle, construction, advantages and disadvantages in the first part of thesis. Issues with combustion engine starting and basic technical requirements are also mentioned here; characteristics and importance of starters and combustion engines are also described. Last chapters of this part are dedicated to finite element method and its implication.

There are analytical calculations of starter in the second part of thesis. Results are compared with experimental obtained (measured) values and results from RMxpert. Finite element method results are compared, too. Magnetic induction improvement in stator is also suggested.

Klíčová slova

Spouštěče, funkce spouštěčů, parametry spouštěčů, základní technické požadavky na spouštěče, spouštění spalovacích motorů, charakteristiky spalovacích motorů, charakteristiky spouštěčů, startér, elektromagnetický návrh startéru, analytický výpočet spouštěče, RMxpřt, Maxwell, metoda konečných prvků, spouštění za nízkých teplot.

Keywords

Starter, starter functions, the basic technical requirements for starters, starting internal combustion engines, combustion characteristics of the engine, starters characteristics, starter electromagnetic design, analytical calculation starters, RMxpřt, Maxwell, finite element method, starting at low temperatures.

Bibliografická citace

BENETKA, M. *Analýza, návrh a optimalizace automobilového startéru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 100s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Analýza, návrh a optimalizace automobilového startéru* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny v práci citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Vítězslavu Hájkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora.....



OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
ÚVOD	14
1. Spouštěcí zařízení	15
1.1. Možnosti spouštění	17
1.2. Požadavky na spouštění motoru	17
1.3. Technické požadavky spouštěčů	19
1.4. Spouštění motoru za nízkých teplot.....	20
1.5. Konstrukce spouštěčů	21
1.6. Dělení spouštěčů z konstrukčního hlediska.....	22
1.6.1. Systém s výsuvnou kotvou	23
1.6.2. Systém s výsuvným pastorkem	25
1.6.3. Systém Bendix.....	27
1.7. Údržba a kontrola spouštěčů.....	28
1.7.1. Údržba částí spouštěče	28
1.7.2. Kontrola spouštěče po opravě	28
2. Návrh spouštěcích systémů.....	29
2.1. Základní parametry spouštěčů	30
2.2. Výběr startéru	31
2.3. Charakteristiky stejnosměrného motoru	32
2.3.1. Odvození charakteristik SS strojů	35
2.4. Charakteristiky spalovacího motoru	38
2.4.1. Otáčkové (rychlostní)	39
2.4.2. Zatěžovací	40
2.4.3. Seřizovací	40
2.4.4. Úplné (celkové)	40
2.4.5. Zvláštní.....	41



3. Elektromagnetický výpočet startéru	41
3.1. Výpočet základních parametrů	41
3.2. Výpočet charakteristiky chodu naprázdno	41
3.3. Výpočet pracovních charakteristik	42
3.4. Výpočet momentové charakteristiky	44
4. Výpočet metodou konečných prvků	46
4.1. Metoda konečných prvků	46
4.2. Ansoft Maxwell 14	48
4.3. RMxprt (Rotation Machine expert)	49
4.4. Výpočet pracovních charakteristik pomocí RMxprt	50
4.5. Příprava modelu před analýzou metodou konečných prvků	53
4.6. Analýza metodou konečných prvků	55
5. Optimalizace spouštěče	57
5.1. Návrh zvýšení záběrného momentu pomocí analýzy metodou konečných prvků	58
6. Porovnání výsledků	62
7. Závěr.....	67
LITERATURA	69
SEZNAM PŘÍLOH	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Startovací systém jako součást kompletního elektrického systému vozidla[6]...	18
Obrázek 1-2 Startovací moment a zlomový moment motoru [6].....	19
Obrázek 1-3 Spouštěč s výsuvnou kotvou[2].....	23
Obrázek 1-4 Schéma spouštěče s výsuvnou kotvou[4].....	24
Obrázek 1-5: Zasouvání spouštěče s výsuvným pastorkem[2]	25
Obrázek 1-6: Schéma spouštěče s výsuvným pastorkem[5]	26
Obrázek 1-7: Spouštěcí systém Bendix[5]	27
Obrázek 2-1: Celkové uspořádání startovacího systému[6].....	29
Obrázek 2-2: Ekvivalentní obvod pro startovací systém[6].....	30
Obrázek 2-3: Závislost výkonu startéru na zdvihovém objemu motoru [6].....	31
Obrázek 2-4: Charakteristika závislosti rychlosti na momentu pro různé druhy stejnosměrných motorů[6].....	33
Obrázek 2-5: Charakteristické křivky startéru [6].....	33
Obrázek 2-6: Závislost momentu, výkonu a otáček na proudu spouštěče [4].....	34
Obrázek 2-7: Závislost momentu, výkonu a proudu na otáčkách spouštěče [4].....	34
Obrázek 2-8 Náhradní schéma sériového stroje.....	35
Obrázek 2-9 Tvar charakteristik sériového stroje	37
Obrázek 2-10: Otáčková charakteristika motoru [3].....	39
Obrázek 2-11: Úplná charakteristika motoru [3]	40
Obrázek 3-1 Graf charakteristiky chodu naprázdno	42
Obrázek 3-2 Pracovní charakteristiky spouštěče - analyticky vypočtené hodnoty	44
Obrázek 3-3 Graf momentové charakteristiky pro záporné teploty	45
Obrázek 3-4 Graf momentové charakteristiky pro kladné teploty	46
Obrázek 4-1 Síť konečných prvků[14].....	47
Obrázek 4-2 Pracovní prostředí Ansoft Maxwell 14	48
Obrázek 4-3 Uživatelský návrh tvaru drážky rotoru	50
Obrázek 4-4 Tvorba ventilačních otvorů rotoru.....	51
Obrázek 4-5 Nastavení parametrů pro analýzu stroje	51
Obrázek 4-6 Výstupní charakteristiky analýzy stroje	52
Obrázek 4-7 Pracovní charakteristiky spouštěče - hodnoty vypočtené softwarem RMxprt	53
Obrázek 4-8 Volba směru a velikosti proudu ve vinutí	54
Obrázek 4-9 Volba parametru pro následnou analýzu	54
Obrázek 4-10 Detail sítě ve vzduchové mezeře	55
Obrázek 4-11 Výsledná charakteristika závislosti momentu na proudu	56
Obrázek 4-12 Rozložení magnetické indukce ve stroji.....	57
Obrázek 5-1 Závislost hmotnosti na tloušťce trubky	60
Obrázek 5-2 Závislost záběrného momentu na proudu pro jednotlivé tloušťky trubek.....	60



Obrázek 5-3 Uložení vinutí statoru při použití bezešvé trubky o tloušťce 10mm	61
Obrázek 5-4 Rozložení magnetické indukce při použití bezešvé trubky o tloušťce 6,3mm....	62
Obrázek 6-1 Porovnání pracovních charakteristik spouštěče - naměřené, vypočtené a simulované hodnoty	63
Obrázek 6-2 Procentuální chyby vypočtených a simulovaných hodnot momentu v závislosti na proudu	64
Obrázek 6-3 Procentuální chyby vypočtených a simulovaných hodnot výkonu v závislosti na proudu.....	64
Obrázek 6-4 Procentuální chyby vypočtených a simulovaných hodnot otáček v závislosti na proudu.....	65
Obrázek 6-5 Procentuální chyba vypočtených hodnot napětí v závislosti na proudu.....	65
Obrázek 6-6 Závislost momentu na proudu pro všechny výpočetní metody	66



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Váhy jednotlivých typů bezešvých trubek	59
Tabulka 2 Hodnoty záběrného momentu pro jednotlivé druhy bezešvých trubek.....	60



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

M_{str} – moment odporu motoru

M_{ke} – moment od sil komprese a expanze

M_t – moment tření

CAD –Computer aided design, přeloženo: počítačem podporované navrhování

3D – Three-dimensional space, přeloženo: trojrozměrný prostor

RMxprt – Rotation machine expert, přeloženo: expert na rotační stroje



ÚVOD

Tato diplomová práce je zaměřena především na spouštěcí zařízení, jejich konstrukční řešení a spouštění motorů při mezních teplotách. První část práce je věnována seznámení se spouštěči, jejich zařazení do obvodu motoru a popis jednotlivých částí. Dále je zde zmíněna problematika startu motoru při mezních teplotách a výběr startéru podle typu motoru. Poslední kapitola teoretické části obsahuje informace o charakteristikách stejnosměrných a spalovacích motorů.

V praktické části se zabývám výpočtem pracovních charakteristik spouštěče několika způsoby. První z nich je analytický elektromagnetický výpočet spouštěče a druhý výpočet provedeme pomocí programu RMxprt, který je součástí softwaru Maxwell 14. Za pomoci RMxprt a jeho přednastavených šablon strojů vytvoříme ze zadaných hodnot poměrně jednoduše model stroje, pro který pak následně vypočteme jeho pracovní charakteristiky. Poslední výpočet pak provedeme v samotném programu Maxwell 14, kde vypočteme záběrný moment stroje metodou konečných prvků. Výsledky ze všech tří výpočtů pak porovnáme s naměřenými hodnotami spouštěče.

1. Spouštěcí zařízení

Spouštěcí zařízení je souhrnný pojem, který do sebe zahrnuje vlastní elektrické spouštěčesloužící k mechanickému roztočení motoru a zároveň také pomocná spouštěcí zařízení, která jsou nezbytná k úspěšnému spuštění motoru. V některých případech je jejich použití vhodným krokem.

Spouštěče jsou tvořeny těmito základními částmi:

- **Elektromotor** – slouží k přeměně elektrické energie z baterie na energii mechanickou.
- **Elektromagnetický spínač** – tato část zajišťuje vysunutí pastorku z počáteční polohy do polohy pracovní a propojuje hlavní proudový okruh spouštěče.
- **Vysouvací mechanismus** – slouží k přenosu mechanické síly ze spínače na volnoběžnou spojku.
- **Volnoběžná spojka** – její pomocí dochází k přenosu točivého momentu kotvy na ozubený věnec setrvačníku. Druhým úkolem je ochrana kotvy, kde by mohlo dojít vlivem vyšších otáček po nastartování motoru k jejímu zničení.
- **Přední víko** – tato část spouštěče je přichycena k motoru nebo skříni spojky. Drží spouštěč na svém místě a udává tím jeho klidovou polohu. Tato poloha musí zabezpečovat dostatečnou vzdálenost pastorku od ozubeného věnce setrvačníku, aby nedošlo k jejich nechtěnému spojení (například při otřesech) a následnému zničení spouštěče nebo zlomení zubů pastorku.

Spalovací motory mají při svých mnoha výhodách také několik nevýhod. Jednou z nich je potřeba vnější mechanické síly k roztočení na minimální otáčky a uvedení do chodu. Minimálními otáčkami se rozumí stav, při kterém může začít probíhat spalovací proces. Aby mohl motor sám pracovat, musí svým mechanickým výkonem překonávat všechny odporové síly motoru a zároveň ho i urychlovat.

Výstup ze startovacího systému je dán hodnotou momentu odporu motoru při stabilizovaném otáčení motoru. Střední moment odporu, který působí proti otáčení motoru, se skládá ze dvou dílčích hodnot točivého momentu [17], [18]:

$$M_{str} = M_{ke} + M_t \text{ (Nm; Nm, Nm)} \quad (1.1)$$

kde M_{ke} – moment od sil komprese a expanze

M_t – moment tření

Oba tyto momenty nejsou vždy stejné. Jejich velikost závisí na vnějších podmínkách a také samozřejmě na typu a velikosti motoru. Vnějšími podmínkami mohou být například teplota,

opotřebení ložisek nebo stav maziva. Velikost sil se může měnit také v průběhu spouštěcího cyklu nebo i v průběhu jedné otáčky.

M_{ke} je dánrozdílem mezi kompresní a expanzní prací v situaci, kdy palivo neshoří ve válci, snižuje se při zvyšování rychlosti klikové hřídele prakticky nezávisí na teplotě. Nárůst M_{ke} s poklesem rychlosti je hlavně způsoben zvýšením nepravidelností otáčení. M_{ke} může být stanoven pomocí empirického vzorce, který závisí na stupni komprese a na koeficientu nerovnoměrnosti otáčení.

$$M_{ke} = 0,39 \cdot V \cdot (\varepsilon + 6 \cdot \sqrt{\delta}) \text{ (Nm; dm}^3, -, -) \quad (1.2)$$

kde V – objem válců motoru

ε – kompresní stupeň

δ – koeficient nerovnoměrnosti otáčení

Třecí moment se vypočte podle empirického vzorce:

$$M_t = K \cdot A \cdot \nu^\alpha \cdot n^\beta \text{ (Nm; -, -, mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}, -, \text{min}^{-1}, -) \quad (1.3)$$

kde A – konstanta zahrnující vliv konstrukčních parametrů motoru

ν – kinematická viskozita oleje

n – otáčky klikové hřídele

α, β – konstanty podmíněné typem motoru

Nejvýznamnějším problémem, kromě určení konstanty A , je získání konstanty K a exponentů α, β . Exponenty by měly ležet mezi nulou a jedničkou a měly by vyjadřovat poměr tření kapalinného a smíšeného v hlavním kinematickém páru motoru. Avšak pro určité rozhraní viskozity motorového oleje a rychlosti klikové hřídele o nich můžeme uvažovat jako o konstantách. Následující rovnice pro výpočet střední hodnoty momentu odporu způsobené třením závislým na objemu válce motoru a může být odvozena použitím podobné analýzy:

$$M_{str} = 52,46 \cdot A \cdot \nu^{0,5} \cdot n^{0,38} \cdot 10^{-6} \text{ (Nm; mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \text{min}^{-1}) \quad (1.4)$$

Dosažením hodnoty viskozity motorového oleje (SAE 5W-40) při -25°C ($3846\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$), hodnot pro motory Škoda 120 (jako příklad) a zjednodušením dostaneme následující rovnici:

$$M_{str} = 10,796 \cdot n^{0,38} \text{ (Nm; min}^{-1}\text{)} \quad (1.5)$$

Tyto empirické rovnice jsou platné pro motor pohybující se rychlostí od 50 do 200 ot/min. V tomto případě může být takový postup vhodný a zaměřuje se na individuální skupiny motorů definované typem a výstupem. V principu to má za následek ustanovení různých empirických rovnic pro každou skupinu motorů k vypočtení momentu odporu motoru při startu. Moment odporu spalovacího motoru při spouštění za nízkých teplot lze exaktně zjistit jen měřením v mrazicí komoře.

1.1. Možnosti spouštění

Způsobů pro spouštění spalovacích motorů je hned několik. Například sunutí vozidla, stlačeným vzduchem, pomocným zážehovým motorem nebo třeba inerčním spouštěčem. Nejčastějším a nejvhodnějším způsobem je ale spouštění pomocí elektrických spouštěčů. Jejich použití přináší spoustu výhod a patří mezi ně i malé rozměry, dobrá ovladatelnost, pohotovost a schopnost akumulátoru zásobovat energií i další elektrické součástky.

1.2. Požadavky na spouštění motoru

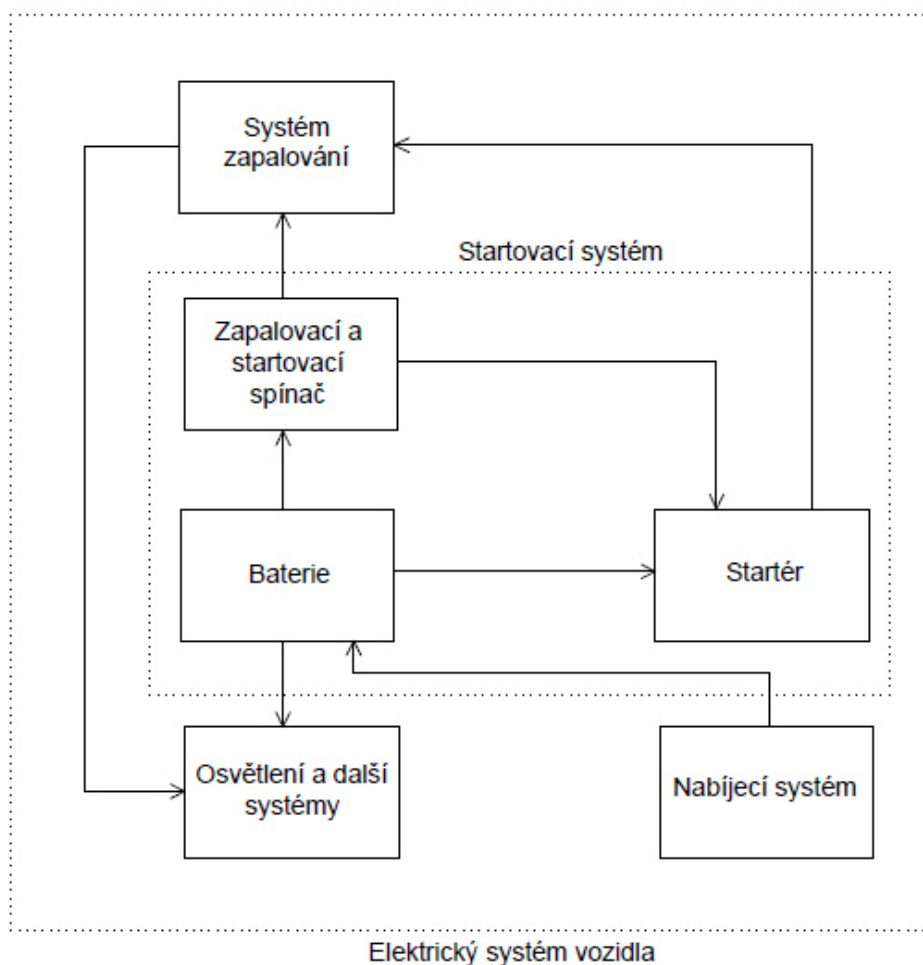
Spalovací motor vyžaduje následující kritéria, aby mohl být úspěšně spuštěn a mohl pokračovat v chodu:

- hořlavá směs,
- kompresní zdvih,
- forma vznícení,
- minimální počáteční rychlost (asi 100 ot/min).

Aby bylo možné splnit první tři kritéria, musí být dosaženo minimální počáteční rychlosti a to je důvod, proč se musí používat spouštěcí zařízení. Schopnost dosáhnout těchto minimálních otáček je závislá na řadě faktorů:

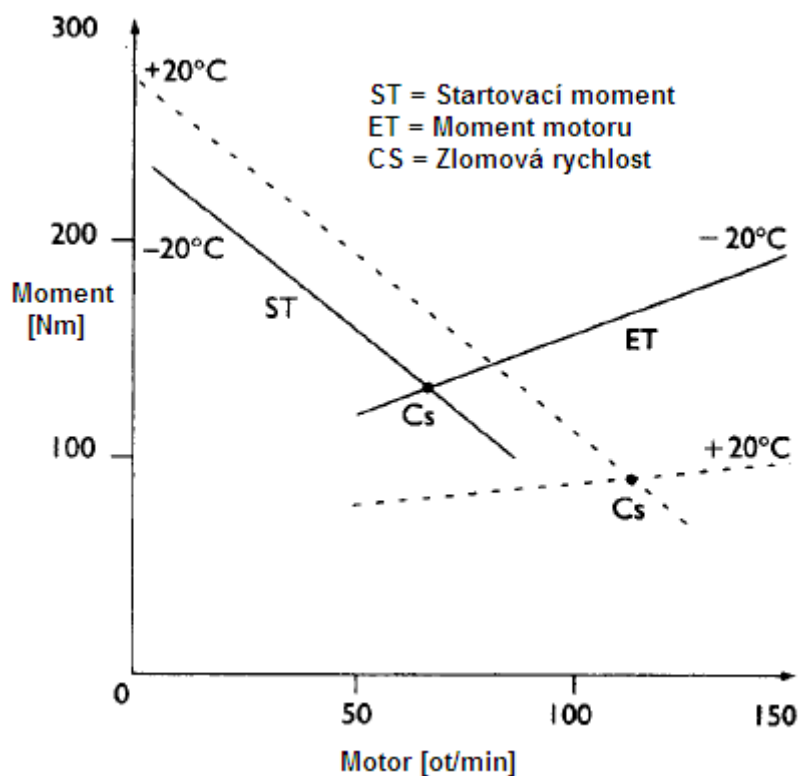
- jmenovitá napětí spouštěcího systému,
- nejnižší možná teplota, při které musí být možno nastartovat motor: toto je známo jako startovací mezní teplota,
- startovací odpor: moment, který je potřeba k nastartování motoru při mezní startovací teplotě,
- vlastnosti baterie,
- pokles napětí mezi baterií a startérem,
- převodový poměr startéru,
- minimální startovací otáčky při mezní startovací teplotě,
- charakteristiky startéru.

Startér nemůžeme uvažovat jako izolovanou komponentu v elektrickém systému vozidla. Zásadní význam má v tomto případě baterie. Dalším mimořádně důležitým faktorem ve vztahu k požadavkům na spouštění je omezení spouštěcí teploty, kdy se při snižování teploty snižuje také točivý moment a zvyšuje krouticí moment potřebný k nastartování motoru.



Obrázek 1-1 Startovací systém jako součást kompletního elektrického systému vozidla[6]

Typické výchozí mezní teploty jsou od -18°C do -30°C pro osobní automobily a -15°C až -20°C pro nákladní automobily a autobusy. Údaje od výrobců jsou často udávány pro $+20^{\circ}\text{C}$ a -20°C .



Obrázek 1-2 Startovací moment a zlomový moment motoru [6]

1.3. Technické požadavky spouštěčů

Pro motorová vozidla se používají výhradně elektrické spouštěče. Důvodem k tomu je mnoho jejich výhod, například:

- snadná ovladatelnost,
- pohotovost,
- malé rozměry a cena,
- baterie sloužící nejen jako zdroj proudu, ale také jako zásobník energie pro elektrický obvod vozidla [15].

Jako elektrické spouštěče se nejčastěji používají stejnosměrné sériové motorky. Pro účely startu motoru jsou vhodné zejména díky velkému záběrnému momentu při malých otáčkách.

1.4. Spouštění motoru za nízkých teplot

Startování spalovacích motorů je problém, který komplikuje spouštění motorů nejen u nás, ale hlavně v oblastech s nízkými průměrnými teplotami. Abychom mohli analyzovat výchozí vlastnosti spalovacích motorů při nízkých teplotách, musíme tyto vlastnosti zjišťovat experimentálně. Tyto experimenty jsou složité, časově náročné a je zapotřebí je provádět v chladicích komorách. Pracuje se na vývoji analytických výpočetních metod, kterými bude možné stanovit odporový moment spalovacího motoru při startování za nízkých teplot.

Hlavním problémem při spouštění motorů je mezní startovací teplota. Při nízkých teplotách (-20°C až -30°C) je komprese motoru vyšší a nedostatek tepla vede k horšímu zapálení směsi. Dále se motorový olej při nízkých teplotách stává více viskózní, což má za následek jeho zhoršenou cirkulaci. Dalším ovlivněným médiem je vzduch, který se stává hustší. Tento fakt má vliv na poměr vzduch-palivo, který působí na hořlavost vzniklé směsi.

Řešení problému spouštění motoru při nízkých teplotách nejvíce pomohlo zavedení elektrických spouštěčů motoru, které jsou v dnešní době samozřejmou součástí většiny motorových vozidel. Spouštěče jsou stále dokonalejší a dosahují stále vyšších otáček a momentů, které zvyšují šanci na úspěšné roztočení motoru i za těch nejnejpříznivějších podmínek.

V některých případech se používají pomocná zařízení, která slouží k předehřátí bloku motoru a tím usnadnění spouštění motoru. Vznětové motory využívají teplo vyzařované žárovkou k předehřátí bloku motoru. Jiný způsob je použit v automobilu Mazda RX-7, kde výrobce zabudoval ohřívač bloku motoru, který přímo ohřívá blok motoru a usnadní tak jeho studený start.

Aby bylo možno zjistit, jestli má spouštěč dostatečný výkon i při mezních teplotách, provádí se dva typy zkoušek:

- **Zkouška protáčení v mrazu** – cílem této zkoušky je měření napětí na svorkách akumulátoru, které by nemělo klesnout pod 6,5V. Druhým měřeným faktorem jsou okamžité otáčky motoru, které by neměly být menší než 40ot/min. Obvykle se měření provádí při teplotách mezi -24°C a -28°C .
- **Zkouška startovatelnosti v mrazu** – úkolem této zkoušky je zjistit, jestli je motor při daných mezních podmínkách schopen nastartovat.

Provedení takových zkoušek je náročné a to hlavně na vybavení potřebné k takovým zkouškám. Firma Magnetron tyto zkoušky provedla v mrazicí komoře, do které byl umístěn celý spalovací motor spolu s baterií a potřebnou kabeláží. Acelá soustava byla vychlazena na teplotu -24°C . Aby bylo možné zahájit měření, musí dosáhnout teplota oleje motoru a elektrolytu akumulátoru předepsaných hodnot. Po splnění těchto podmínek se může přejít k samotnému měření, které trvá 3 sekundy a při kterém jsou měřeny následující veličiny:

- n – otáčky klikové hřídele motoru,
- I_s – proud odebíraný spouštěčem,
- U_s – napětí na spouštěči,
- U_{BAT} – napětí na akumulátoru.

Po měření se hodnotí již výše zmíněné podmínky, napětí na svorkách akumulátoru, které nesmí klesnout pod 6,5V a otáčky klidové hřídele motoru nesmí být menší než 40ot/min.

1.5. Konstrukce spouštěčů

Spouštěč je jeden z mnoha akčních členů většiny spalovacích motorů a v celé soustavě má velký význam, protože bez něj by nedošlo ke spuštění spalovacího motoru. Jelikož se nejedná o stroj, který by pracoval po celou dobu chodu motoru, ale pouze při jeho spuštění, snaží se konstruktéři vyvíjet čím dál menší a lehčí konstrukce, ve kterých je elektrický a magnetický obvod spouštěčů maximálně využit.

V dnešní době se používají motorky s různými typy buzení, nejčastěji se používají motorky se sériovým nebo kompaunním buzením. Výrobci spouštěčů se ale čím dál více přiklání při vývoji nových spouštěčů k těm, které používají k buzení permanentní magnety. Jde tedy o cizí buzení. Chtějí tím docílit zvýšení otáček spouštěcích zařízení spolu se snížením rozměrů a hmotnosti.

Zvyšování otáček má svoje limity, které je možno zvýšit pomocí přídavného zařízení. V tomto případě se jedná o vložení převodu mezi pastorek spouštěče a hřídel elektrického motoru. Nejčastěji se používá převod planetový, který má tu výhodu, že při jeho použití je zachován průměr spouštěče. Při použití spouštěče s buzením permanentními magnety můžeme docílit vyššího převodu planetové převodovky a tím zvýšit otáčky spouštěče, přičemž jako ideální poměr převodu mezi spouštěčem a motorem se udává 1:20. Tohoto poměru však bez použití převodu nemůžeme dosáhnout.

Použití vhodných typů spouštěčů je závislé také na typu a obsahu motoru, pro který je daný spouštěč určen. Jestliže máme motory pro osobní automobily do obsahu 1,9 litru, postačí použít spouštěč s permanentními magnety bez převodu. Výroba takového převodu pro malý spouštěč by byla náročná a zvýšila by se tím cena motoru. Pro vyšší obsahy motorů už je mezi motor a spouštěč vložen převod. Pro spouštěče o výkonech 2kW a vyšší se již nepoužívá buzení s permanentními magnety, ale již dříve zmíněné sériové nebo kompaunční buzení.

Z elektrického hlediska jsou spouštěče jednoduché sériové elektromotory, ale po mechanické stránce jsou to složitá zařízení, na které je kladeno mnoho požadavků a v hodně případech i protichůdných. S těmito protichůdnými požadavky se museli konstruktéři vypořádat a zvolit mezi nimi jistý kompromis.

- Jestliže není spouštěč v činnosti, musí být zajištěno, aby byl pastorek bezpečně zajištěn mimo záběr s ozubeným věncem setrvačníku.
- Musí být zajištěno, že k zasouvání pastorku do ozubeného věnce na setrvačníku dojde i tehdy, když zub pastorku narazí na zub věnce.
- Točivý moment při zasouvání pastorku nesmí být příliš velký, aby při nedokonalém zasunutí pastorku nedošlo k poškození zubů věnce nebo pastorku.
- Při plném záběru musí být mechanismus schopný přenášet celý točivý moment. Musí však být chráněn proti přetížení při zpětném zážehu spalovacího motoru.
- Pastorek musí zůstat v záběru po celou dobu spouštění motoru. Vysunout se může až tehdy, když dá řidič pokyn k přerušení nebo když motor spolehlivě pracuje.
- Jakmile se motor naplno rozběhne, musí se ozubení samovolně uvolnit a vysunout ze záběru.
- Jakmile řidič přestane působit na ovládací zařízení, musí být spouštěcí obvod rozpojen, pastorek se musí vrátit do klidové polohy a musí být zastaven, aby byl připravený k dalšímu použití.

Kromě výše uvedených mechanických požadavků musí spouštěč splňovat ještě další požadavky:

- Nejmenší přípustný výkon spouštěče se určuje podle nejnižší rychlosti otáčení a momentu, který je potřebný k otáčení motoru touto rychlostí při nejnižší předpokládané teplotě. Jako nejnižší spouštěcí rychlost je definována rychlost, při níž při nejnižší předpokládané teplotě dojde ve válci k zažehnutí palivové směsi. Aby došlo k roztočení motoru na tuto nejnižší požadovanou rychlost, musí být moment spouštěče při záběru i roztáčení vždy vyšší než moment odporu motoru. [2]
- Spouštěč musí být navržen tak, aby splňoval minimální dobu životnosti (pro osobní automobily se počítá se 45000 spuštění).
- Musí být určena nejnižší teplota, při níž bude motor bezpečně spuštěn (pro osobní automobily je to teplota -30°C).
- Spouštěč by měl být nenáročný na údržbu a případné opravy.
- Výkony spouštěčů se pohybují od 0,22 do 25kW.

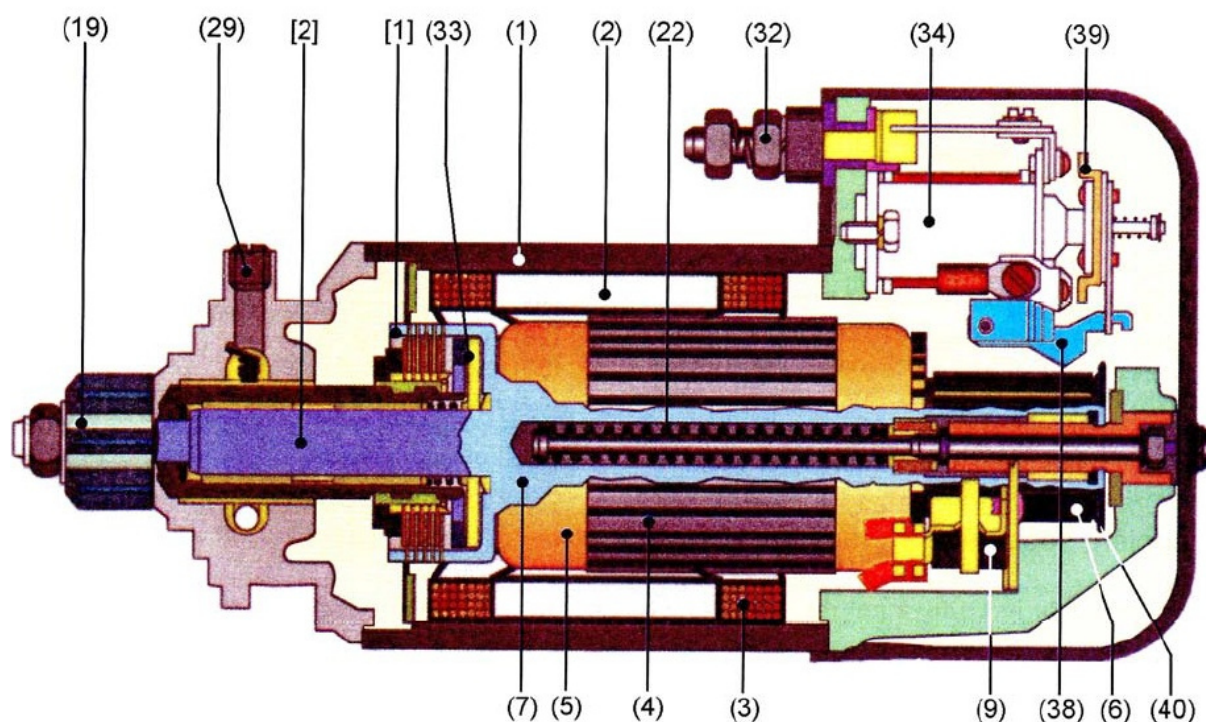
1.6. Dělení spouštěčů z konstrukčního hlediska

V průběhu postupného vývoje elektrických spouštěčů se objevilo mnoho jejich různých řešení. Postupem času však zůstaly tři nejpoužívanější systémy se zasouváním pastorku do ozubeného věnce. Jsou jimi

1. systém s výsuvnou kotvou
2. systém s výsuvným pastorkem
3. systém Bendix

1.6.1. Systém s výsuvnou kotvou

U spouštěče s výsuvnou kotvou se při zasouvání pastorku do záběru posouvá celá kotva. Hřídel pastorku je spojena s hřídelí spouštěče pomocí momentové spojky nebo v některých případech pomocí volnoběžky. Pastorek se může otáčet kolem hřídele. V axiálním směru se však jejich vzájemná poloha nemění.



Obrázek 1-3 Spouštěč s výsuvnou kotvou[2]

- | | | |
|------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| (1) - pouzdro statoru | (9) – kartáč | (38) – západka |
| (2) – pólový nástavec | (19) – pastorek | (39) – sklopný můstek |
| (3) – statorové vinutí | (22) – vratná pružina | (40) – uvolňovací kroužek |
| (4) – rotor | (29) – šroub s mazacím otvorem | [1] – unašeč |
| (5) – vinutí rotoru | (32) – přívod proudu | [2] – hřídel pastorku |
| (6) – komutátor | (33) – momentová spojka | |
| (7) – hřídel rotoru | (34) – ovládací relé | |

Spouštěče s výsuvnou kotvou nejsou, i přes svévýhodné pracovní vlastnosti, používány ve větším rozsahu. K těm negativním vlastnostem patří například velká hmotnost celé posouvané části. Další nevýhodou je nutnost rotoru posouvat se směrem do kopce při vozidle umístěném směrem z kopce, což může způsobit problémy při startování. Je také potřeba zajistit, aby nedocházelo k nechtěným úderům pastorku do ozubení točícího se setrvačnicku při zrychlování nebo otřesech [5].

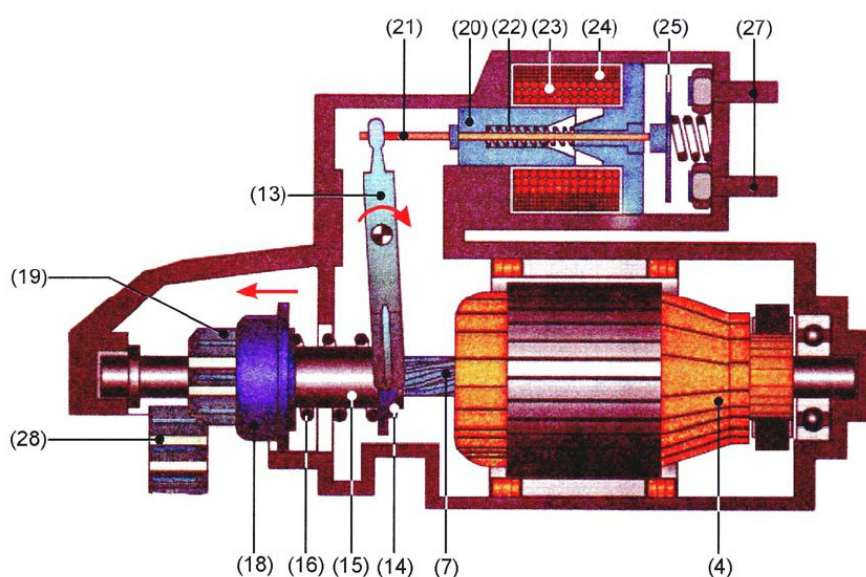
1.6.2. Systém s výsuvným pastorkem

V současné době patří tyto spouštěče mezi nejrozšířenější a nejvíce používané. Využívají se pro široký rozsah výkonů od 0,5kW do 15kW, v některých případech i do 18kW. Spouštěče s výsuvným pastorkem se dělí na 2 základní typy: jednostupňové a dvoustupňové.

- *Jednostupňový spouštěč s výsuvným pastorkem*

Aby mohla být vytvořena zasouvací síla, používá se elektromagnet s posuvným jádrem spojeným se svorníkem. Na svorník působí z jedné strany zasouvací páka a na opačném konci je umístěn kontaktní můstek opatřen pružinou, která je k němu pevně připojena a má za úkol držet konstantní tlak mezi kontaktním můstkem a kontakty.

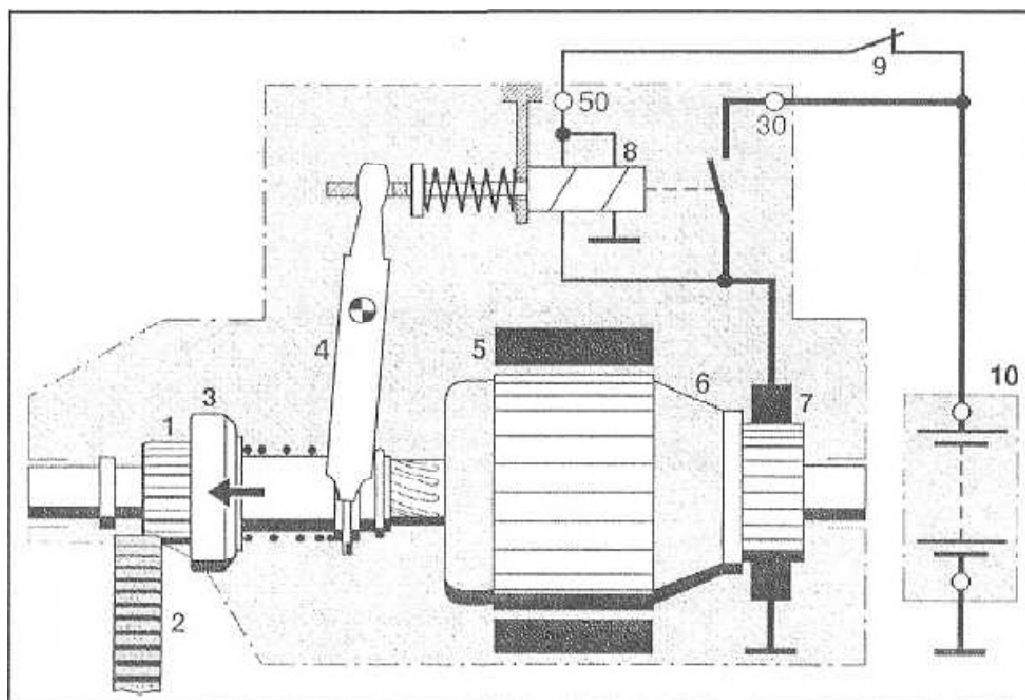
Při sepnutí spínače začne být jádro vtahováno elektromagnetem, kam je připojeno vtahovací vinutí. Pohyb jádra se svorníkem, který je připojen na zasouvací páku, začne přenášet pohyb na tuto páku. Zasouvací páka se tedy začne otáčet směrem doprava a její dolní konec bude posunovat pouzdro spolu s volnoběžkou proti síle zasouvací pružiny a pastorkem směrem do záběru. Zasouvací pouzdro bývá uloženo na rovných nebo někdy na velmi strmých vícechodých šroubových drážkách. Tyto šroubové drážky se využívají pro spouštěče menších výkonů. Jakmile se pastorek částečně zasune do první mezery mezi zuby ozubeného věnce a hřídel spouštěče se pomalu otáčí, díky šroubovým drážkám je pastorek vtažen do plného záběru, aniž by bylo zasouvacím pouzdem pohybováno pomocí zasouvací páky. Šroubové drážky tak dokážou zmenšit pracovní zdvih jádra elektromagnetu. Aby se dosáhlo snadnějšího zasunutí pastorku, mají zuby na pastorku i zuby na ozubeném věnci sražené hrany.



Obrázek 1-5: Zasouvání spouštěče s výsuvným pastorkem[2]

- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| (4) – rotor | (20) – jádro elektromagnetu |
| (7) – hřídel rotoru | (21) – svorník |
| (13) – zasouvací páka | (22) – vratná pružina |
| (14) – zasouvací objímka | (23) – vtahovací vinutí |
| (15) – zasouvací pouzdro | (24) – přidržovací vinutí |
| (16) – zasouvací pružina | (25) – kontaktní můstek |
| (18) – volnoběžka | (27) – svorník s kontaktem |
| (19) – pastorek | (28) – ozubený věnec |

Může nastat případ, kdy při zasouvání narazí zub pastorku na zub ozubeného věnce. V takovém případě dojde k zastavení pohybu pastorku. Avšak zasouvací pružina je dále stlačována zasouvací pákou. Zasouvací páka se pootáčí do té doby, než dojde k sepnutí kontaktního můstku a kontaktů. V tu chvíli se začne rotor otáčet, a jakmile se potkají zuby pastorku s mezerami mezi zuby ozubeného věnce, dojde k zasunutí pastorku do záběru[2].



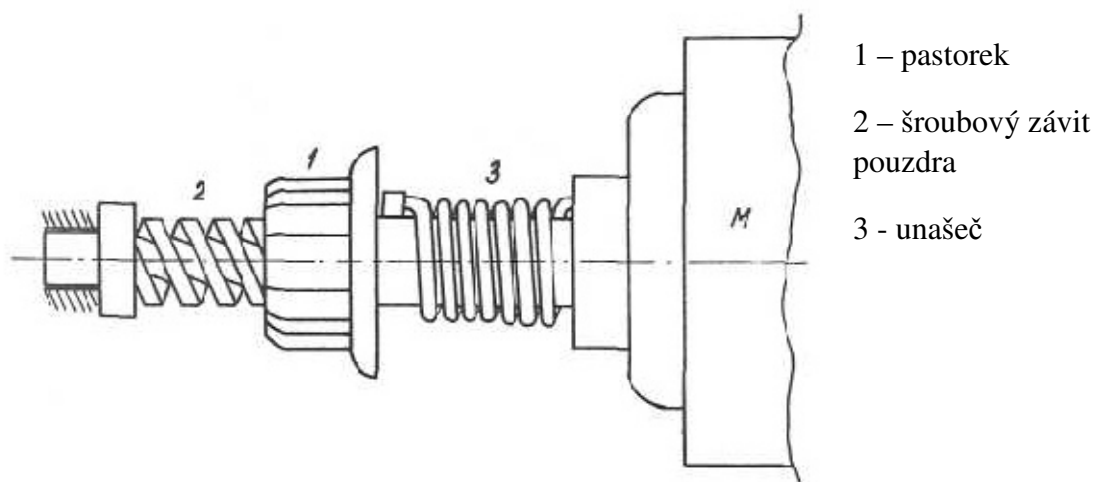
Obrázek 1-6: Schéma spouštěče s výsuvným pastorkem[5]

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| (1) – pastorek | (6) – kotva |
| (2) – ozubený věnec | (7) – komutátor s kartáči |
| (3) – válcová volnoběžka | (8) – zasouvací relé |
| (4) – zasouvací páka | (9) – spínač startéru |
| (5) – permanentní magnet | (10) – baterie |

Zasouvací elektromagnet má připojeny dvě vinutí. Jedno vtahovací a druhé přidržovací. Při sepnutí spínače startéru proud prochází oběma vinutími, jejichž magnetické pole se sčítá, a tím je vtahováno jádro elektromagnetu. Jakmile je jádro posunuto do takové polohy, aby došlo k sepnutí kontaktů, dojde k přivedení plného palubního napětí a startér je roztočen. Sepnutí kontaktu zároveň odpojí vtahovací vinutí, protože k držení pastorku v záběru stačí pouze malá síla, kterou je schopno obstarat pouze přidržovací vinutí.

1.6.3. Systém Bendix

Tento systém se oproti předchozím dvěma systémům liší v tom, že pro zasunutí pastorku do záběru využívá setrvačné energie samotného pastorku. Pastorek má na vnitřní straně plochý nebo lichoběžníkový závit a je uložen na pouzdu s pohyblivým šroubovým závitem. Pouzdro je poháněno motorem pomocí unašeče, který slouží k tlumení nárazů. Jakmile začne protékat proud spouštěným motorem a roztočí se hřídel rotoru, pastorek se kvůli vlivu setrvačnosti nemůže příliš urychlit a proto se místo otáčení bude ve směru osy pomalu posouvat po závitu pouzdra směrem k ozubenému věnci. Jestliže zapadne zub pastorku do mezery mezi zuby ozubeného věnce, zasune se pastorek až na doraz do záběru a spouštěč pak začne otáčet motorem. Jestliže však narazí zub na zub, pohyb pastorku je zastaven a pomocí šroubovice je stržen do mezery mezi zuby a zasunut na doraz do záběru. Jakmile je pastorek zasunut na doraz do záběru, spouštěč se již otáčí značnou rychlostí a případné nárazy jsou tlumeny pružinou nebo lamelovou spojkou.



Obrázek 1-7: Spouštěcí systém Bendix[5]

Jakmile se spouštěný motor rozběhne a otáčí se rychleji než rotor spouštěče, ozubený věnec dá impuls pastorku, který se vyšroubuje ze záběru a setrvačností se vrátí do původní polohy[5].

Tento typ spouštěče se využíval dříve, někdy i pro velké výkony. Jeho největší výhodou byla jednoduchost jeho konstrukce. Na druhou stranu měl také celou řadu nevýhod, jako bylo vybíhání pastorku ze záběru při přechodných zrychleních motoru, možnost zpříčení při naražení zubu na zub, větší opotřebovávání zubů nebo praskání tlumicí pružiny. Pro odstranění těchto poruch se propracovávala jeho konstrukce, ale díky tomu ztratil právě svou základní výhodu – jednoduchost. Proto byl postupem času nahrazován spouštěči s výsuvným pastorkem.

1.7. Údržba a kontrola spouštěčů

Spouštěč je zařízení, které pracuje krátce při rozběhu motoru. I když stále pracuje bez poruchy, měly by se provádět pravidelné kontroly, aby se předešlo jeho poruše nebo v horším případě zničení. Při zjištění i drobné závady by se měla provést údržba nebo oprava dané části, aby mohl spouštěč nadále spolehlivě fungovat. Kompletní oprava spouštěče se provádí při generální opravě motoru [15].

1.7.1. Údržba částí spouštěče

- **Kontakty a Svorky** – kontrolují se kontakty spínačů, jestli nejsou příliš opálené a svorky, jestli nemají příliš velký odpor (maximálně $1\text{m}\Omega$).
- **Uhlíky** – uhlíky se musí ve vodítkách lehce posouvat a musí mít dostatečnou délku. Kontroluje se také síla přitlačných pružin.
- **Komutátor** – nepoškozený komutátor by měl mít dokonale lesklý povrch bez viditelných poruch. Při poškození povrchu by se měl lehce přebrousit. Hloubka izolace mezi lamelami by měla být 0,4 až 0,8 mm.
- **Volnoběžka** – má chránit proti přetížení, takže při nesprávném otáčení pastorku musí prokluzovat. Nesmí však prokluzovat při správném otáčení, čili v záběru.
- **Hřídel** – vůle rotoru v kluzném ložisku má být maximálně 0,2 mm a axiální vůle podle výrobce 0,7 až 1,3 mm [16].

1.7.2. Kontrola spouštěče po opravě

Po opravě spouštěče nebo některé jeho části se pak musí vyzkoušet jeho funkčnost. To se nejčastěji provádí za použití zkušební stolice. Zkoušky by se měly provádět ve stavu za studena a jsou následujícího druhu:

- Spouštěč musí dosáhnout jmenovitého výkonu při roztočení na předepsané otáčky. Dalšími sledovanými veličinami jsou napětí zatěžovací proud.

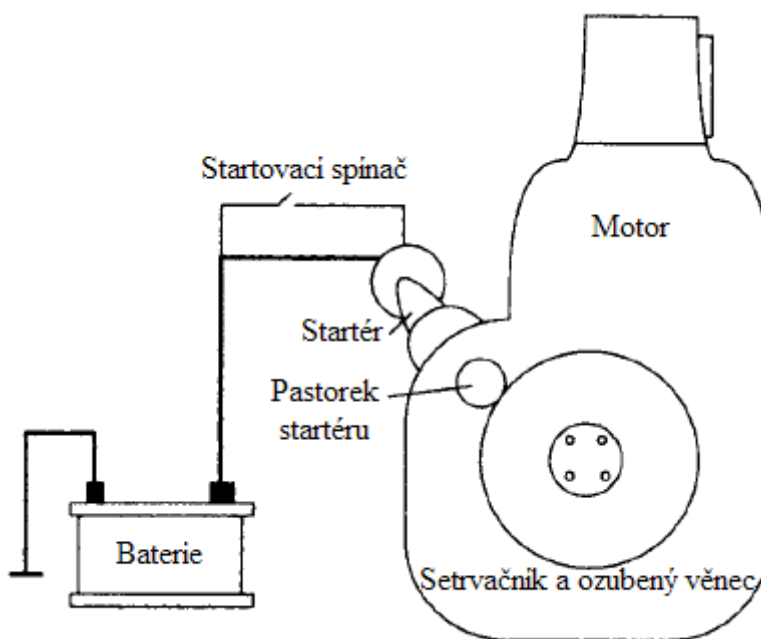
- Při chodu spouštěče naprázdno musí dosahovat otáček a proudů podle tabulek. Musí tak sepnout i při napětí, které je menší o 25% než jmenovité a také musí při dalším poklesu napětí na 45% jmenovitého zůstat v sepnutém stavu.
- Je-li spouštěč připojen na zkušební akumulátor, musí dosáhnout předepsaného záběrného momentu. Jestli tomu tak není, spouštěč je považován za vadný [16].

2. Návrh spouštěcích systémů

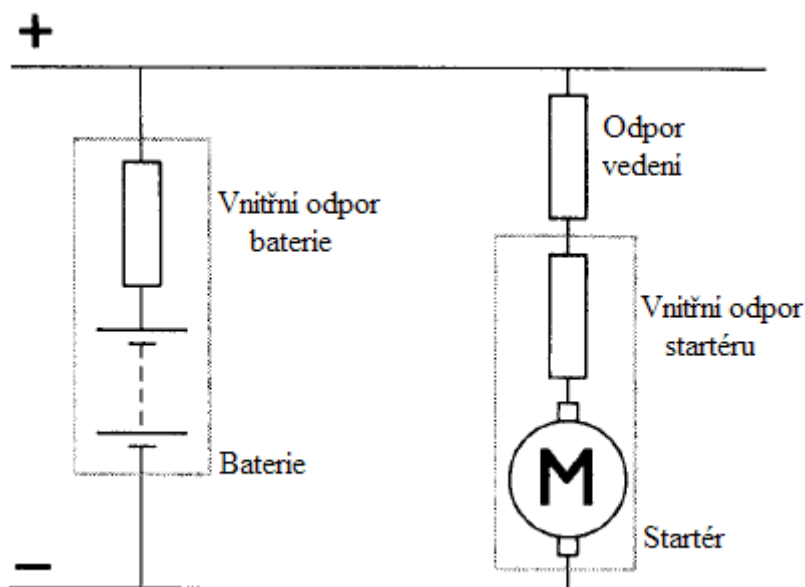
V předchozí kapitole jsem uvedl osm důležitých faktorů na spouštěcí systémy. Dalšími důležitými faktory jsou:

- dlouhá životnost a minimální údržba,
- nepřetržitá připravenost k provozu,
- robustnost, aby vydržely startovací síly, vibrace, korozi a teplotní cykly,
- nejnižší možná váha a velikost,
- nízká výrobní cena.

Na následujícím obrázku je vidět obecné uspořádání spouštěcího systému. Musíme také správně určit minimální počáteční rychlost pro konkrétní motory. Ta se výrazně liší podle typu a konstrukce motoru.



Obrázek 2-1: Celkové uspořádání startovacího systému[6]

**Obrázek 2-2: Ekvivalentní obvod pro startovací systém[6]**

Na obrázku je vidět ekvivalentní zapojení obvodu pro startér a baterii. Je zde patrné, jak moc je výstup startéru omezen odporem vedení a vnitřním odporem baterie. Čím bude celkový odpor nižší, tím bude vyšší výstup ze startéru.

Při navrhování startérů musíme uvažovat další dvě okolnosti. Startér má v motoru většinou předem dané umístění, ale umístění baterie se musí pečlivě uvážit. Čím blíže bude baterie ke startéru, tím budou startovací kabely kratší. Při větší délce budou potřeba kabely s větším průřezem, aby se zajistil jejich nízký odpor. V závislosti na zamýšleném použití vozidla se v některých případech používají speciální těsnicí opatření, aby se zabránilo vniknutí nečistot. Tyto opatření se používají například pro off-road vozidla, jejichž součásti jsou vystaveny extrémním podmínkám a musí být na tyto podmínky vybaveny.

2.1. Základní parametry spouštěčů

Spouštěcí otáčky, na které musí být motor roztočen, aby mohl sám pracovat, závisí na typu motoru. U zážehových motorů je potřeba dosáhnout 40 až 150 otáček za minutu. U vznětových motorů s žhavicími svíčkami je potřeba 60 až 140 otáček za minutu. Bez žhavicích svíček je nutno vyšších otáček a to asi 100 až 200 otáček za minutu. Při srovnání dvou motorů o stejném objemu válců potřebuje vznětový motor ke svému roztočení větší výkon než motor zážehový.

Jmenovité napětí závisí na typu vozidla:

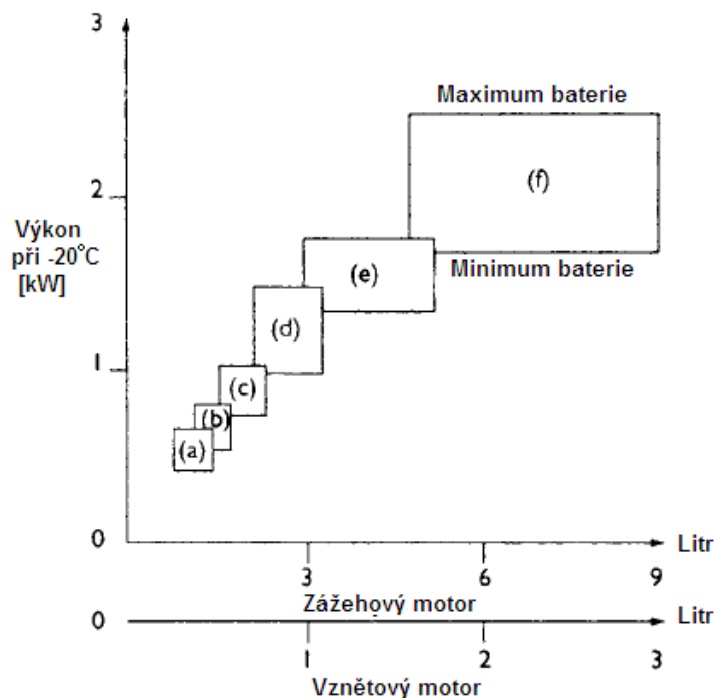
- 12V – osobní automobily, střední nákladní automobily a traktory
- 24V – těžké nákladní automobily
- 48V – velké stacionární motory, kolejová vozidla

Výkon

- 150W – 800W – jednostopá vozidla (nejčastěji bez zasouvání pastorku)
- 500W – 1,5kW – osobní automobily
- 2 kW – 5kW – střední nákladní automobily a traktory
- 4,4kW – 8kW – těžké nákladní automobily
- Nad 8kW – velké stacionární motory, lodní motory atd.[2]

2.2. Výběr startéru

Při správném výběru musí startér splňovat všechna výše uvedená kritéria. Podle toho, jaký je potřebný moment k roztočení motoru na minimální otáčky pro uvedení do chodu, se určí z této charakteristiky točivý moment, který bude od startéru vyžadován. Výrobci startérů poskytují tato data formou charakteristik. V údajích je uveden moment, otáčky, výkon a spotřeba proudu při teplotách $+20^{\circ}\text{C}$ a -20°C . Jmenovitý výkon motoru je citován jako maximální výkon při teplotě -20°C a s použitím doporučené baterie.



Obrázek 2-3: Závislost výkonu startéru na zdvihovém objemu motoru [6]

Na obrázku lze vidět, jak závisí požadovaný výkon spouštěče na velikosti motoru. Dobré obecné vodítko může být, jaký točivý moment je potřebný na litr objemu motoru při mezní teplotě. U motorů s menším počtem válců je například potřeba větší točivý moment vzhledem k většímu posunutí pístu ve válci, což nám určí špičkové hodnoty točivého momentu. Další důležitým faktorem je kompresní poměr. Pro názornou souvislost mezi točivým momentem a výkonem uvedu tento příklad. Předpokládejme nejhorší podmínky (-20°C) a čtyřválcový dvoulitrový motor. Motor vyžaduje 480Nm k překonání statického tření a 160Nm k udržení minimální startovací rychlosti 100ot/min. Převodový poměr mezi pastorkem a kroužkem je 10:1. Motor musí být schopný vytvořit maximální záběrný moment 48Nm a hnací moment 16Nm. Točivý moment je převeden na výkon podle následujícího vzorce:

$$P = M \cdot \omega \text{ (W; Nm, rad}^{-1}\text{)} \quad (2.1)$$

kde P - výkon

M - točivý moment

ω - úhlová rychlost

Úhlová rychlost se vypočte podle vzorce:

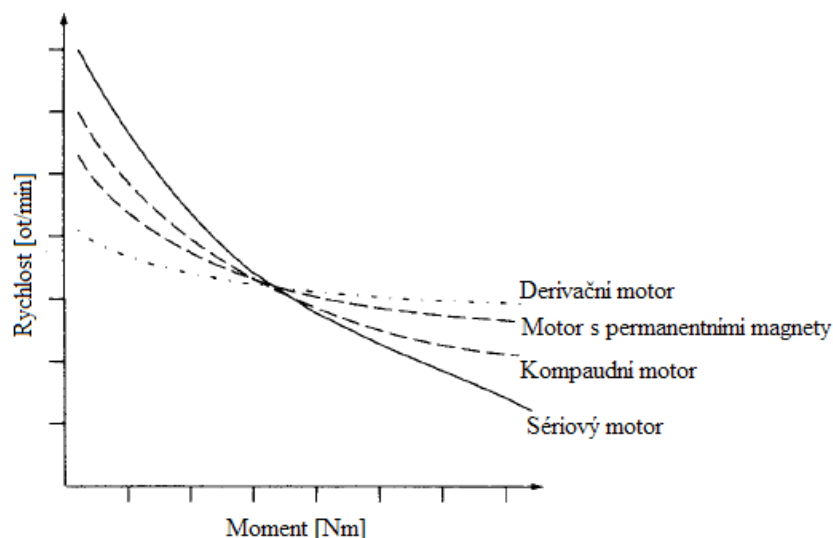
$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \text{ (rad}^{-1}\text{; min}^{-1}\text{)} \quad (2.2)$$

kde n - jsou otáčky

V tomto případě výkon vyvinutý při 1000ot/min s točivým momentem 16Nm je asi 1680W. Podle předchozího obrázku by pro tento případ vyhovoval startér označený (e). Doporučená baterie bude mít 55Ah a 255A výkon při studeném startu.

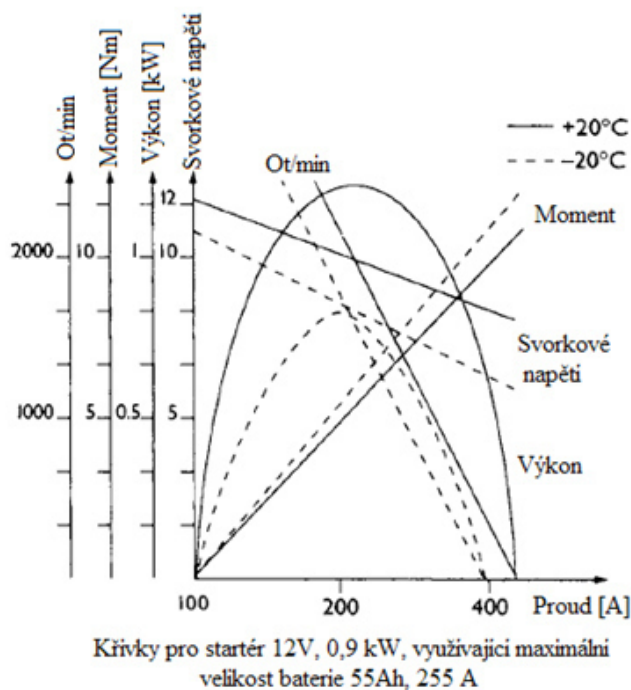
2.3. Charakteristiky stejnosměrného motoru

Jako spouštěče se ne často používají stejnosměrné motory. V dnešní době je možné navrhnout motor s vlastnostmi, které jsou nejvhodnější pro konkrétní situaci. Jak je vidět na následujícím obrázku, kde jsou znázorněny charakteristiky závislosti otáček na momentu, existují 4 typy stejnosměrných motorů. Je to derivační motor, sériový motor, kompaundní motor a motor s permanentními magnety.



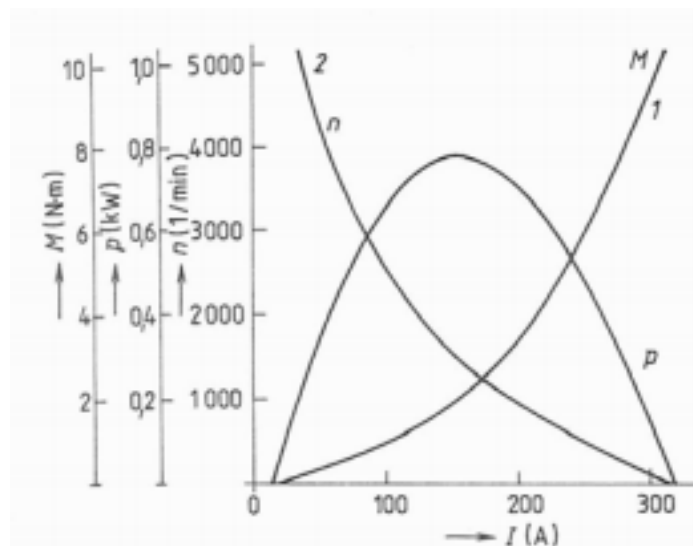
Obrázek 2-4: Charakteristika závislosti rychlosti na momentu pro různé druhy stejnosměrných motorů[6]

Informace o jednotlivých spouštěčích jsou k dispozici ve formě charakteristických křivek. Na následujícím obrázku jsou uvedeny charakteristiky typického spouštěče pro lehká vozidla. Graf ukazuje, jak se mění rychlost motoru v závislosti na zatížení. Bez zatížení motor vyvine příliš velké otáčky a mohlo by dojít k jeho zničení. Při vysokých otáčkách bez zatížení působí na spouštěč velké odstředivé síly, které mohou mít za následek zničení vinutí. Za povšimnutí stojí, že maximální výkon motoru je vyvinut při středních otáčkách, ale maximálního momentu dosáhne při nulových otáčkách.



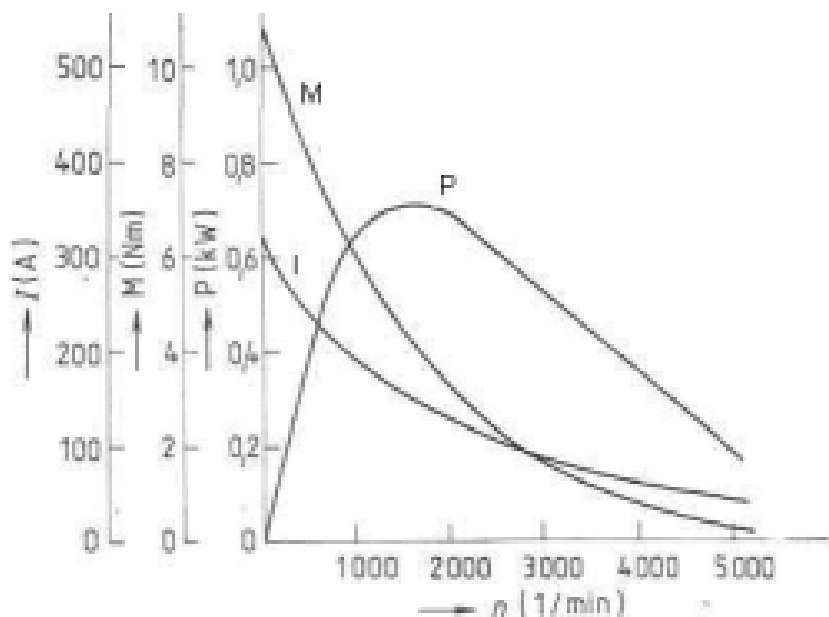
Obrázek 2-5: Charakteristické křivky startéru [6]

K dalším důležitým charakteristikám patří také závislost momentu, výkonu a otáček na proudu spouštěče. Průběh momentu spouštěče má parabolický charakter. Při nulových otáčkách (a současně nejvyšším proudu) dosahuje nejvyšší hodnoty a po rozběhu klesá. Výkon spouštěče má parabolický průběh s maximem, které nastává při proudu $I_K/2$. I_K je proud, který teče do stojícího spouštěče (v grafu je I_K cca 320A).



Obrázek 2-6: Závislost momentu, výkonu a otáček na proudu spouštěče [4]

Stejné veličiny jsou uvedeny i v následujícím grafu, nyní jsou pouze v závislosti na otáčkách spouštěče.

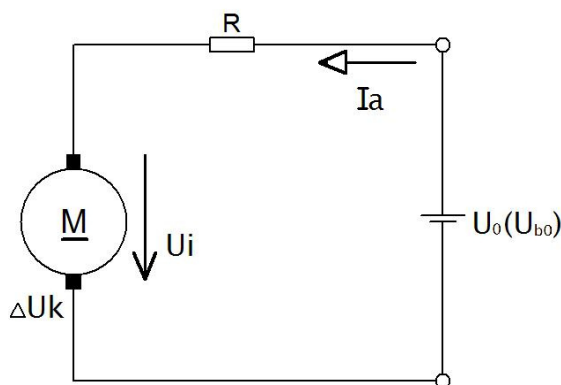


Obrázek 2-7: Závislost momentu, výkonu a proudu na otáčkách spouštěče [4]

2.3.1. Odvození charakteristik SS strojů

Sériové stroje (motory)

Budeme vycházet z následujícího náhradního schématu:



Obrázek 2-8 Náhradní schéma sériového stroje

Napětí baterie

$$U_{B0} = U_i + R \cdot I_a + \Delta U_k \text{ (V; V, } \Omega, \text{ A, V)} \quad (2.3)$$

Z této rovnice vyplývá vztah pro indukované napětí

$$U_i = U_{B0} - (R \cdot I_a + \Delta U_k) \text{ (V; V, } \Omega, \text{ A, V)} \quad (2.4)$$

kde: U_i – indukované napětí

R – součet všech odporů zapojených v sérii

ΔU_k – úbytek napětí na kartáčích

V případě, že motor stojí, je indukované napětí i otáčky motoru nulové

$$U_i = 0 \text{ V, } n = 0 \text{ ot/min}$$

Proud nakrátko (záběrový proud)

$$I_k = \frac{U_{B0} - \Delta U_k}{R} \text{ (A; V, V, } \Omega) \quad (2.5)$$



Elektromagnetický výkon

$$P_E = U_i \cdot I_a \text{ (W; V, A)} \quad (2.6)$$

Po dosazení z rovnice (2.4)

$$P_E = (U_{B0} - R \cdot I_a - \Delta U_k) \cdot I_a \text{ (W; V, } \Omega, \text{ A, V)} \quad (2.7)$$

Výsledný vztah pro elektromagnetický výkon

$$(2.8) \quad P_E = (U_{B0} - \Delta U_k) \cdot I_a - R \cdot I_a^2 \text{ (W; V, V, A, } \Omega, \text{ A)}$$

Derivace podle I_a

$$\frac{dP_E}{dI_a} = (U_{B0} - \Delta U_k) - 2 \cdot R \cdot I_a \text{ (W, A; V, V, } \Omega, \text{ A)} \quad (2.9)$$

Extrém derivace

$$\frac{dP_E}{dI_a} = 0$$

tedy

$$(U_{B0} - \Delta U_k) - 2 \cdot R \cdot I_a = 0 \quad (2.10)$$

Z této rovnice pak vyjádříme I_{aPEmax}

$$I_{aPEmax} = \frac{U_{B0} - \Delta U_k}{2R} = \frac{1}{2} I_k \text{ (A; V, V, } \Omega, \text{ A)} \quad (2.11)$$

Dosazením do rovnice (2.8) získáme maximální elektrický výkon

$$P_{Emax} = \frac{(U_{B0} - \Delta U_k)^2}{4R} \text{ (W; V, V, } \Omega) \quad (2.12)$$

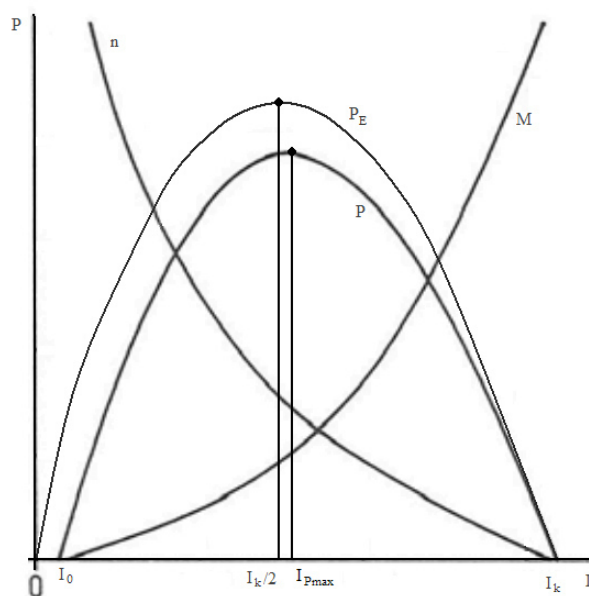
nebo

$$P_{Emax} = \frac{U_{B0} - \Delta U_k}{4} \cdot I_k \text{ (W; V, V, S)} \quad (2.13)$$

Výkon na hřídeli

$$P = P_E - \Delta P_m - \Delta P_{Fe} \text{ (W; W, W, W)} \quad (2.14)$$

Tvar charakteristik



Obrázek 2-9 Tvar charakteristik sériového stroje

$$I_{P \max} = \frac{I_0 + I_k}{2} \text{ (A; A, A)} \quad (2.15)$$

Moment (na hřídeli)

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot n} \text{ (Nm; W, rad}^{-1}\text{; W, min}^{-1}\text{)} \quad (2.16)$$

Elektromagnetický moment

$$M_E = c_M \cdot \Phi \cdot I_a \text{ (Nm; -, Wb, A)} \quad (2.17)$$

kde
$$c_M = konst. = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} (-; -, -, -)$$

Pro nenasyčený stav magnet. obvodu $\Phi = c \cdot I_a$, bude elektromag. moment

$$M_E = c_M \cdot c \cdot I_a^2 \text{ (Nm; -, Wb, A)} \quad (2.18)$$

Pro nasycený stav magnet. obvodu $\Phi = c_2$, bude elektromag. moment

$$M_E = c_M \cdot c_2 \cdot I_a \text{ (Nm; -, Wb, A)} \quad (2.19)$$

Odvození otáček

Platí, že:

$$U_i = c_E \cdot \Phi \cdot n \text{ (V; -, Wb, min}^{-1}\text{)} \quad (2.20)$$

kde c_E - Essonova konstanta
$$c_E = konst. = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} (-; -)$$

Odtud pak plyne vzorec pro výpočet otáček

$$n = \frac{U_i}{c_E \cdot \Phi} \text{ (min}^{-1}\text{; V, -, Wb)} \quad (2.21)$$

Pokud můžeme předpokládat, že $\Phi = c \cdot I_a$ a $U_i = U_{B0} - R \cdot I_a$, pak dostaneme

$$n = \frac{U_{B0} - R \cdot I_a}{c_E \cdot c \cdot I_a} = \frac{U_{B0}}{c \cdot c_E \cdot I_a} - \frac{R}{c \cdot c_E} = \frac{a}{I_a} - b \text{ (min}^{-1}\text{; V, } \Omega, \text{ A, Wb, -, A)} \quad (2.22)$$

Výsledná křivka bude tedy mít tvar paraboly.

2.4. Charakteristiky spalovacího motoru

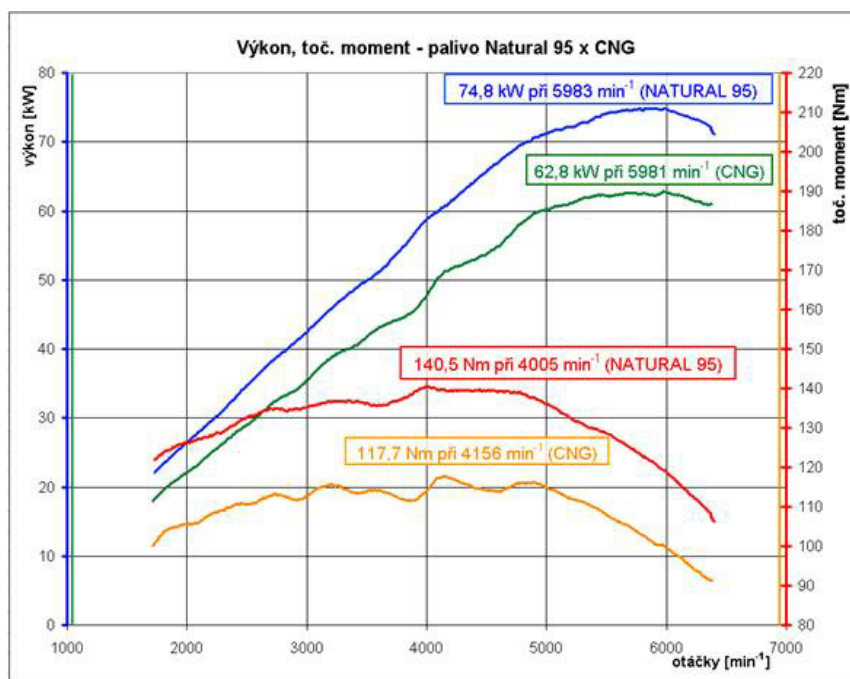
Charakteristiky spalovacích motorů si můžeme představit jako grafické závislosti různých veličin motoru. Může to být například výkon, točivý moment, otáčky, teplota, tlak, účinnost atd. Tyto charakteristiky se používají pro:

- vývoj a výzkum nových typů spalovacích motorů,
- konstrukci zařízení, která spalovací motor používá jako zdroj mechanického výkonu,
- posuzování stavu motoru a zjišťování ekonomických hledisek,
- optimalizace provozních parametrů (maximální výkon při minimální spotřebě).

Charakteristiky se dělí podle zvolené nezávislé proměnné veličiny na:

2.4.1. Otáčkové (rychlostní)

Nezávislou proměnnou jsou otáčky klidové hřídele motoru při stálém nastavení pedálu akcelérátoru. Jedná se pak o závislosti například výkonu na těchto otáčkách. Tyto charakteristiky jsou nejpoužívanější a to i pro uživatele vozidel. Příklad otáčkové charakteristiky je na následujícím obrázku:



Obrázek 2-10: Otáčková charakteristika motoru [3]

Můžeme je rozdělit do tří skupin:

- Vnější charakteristiky – pedál akcelérátoru, který reguluje výkon motoru je nastaven na maximum v celém rozsahu otáček.
- Částečné charakteristiky – pedál akcelérátoru je nastaven do jedné polohy, v které je pro celý rozsah otáček. Je však menší než je maximum.
- Zvláštní charakteristiky – znázorňují závislosti základních veličin motoru pro určité vybrané režimy nebo provozní podmínky.

2.4.2. Zatěžovací

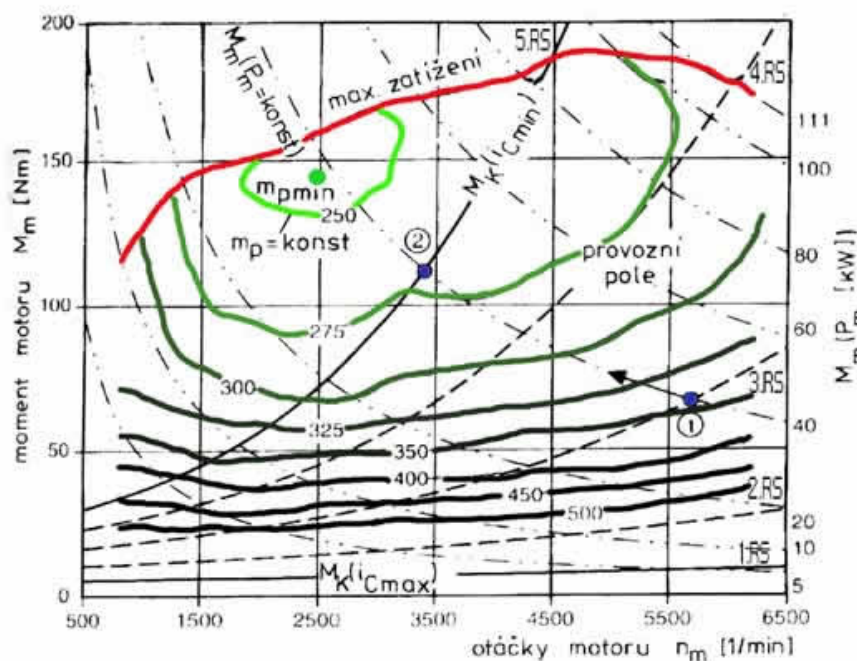
Jedná se o závislosti na výkonových parametrech motoru (točivý moment, střední efektivní tlak, efektivní výkon motoru atd.). Určení těchto křivek se provádí měřením motoru při zkušebním stavu a při udržování konstantních otáček jako parametru. Zároveň se mění zátěžný moment z minima na maximum změnou výkonu motoru za pomoci pedálu akcelérátoru.

2.4.3. Seřizovací

Jedná se o závislosti veličin motoru na veličinách charakterizujících nastavení motoru (kvalita pracovní směsi, úhel předstihu atd.). Při zjišťování charakteristik se mění jen námi sledovaná nezávislá proměnná a ostatní veličiny se pokud možno udržují konstantní. Používají se převážně ve výzkumných odděleních.

2.4.4. Úplné (celkové)

Tyto charakteristiky vzniknou sloučením několika předchozích charakteristik. Nedají se ani změřit, ani vypočítat. Jejich sestavení se děje pomocí přenesení bodů vybrané veličiny s konstantní hodnotou do souřadnicového systému.



Obrázek 2-11: Úplná charakteristika motoru [3]

2.4.5. Zvláštní

Tyto charakteristiky znázorňují chování motoru při různých okolnostech a provozních podmínkách. Jsou zdenapříklad výškové charakteristiky, které znázorňují chování provozních veličin motoru v závislosti na nadmořské výšce.

3. Elektromagnetický výpočet startéru

Analytický výpočet startéru vychází ze zadaných rozměrů startéru. Tyto parametry byly odečteny z obdržené výkresové dokumentace startéru, která sloužila jako zadání diplomové práce. Většinou se analytický výpočet používá ještě před samotným zhotovením startéru. Při návrh startérů se ve většině případů postupuje tak, že se vezme již existující startér a změní se některé jeho parametry. Analytickým výpočtem pak můžeme zjistit, jak se nám změnily pracovní charakteristiky a jestli to odpovídá našim požadavkům. Teprve pak se může přejít ke zhotovení prototypu a jeho následné měření. V našem případě již máme hodnoty změřené na samotném spouštěči. Vypočtené hodnoty pak porovnáme s naměřenými hodnotami a určíme, s jakou chybou se vypočtené hodnoty liší od naměřených. V tomto případě se jedná o sériový stejnosměrný motor bez derivace. Počet pólů tohoto motoru je 4. Výpočet je rozdělen do tří částí, které na sebe navzájem navazují.

3.1. Výpočet základních parametrů

Tato první část výpočtu je zaměřena na výpočet základních parametrů motoru. Jako první se vypočte střední hodnota délky vzduchové mezery.

$$\delta = \frac{\delta_{min} + \delta_{max}}{2} \text{ (mm; mm, mm)} \quad (3.1)$$

Dále se pak počítá například pólová rozteč, plocha vzduchové mezery nebo Carterův činitel vzduchové mezery. Po vypočtení všech potřebných parametrů můžeme vypočítat první magnetické napětí, a to pro vzduchovou mezeru. Vypočtené parametry budou potřeba pro výpočet v obou dalších částech výpočtu.

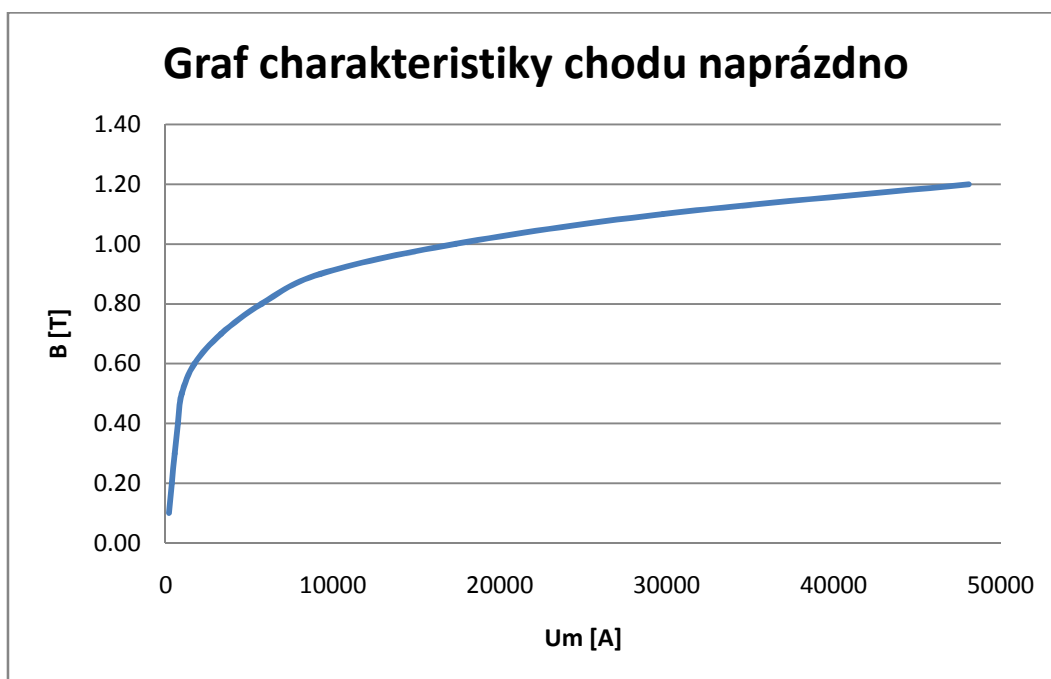
3.2. Výpočet charakteristiky chodu naprázdno

V druhé části vypočteme podle vzorců, magnetickou indukci v jednotlivých částech obvodu. Je to indukce v zubech, jhu kotvy, pólu, na styku pól-kotra a indukci v kostře. Pro tyto hodnoty magnetické indukce odečteme z magnetizačních křivek pro dané materiály intenzitu magnetického pole. Když tuto intenzitu magnetického pole vynásobíme střední délkou

siločáry, dostaneme magnetické napětí v jednotlivých částech. Tyto napětí pak sečteme a dostaneme výsledné magnetické napětí pro danou indukci ve vzduchové mezeře. Ta se volí v rozmezí od 0,1 do 1,2 T.

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mzi} + U_{ma} + U_{mm} + U_{mst} + U_{mj} \text{ (A; A)} \quad (3.2)$$

Výslednou závislost indukce ve vzduchové mezeře na magnetickém napětí zobrazuje charakteristika chodu naprázdno:



Obrázek 3-1 Graf charakteristiky chodu naprázdno

3.3. Výpočet pracovních charakteristik

V poslední části vypočteme a vyneseme do grafu pracovní charakteristiky motoru. Mezi počáteční hodnoty pro výpočet pracovních charakteristik patří například průřezy vodičů rotoru a budicí cívky, počet vodičů kotvy, napětí baterie, počet kartáčů nebo vnitřní odpor baterie. Napětí baterie je 12V a její vnitřní odpor se většinou uvažuje při mezních teplotách a je rovno 12mΩ. K tomuto odporu se přičítá 1mΩ jako odpor vodičů a 1mΩ jako odpor spojů. Celkový ohmický odpor baterie se tedy uvažuje 14mΩ.

Abychom byli schopni porovnat naměřené a vypočtené charakteristiky, musíme uvažovat celkový ohmický odpor baterie 3,85mΩ. Spouštěč byl totiž měřen při teplotě okolí 23,6°C, čemuž odpovídá tento vnitřní odpor baterie.

Nejprve vypočteme magnetické napětí budicí cívky pro jednu pólovou dvojici. Uvažujeme sériové zapojení cívek a také magnetické napětí reakce kotvy. Tuto hodnotu přičteme a odečteme od magnetického napětí budicí cívky. Tyto hodnoty pak vyneseme do grafu charakteristiky naprázdno, ze které odečteme tři hodnoty magnetické indukce. Výpočtem zjistíme skutečnou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře pro daný proud.

$$B_{\delta} = \frac{\frac{B_{1min} + B_{1max}}{2} + B_1}{2} (T; T, T, T) \quad (3.3)$$

Proud se volí podle hodnot proudu z měření, aby bylo možné pozdější porovnání hodnot pracovních charakteristik. Součet ohmického odporu startéru a odporu baterie nám dá celkový ohmický odpor sítě startéru.

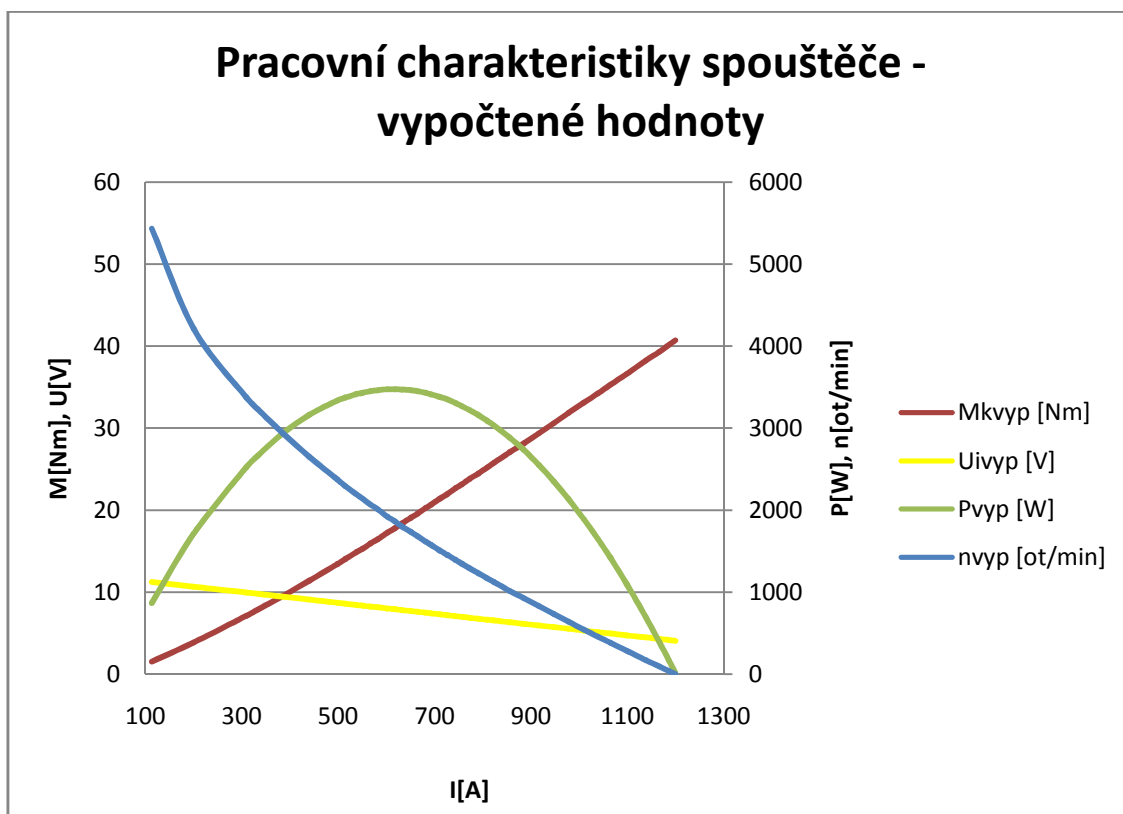
$$R_c = R_{st} + R_B (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (3.4)$$

Při jeho vynásobení se zvoleným proudem vypočteme celkový úbytek napětí v obvodu startéru. Indukované napětí je pak rozdíl napětí baterie minus úbytek napětí. Dále vypočteme otáčky, které budou jednou z veličin vynesných ve výsledném grafu. Další veličiny, které potřebujeme do grafu, jsou indukované napětí, užitečný výkon na hřídeli startéru a moment na hřídeli startéru.

Užitečný výkon na hřídeli je dán rozdílem elektromagnetického výkonu a celkových ztrát. Tyto ztráty se skládají ze ztrát v železe (hysterezní a magnetické) a ztrát mechanických (tření kartáčů a ztráty v ložiskách).

$$P = P_E - P_{celk} (W; W, W) \quad (3.5)$$

Nyní máme všechny potřebné údaje pro vytvoření pracovních charakteristik spouštěče, do grafu vyneseme závislosti vypočteného momentu, indukovaného napětí, výkonu a otáček na zvoleném proudu.



Obrázek 3-2 Pracovní charakteristiky spouštěče - analyticky vypočtené hodnoty

3.4. Výpočet momentové charakteristiky

Další důležitou charakteristikou, kterou můžeme vypočítat, je momentová charakteristika. V této charakteristice jsou zobrazeny 2 křivky. První je závislost momentu spouštěče na otáčkách motoru a druhá je závislost momentu odporu motoru na otáčkách motoru. Otáčky motoru se vypočítají z otáček spouštěče dělených převodem mezi spouštěčem a motorem.

$$n_p = \frac{n}{i_{12}} (\text{min}^{-1}; \text{min}^{-1}, -) \quad (3.6)$$

Pro výpočet momentové charakteristiky musíme znát tyto údaje o motoru:

- počet válců motoru,
- vrtání válců motoru,
- zdvih,
- stupeň komprese,
- převod startéru,
- viskozitu oleje.

Z prvních tří údajů vypočteme celkový objem válců motoru. Další koeficient, který budeme při výpočtu potřebovat, je koeficient nerovnoměrnosti otáčení. Jeho velikost je dána rychlostí

otáčení a počtem válců. Jeho hodnota je mezi 0,1 až 3. Čím je větší počet válců, tím jsou menší prodlevy mezi pohyby jednotlivých válců a plynulost otáčení motoru je větší. Čím více válců, tím je koeficient větší. Jeho velikost se vypočte jako rozdíl maximální a minimální úhlové rychlosti dělený střední úhlovou rychlostí.

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{stř}} \text{ (-; rad}^{-1}\text{, rad}^{-1}\text{, rad}^{-1}\text{)} \quad (3.7)$$

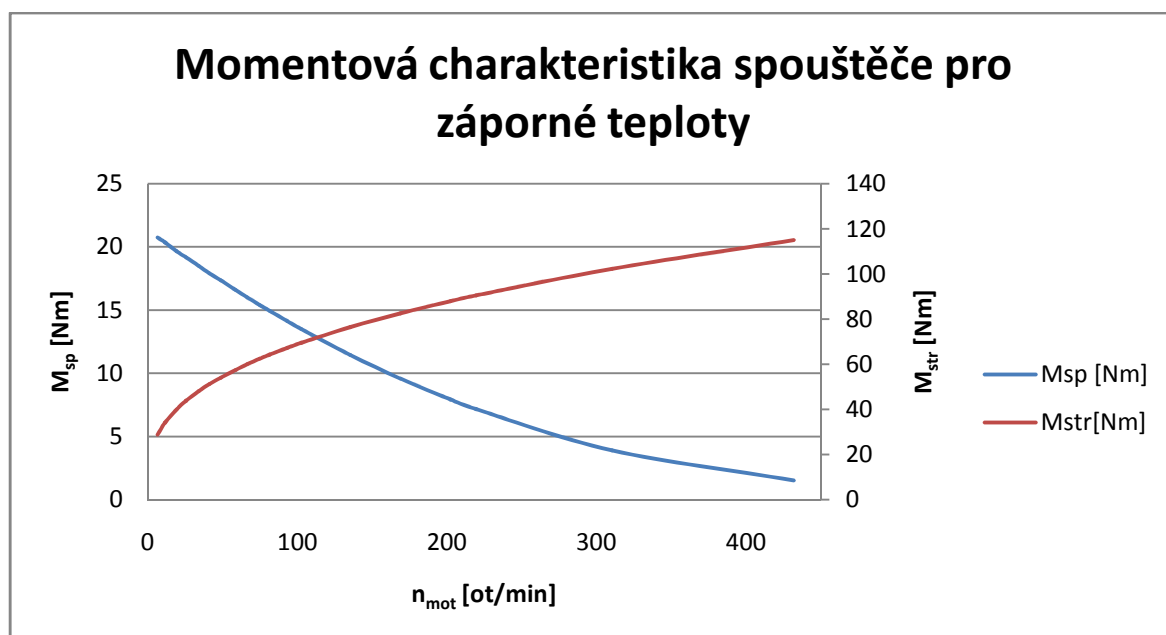
Nyní máme všechny potřebné parametry pro výpočet točivého momentu daného kompresními a expanzními silami.

$$M_{ke} = 0,39 \cdot V \cdot (\varepsilon + 6 \cdot \sqrt{\delta}) \text{ (Nm; dm}^3\text{, -, -)} \quad (3.8)$$

Pro výpočet třecího momentu je použit zjednodušený vzorec. Je uvažována viskozita oleje SAE 5W-40 při teplotě -25°C a všechny konstanty jsou zvoleny pro motory automobilu Škoda 120. Nyní můžeme po dosažení otáček motoru vypočíst třecí moment pro dané otáčky.

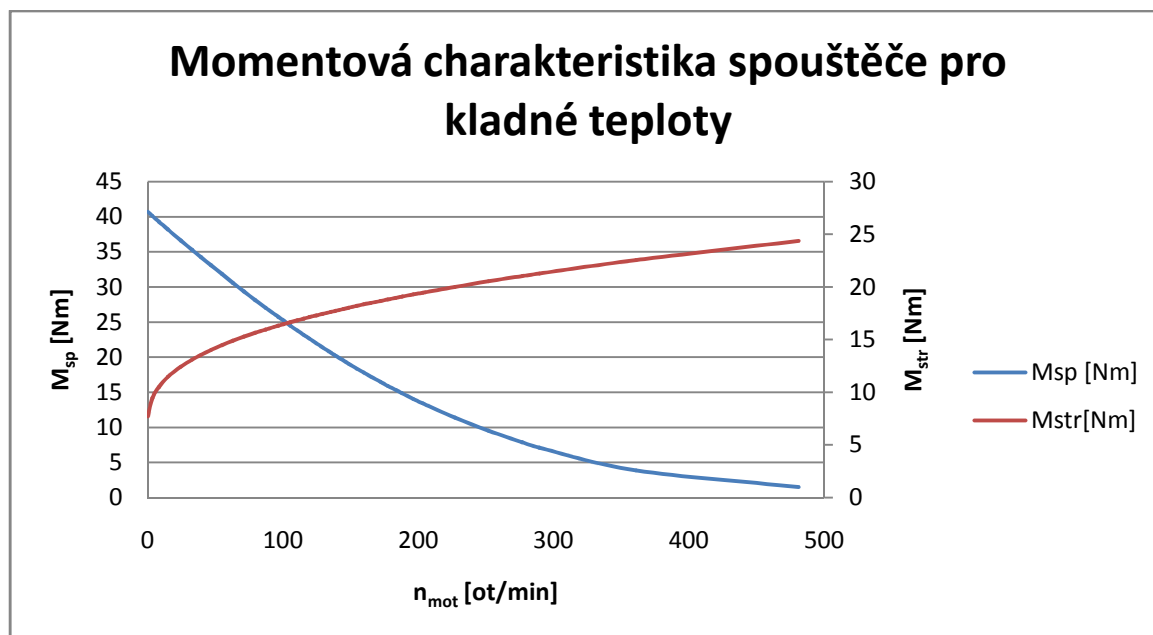
$$M_t = 10,796 \cdot n_p^{0,38} \text{ (Nm; min}^{-1}\text{)} \quad (3.9)$$

Střední točivý moment motoru je tedy dán součtem momentu odporu a momentem daným kompresními a expanzními silami. Nyní můžeme vypočtené hodnoty vynést do grafu. Místo, kde se obě křivky protnou, je takzvaná zlomová rychlost, při které dojde k nastartování motoru.



Obrázek 3-3 Graf momentové charakteristiky pro záporné teploty

Z grafu vyplývá, že zlomová rychlost je motoru je 113,5ot/min. Při těchto otáčkách motoru se bude spouštěč otáčet rychlostí 1324,55ot/min. Moment odporu motoru bude 71,7Nm. Spouštěč musí vyvinout mnohem větší moment, aby roztočil motor na požadované otáčky, než v případě startu motoru při kladných hodnotách teploty.



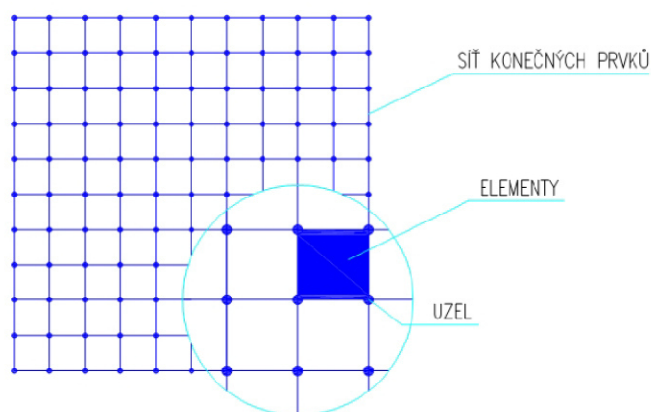
Obrázek 3-4 Graf momentové charakteristiky pro kladné teploty

Na tomto grafu je uvedena momentová charakteristika pro start motoru při kladných teplotách. Zlomová rychlost motoru je 103,3ot/min. Otáčky spouštěče, které jsou převedeny přes převod, jsou tedy 1205,5ot/min. Moment odporu motoru je ale oproti spouštění v mrazu výrazně menší, a to 16,6Nm. Spouštěč tedy bude muset pro roztočení motoru na požadované hodnoty vyvinout menší moment.

4. Výpočet metodou konečných prvků

4.1. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků vychází z předpokladu, že tělesa jsou rozdělena na konečný počet prvků, které můžeme nazývat také elementy. Elementy mají předem stanovený tvar, například čtyřstěn. Rozdělením na elementy definujeme u zvolené součásti její vnitřní napětí, vnější deformace, síly, které působí na těleso a také jeho tvar a fyzikální vlastnosti. Zatížením nebo změnou některého z těchto parametrů dochází k řešení soustav rovnic, které charakterizují daný objekt [7].

**Obrázek 4-1 Sít' konečných prvků[14]**

Tato metoda se používá k přibližnému řešení jistých problémů, které jsou popsány diferenciálními rovnicemi. Těmito soustavami rovnic lze popsat model součásti a také jeho vlastnosti, zatížení nebo deformace.

Podle základních rovnic mechaniky jsou dány tři předpoklady po použití metody konečných prvků [8]:

1. malé posuny a malá přetvoření,
2. materiál se chová lineárně a pružně,
3. dynamické účinky jsou zanedbatelné.

V roce 1956 byla vydána první souborná publikace *Stress and deflection analysis of complex structures*, která se zabývala myšlenkou metody konečných prvků. Před touto publikací již byly zaznamenány další publikace zabývající se výpočtovým algoritmem, avšak datum vzniku metody konečných prvků se určuje podle vydání výše zmíněné souborné publikace. V padesátých letech, kdy došlo k propojení této myšlenky s počítačem, se mohlo teprve využít metody v plném rozsahu a též mohlo dojít k jejímu rozvoji. Samotný název metody pochází z roku 1960 z anglického překladu *The Finite Element Method* a zdůrazňuje tu skutečnost, že základním stavebním kamenem metody je prvek konečných rozměrů.[7]

Při sloučení výpočtových algoritmů s počítačem došlo ke vzniku softwarů, které jsou založeny právě na výpočtu metodou konečných prvků. Tyto softwary mají za úkol pomoci při řešení různých inženýrských problémů, často přímo z praxe, a musí splňovat jisté požadavky. Se vznikem systémů CAD, zvláště pak jejich 3D verze, se naskytly inženýrům a vývojářům nové možnosti při návrhu součástí. Sloučením těchto systémů s metodou konečných prvků mohou provádět různé výpočty, simulace napětí a deformací přímo ve fázi návrhu vytvářených součástí.[7]

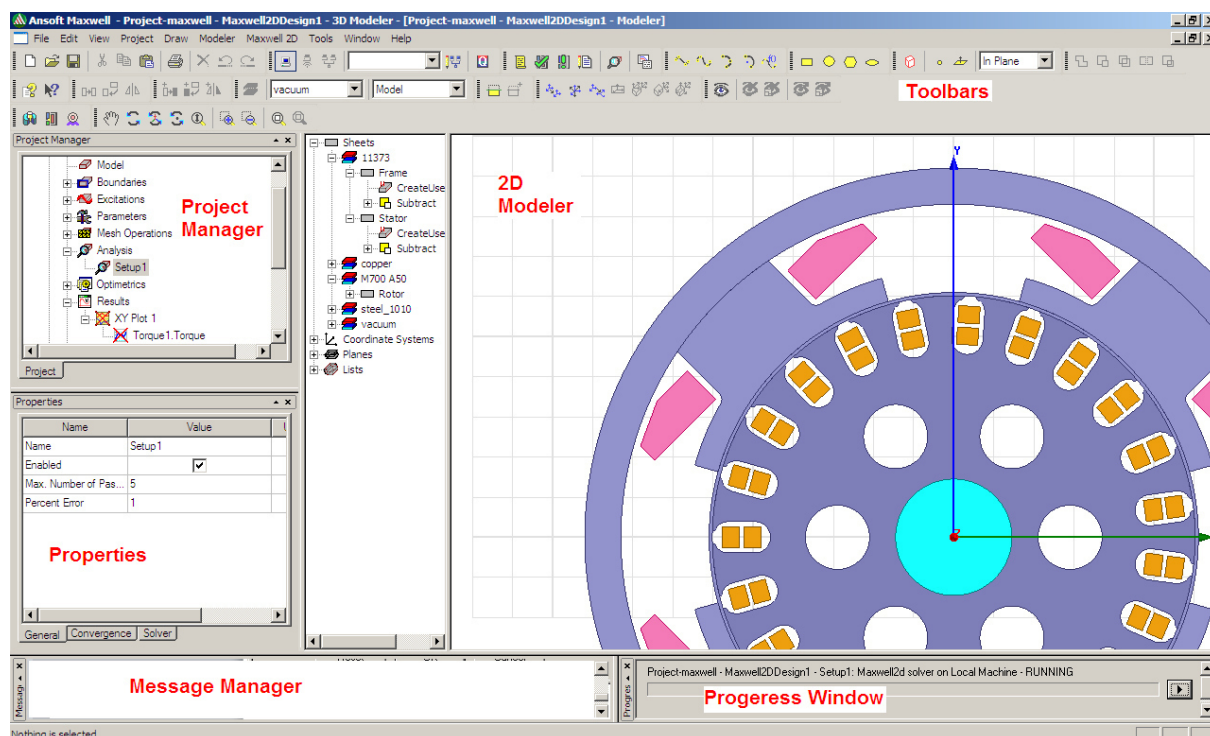
Firem, které v dnešní době vyvíjí softwary s výpočtem metodou konečných prvků, je mnoho. Mezi nejznámější patří například: Ansys nebo Abaqus. Společnost Autodesk sloučila svůj produkt Autodesk Inventor se softwarem od firmy Ansys a vytvořila tak software, ve kterém

je možné snadno, rychle a názorně počítat, a taky vidět napětí a deformace na 3D modelu tělesa.

Pro výpočet metodou konečných prvků se nejčastěji používá Lagrangeův princip, který říká, že: Mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udělají celkové potenciální energii stacionární hodnotu [9].

4.2. Ansoft Maxwell 14

Maxwell je program od společnosti Ansoft. Slouží pro vytváření simulací elektromagnetických polí, které pak slouží k analýze a navrhování 2D nebo 3D elektromagnetických a elektromechanických zařízení, jako jsou třeba motory, pohony, transformátory, snímače nebo cívky. Při výpočtech používá metody konečných prvků a díky tomu může vytvářet velmi přesné simulace elektromagnetických polí v časové i frekvenční oblasti. Maxwell dokáže provádět simulace elektromagnetických polí pro statické modely, ale také zvládá mnohem náročnější simulace přechodových jevů za pomoci transientních analýz.



Obrázek 4-2 Pracovní prostředí Ansoft Maxwell 14

- 1) **Toolbars** – panel nástrojů, který umožňuje editaci modelu nebo nastavení simulací.
- 2) **Project Manager** – jednotlivé záložky obsahují informace o modelu, simulované parametry nebo výsledky simulací.
- 3) **Properties** – zde můžeme měnit jednotlivé parametry zvolené části modelu.
- 4) **Message Manager** – zobrazuje zprávy o chybách a dokončených operacích.
- 5) **2D Modeler** – hlavní plocha tvorby a zobrazení modelu. V levé části okna se záložkami pro jednotlivé části stroje spolu s jejich rozměry a přiřazenými materiály.
- 6) **Progress Window** – stavové okno zobrazující průběhy běžících simulací.

Program Maxwell dokáže extrahovat stavové modely ze simulací metodou konečných prvků a spolupracovat s dalšími programy pro vytvoření přesnějších modelů a výsledků. Těmito programy jsou například RMXprt nebo Simplorer [12]. Díky této spolupráci mohou být analyzovány i větší sestavy.

4.3. RMXprt (RotationMachine expert)

Jedná se o software od společnosti Ansys, který je integrovaný do prostředí Maxwell. Jak již naznačuje jeho název, využívá se pro návrh a optimalizaci elektrických točivých strojů. Jedná se o program, který může vypočítat za velmi krátký čas mnoho analýz stroje a zobrazit požadované veličiny, jež jsou pak snadno porovnatelné s naměřenými nebo vypočtenými hodnotami. Simulaci stroje můžeme provádět jak pro normální stav, tak speciální stavy, jako například chod stroje bez zatížení nebo poruchu rotoru. Výstupy jsou realizovány ve formě charakteristik a nejčastějšími výstupními veličinami jsou moment, účinnost, ztráty, indukce ve vzduchové mezeře, indukčnost vinutí nebo rozptyl [11].

Program RMXprt obsahuje ve své databázi přednastavené šablony strojů, například stejnosměrný stroj, univerzální motor nebo stejnosměrný motor s permanentními magnety. Po vložení důležitých rozměrů stroje nám program sám vytvoří modely zvolených strojů. Pak už jen stačí zvolit potřebnou analýzu a během chvíle máme k dispozici požadované výstupní charakteristiky. Abychom dosáhli přesnějších výsledků, můžeme použít program Maxwell, ve kterém je možné vytvořit 2D nebo 3D model, a pomocí metody konečných prvků vypočítat potřebné parametry a jejich charakteristiky.

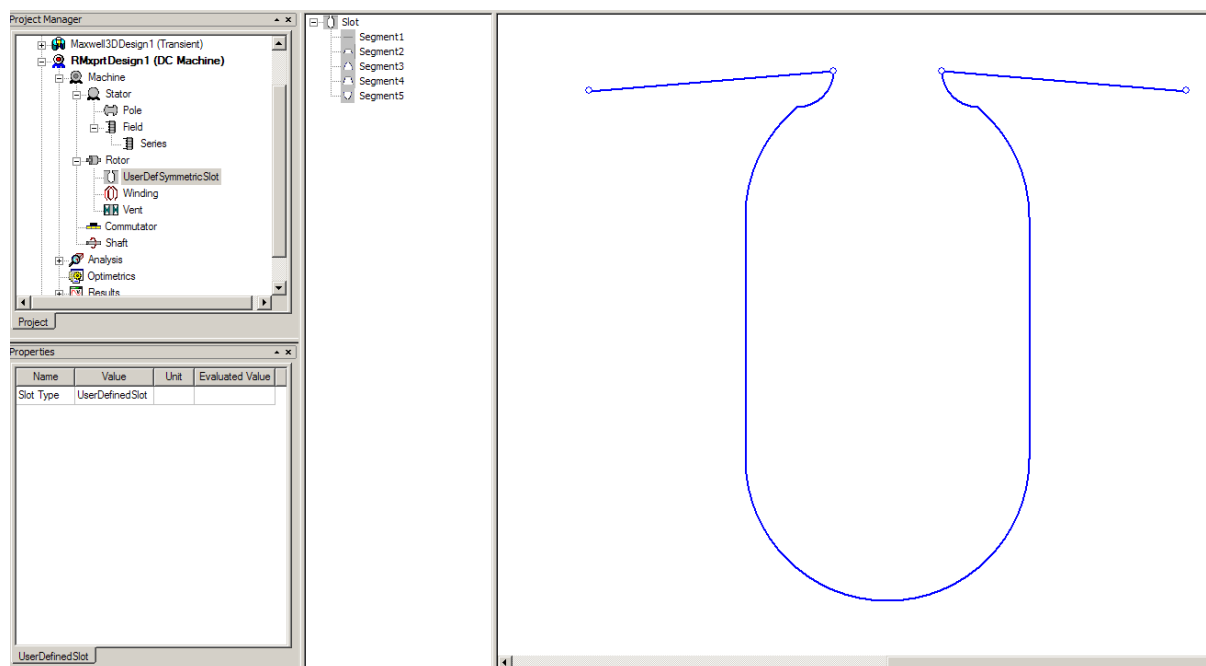
Pro obecné výpočty je použita v programu RMXprt klasická analytická teorie elektrických točivých strojů a magnetických obvodů. Indukce ve vzduchové mezeře se počítá pomocí přesnější Schwarz-Christofferovy transformace. Veličiny, jako třeba hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy, rozptyl nebo indukčnost se počítají pomocí analytických vztahů. Aby byly

zohledněny také nelineární magnetické vlastnosti materiálů, jsou zde vylepšeny iterační algoritmy, kterými je rychle a přesně vypočtena saturace v náhradním schématu [11].

4.4. Výpočet pracovních charakteristik pomocí RMaxprt

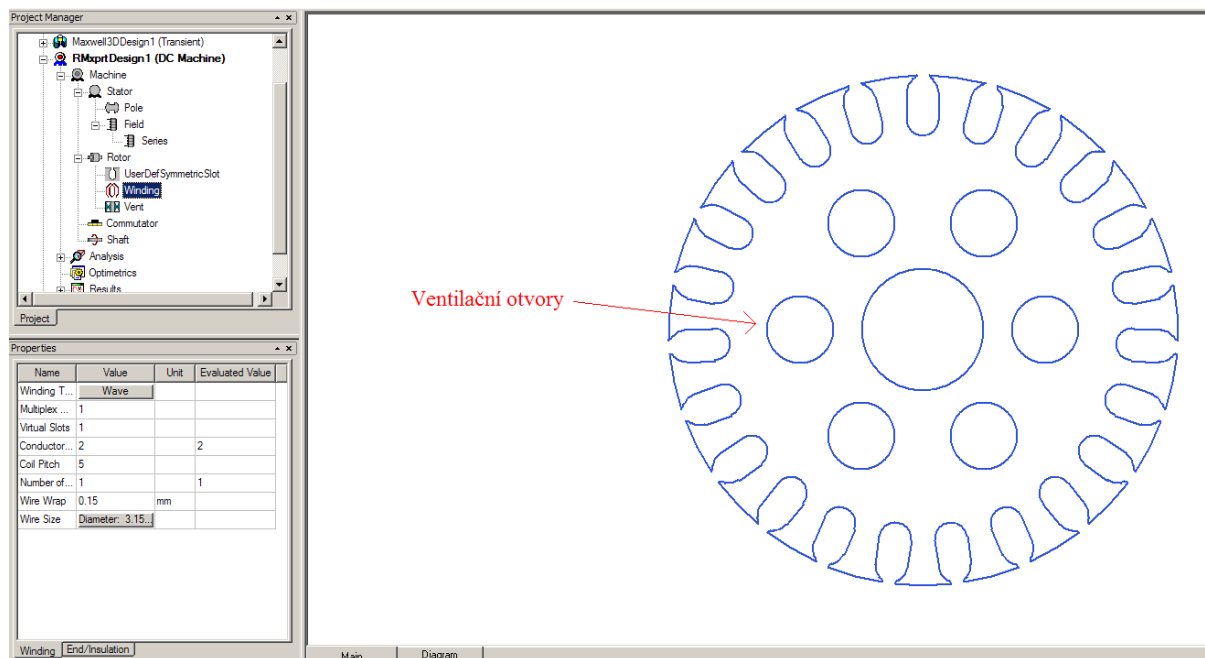
RMaxprt je součástí programu Maxwell a slouží nám k návrhu a vytvoření charakteristik strojů. Pro případ startéru byl zvolen jednoduchý stejnosměrný motor (DC Machine). Abychom byli schopni zadat do programu všechny potřebné parametry, musíme mít kompletní rozměry a dokumentaci ke startéru, který máme jako zadání práce.

V první části musíme zvolit, o jaký typ stroje se jedná: **Machine type > DC Machine**. V první záložce **Machine** zvolíme **Number of Poles** pro počet pólů stroje, **Frictional a Windage Loss** pro třecí a ventilační ztráty a v poslední řadě **Reference speed** pro jeho referenční otáčky. Dále do záložky **Stator** zadáváme hlavní rozměry statoru, jeho materiál a typ pólů. Zvolíme **Pole** pro nastavení rozměrů pólu a nakonec **Field > Series** pro nastavení typu vinutí statoru, průřez vodiče nebo počet vodičů v cívce. V našem případě se jedná o vlnové vinutí, a zapojení budících cívek je sériové. V další části **Machine > Rotor** zadáváme rozměry rotoru – jeho vnější průměr, vnitřní průměr, který udává zároveň průměr hřídele, počet drážek a samozřejmě také jeho materiál. Tvar drážky neodpovídal žádnému z přednastavených tvarů drážek, proto byl navržen ručně **Rotor > UserDefSymmetricSlot**, aby odpovídal přesně zadání.



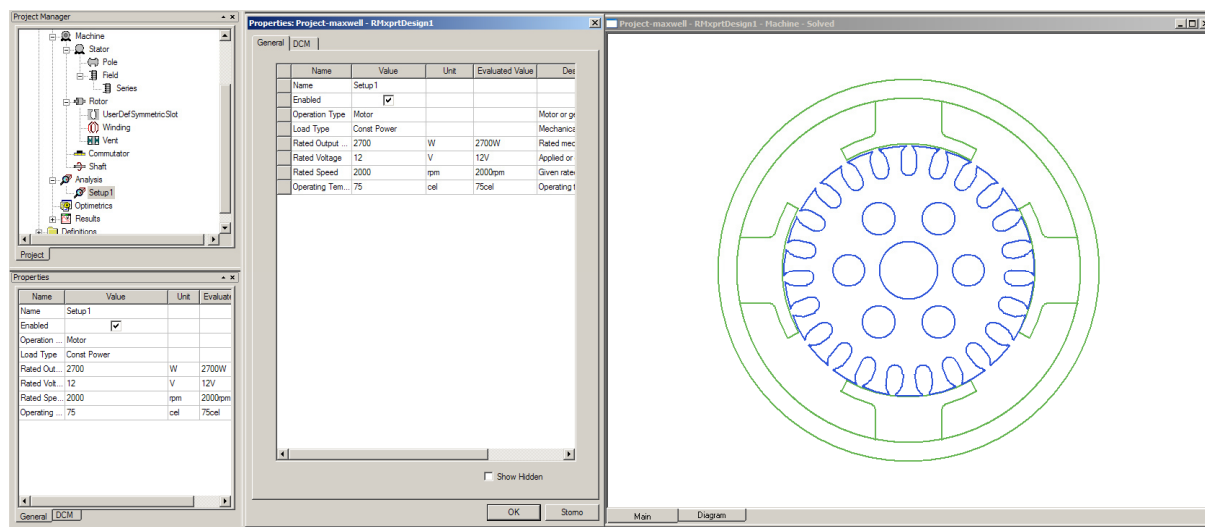
Obrázek 4-3 Uživatelský návrh tvaru drážky rotoru

Pro rotor se také zvolí vinutí, průměr vodiče, počet vodičů v drážce nebo drážkový krok. Posledními kroky bylo vytvoření ventilačních otvorů v rotoru a zadání rozměrů komutátoru.



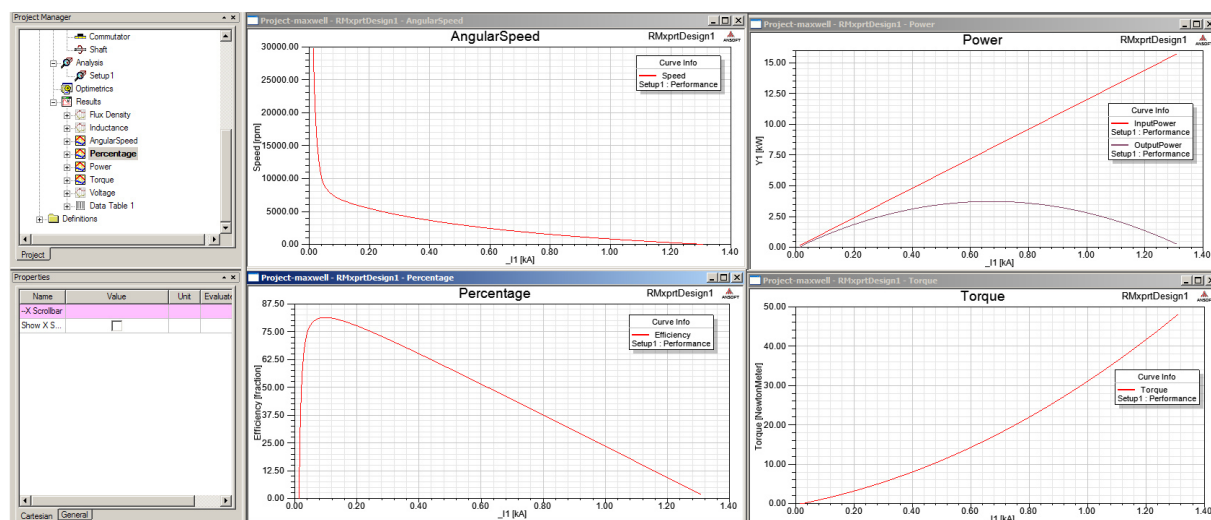
Obrázek 4-4 Tvorba ventilačních otvorů rotoru

Nyní můžeme přejít k samotné simulaci. V menu **Analysis > Setup** zvolíme požadované parametry simulace, jako je **Operation Type > Motor** pro stroj pracující v motorovém režimu a **Load Type** pro konstantní výkon stroje. Dále pak zvolíme napájecí napětí, referenční otáčky a pracovní teplotu.



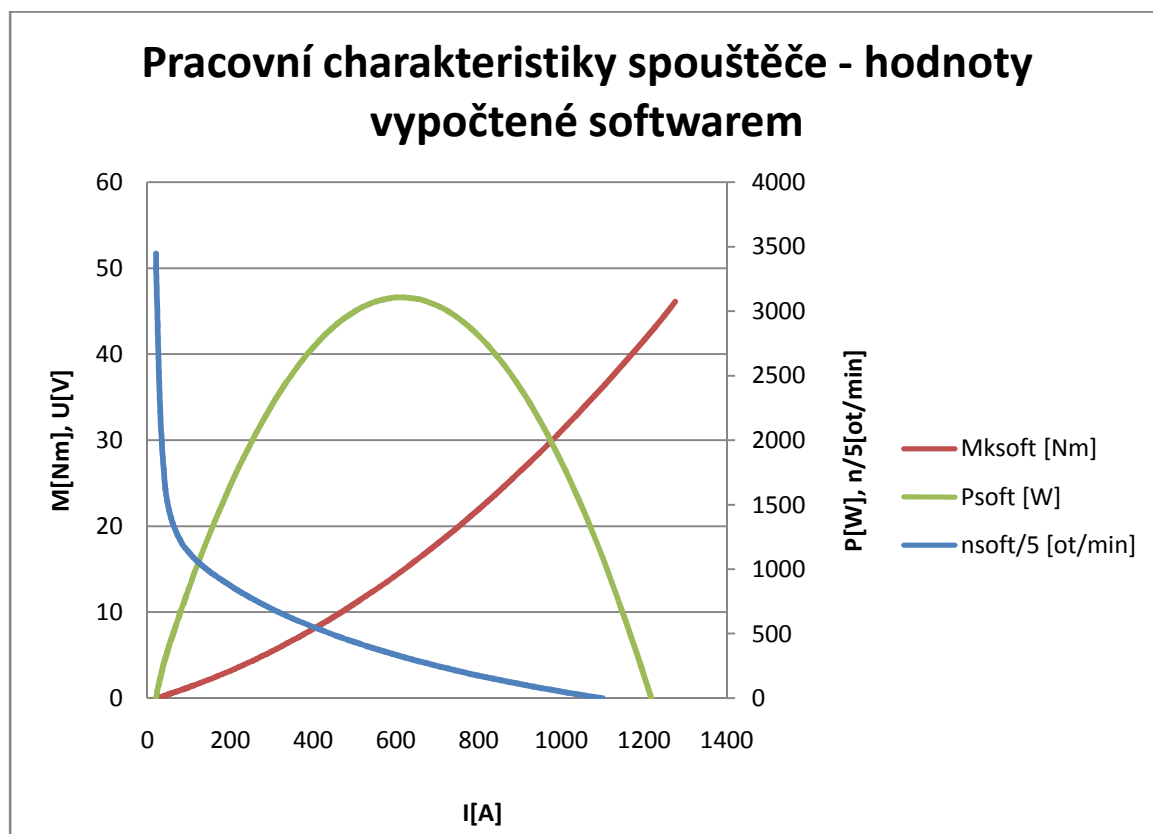
Obrázek 4-5 Nastavení parametrů pro analýzu stroje

Po proběhnutí simulace máme k dispozici sedm výstupních charakteristik. Pro naše účely srovnání s naměřenými a vypočtenými hodnotami nám postačí závislosti otáček, momentu a výkonu na proudu. Pro názornost je na následujícím obrázku znázorněna ještě charakteristika účinnosti **Percentage**.



Obrázek 4-6 Výstupní charakteristiky analýzy stroje

Nyní máme potřebné charakteristiky, které můžeme porovnávat s vypočtenými a naměřenými hodnotami srovnávaných veličin. Do grafu vynesene hodnoty momentu, výkonu a otáček v závislosti na proudu.

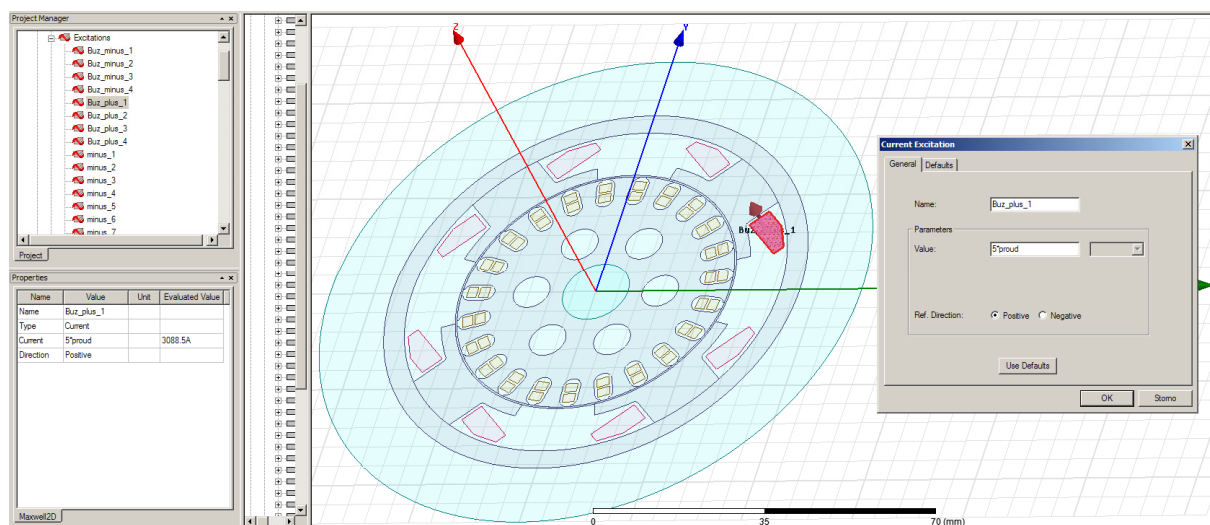


Obrázek 4-7 Pracovní charakteristiky spouštěče - hodnoty vypočtené softwarem RMxpřt

4.5. Příprava modelu před analýzou metodou konečných prvků

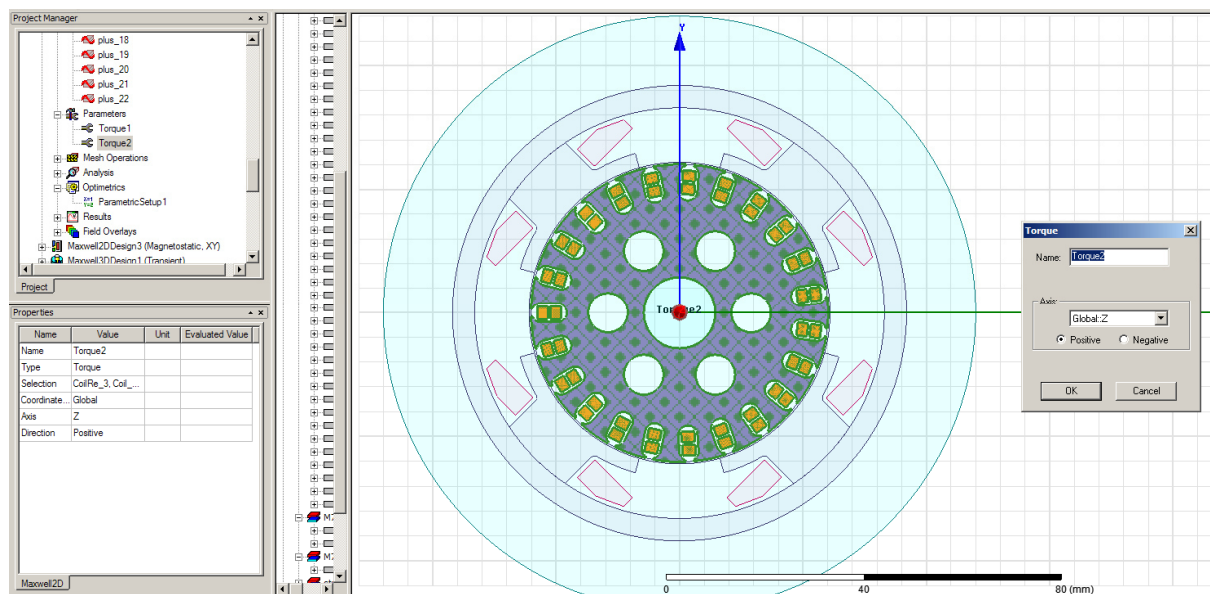
Model, na kterém budeme později provádět simulaci, nám postačí v provedení 2D. Jelikož je stroj v řezu ve všech místech stejný, není potřeba provádět analýzu na 3D modelu. Výpočet by pak byl mnohem náročnější a zdlouhavější.

Nejprve musíme zvolit správné směry proudu ve vinutí statoru a vinutí rotoru. Označíme si vinutí, ve kterém chceme nastavit směr a velikost proudu a zvolíme **Excitations > Assign > Current**. Do řádku **Name** napíšeme jméno vinutí, například: **Buz_plus_1**. V parametrech v řádku **Value** zvolíme požadovaný proud. Tento proud se zadává v ampérzávitech. Abychom pak nemuseli při každé změně proudu při simulaci přepisovat všechny hodnoty proudů u cívek, vytvoříme si proměnný parametr s názvem **proud**, který se při jeho změně změní u všech cívek. Cívky ve vinutí statoru mají 5 závitů, takže zadaná hodnota proudu bude ve tvaru: **5*proud**. U cívek ve vinutí rotoru je počet závitů 1, takže hodnota proudu bude pouze **proud**. Poslední, co volíme je směr proudu **Ref.Direction > Positive/Negative**.



Obrázek 4-8 Volba směru a velikosti proudu ve vinutí

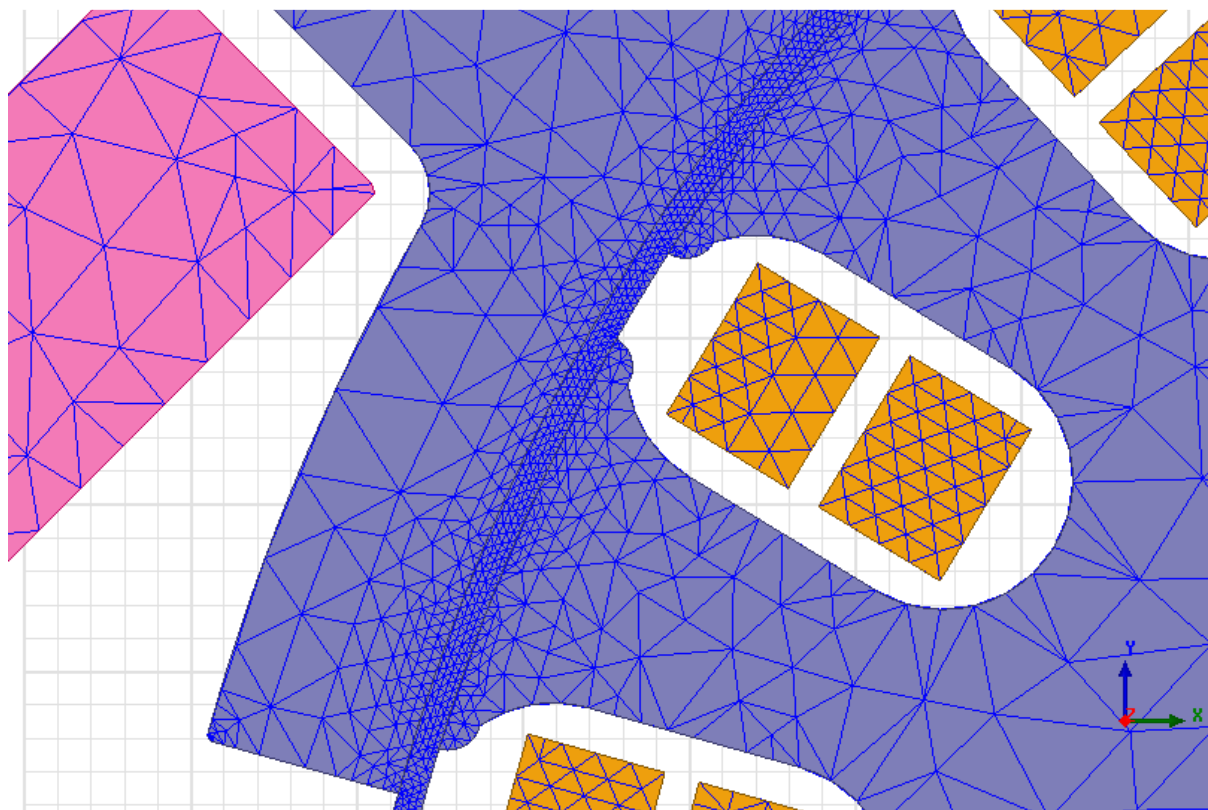
Dalším krokem je nastavení požadovaného parametru, který je cílem analýzy metodou konečných prvků. V modelu vybereme ty části stroje, které se budou otáčet a zvolíme pro výběr momentu **Parameters > Assign > Torque**. Zadáme název parametru, osu, kolem které se bude stroj otáčet a směr jeho otáčení.



Obrázek 4-9 Volba parametru pro následnou analýzu

Metoda konečných prvků je založena na tom, že analyzovaný model je rozdělen na konečný počet elementů. Musíme tedy vytvořit na modelu síť elementů neboli **Mesh**. Program Maxwell automaticky vytvořil na zvoleném modelu **Mesh** a také zvolil velikost elementů pro jednotlivé části modelu. V místech, kde není žádná část stroje, je uvažován vzduch s permeabilitou $\mu=1$ a hustota elementů je v těchto plochách malá. Při malém počtu elementů

vzniká v těchto místech při analýze poměrně velká chyba. Pro oblast vzduchové mezery mezi rotorem a póly potřebujeme hustší síť, abychom v těchto místech dosáhli přesnějších výsledků. Toho dosáhneme tak, že si vytvoříme v tomto prostoru vlastní síť s velkou hustotou elementů. Označíme si prostor vzduchové mezery a záložce **Mesh Operators** zvolíme možnost **Assign > Inside Selection > Length Based**. Pojmenujeme si zvolenou plochu, aby byla pozdější orientace mezi sítěmi jednodušší. Posledním krokem je nastavení **Maximum Length of Elements**. Tímto přiřadíme maximální velikost elementů v dané síti. Čím menší číslo, tím budou elementy menší a na zvolenou plochu jich bude více. Nej hustší síť vytvoříme v oblasti vzduchové mezery. Celkový počet elementů v celém stroji je 38104. Abychom viděli rozložení **Meshe** na modelu, zvolíme v záložce **Analysis** možnost **Apply Mesh Operators**. Proběhne krátký výpočet, po němž můžeme názorně vidět rozložení sítě elementů na modelu.

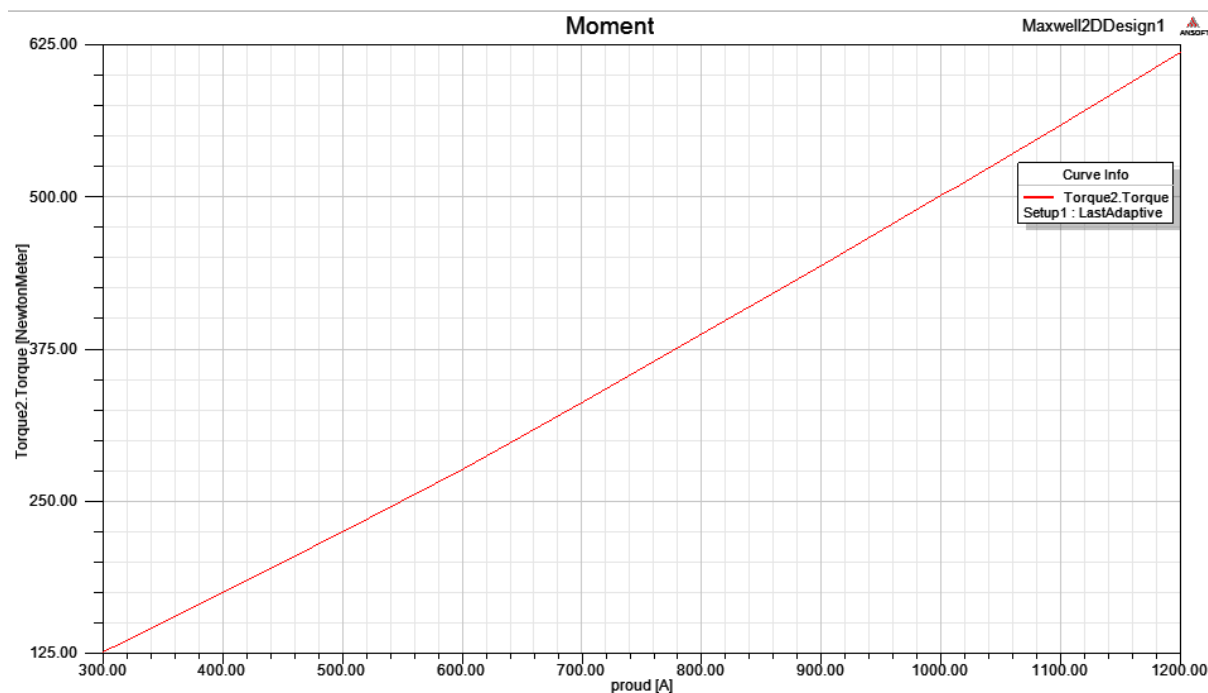


Obrázek 4-10 Detail sítě ve vzduchové mezeře

4.6. Analýza metodou konečných prvků

Nyní máme všechna potřebná nastavení, abychom mohli provést vlastní simulaci. Jelikož potřebujeme provádět výpočet nejen pro jednu hodnotu proudu, ale pro více hodnot, využijeme nástroj **Optimetrics**. V něm si vytvoříme parametr **proud**, **Optimetrics > Add > Parametric > Add > Variable > proud**, a zvolíme **Linear step**. Počáteční hodnota bude 300A

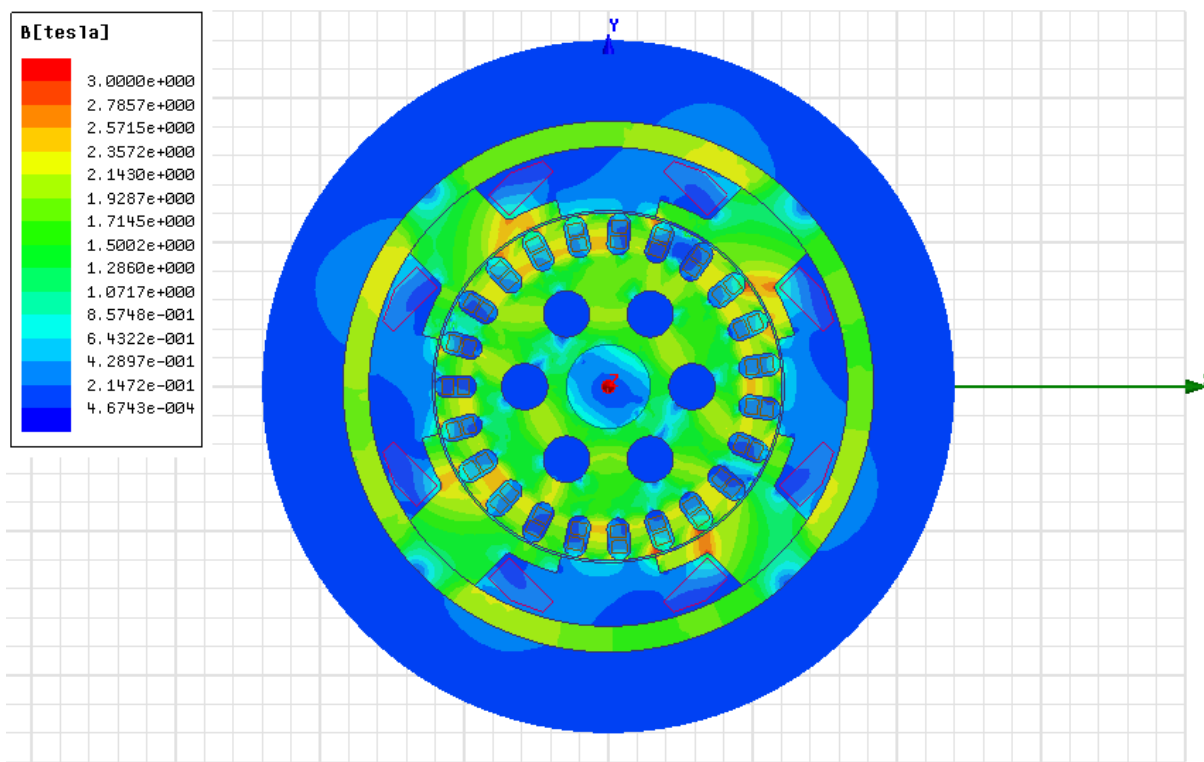
s krokem 100A do hodnoty 1200A. Nyní spustíme **Optimetrics > ParametricSetup1 > Analyze**. Tím proběhne analýza pro všechny zvolené hodnoty proudu. Na základě analýzy si vytvoříme graf výsledků: **Results > Create Magnetostatic Report > Rectangular Plot**. Dostaneme graf závislosti vypočteného momentu na zvoleném rozsahu proudu.



Obrázek 4-11 Výsledná charakteristika závislosti momentu na proudu

Hodnoty momentu jsou, jak je vidět na grafu, poměrně vysoké. To je dáno tím, že program Maxwell počítá daný moment pro délku stroje 1 metr. Po přepočtení hodnot na délku měřeného stroje budou mít hodnoty správnou velikost.

Prostředí Maxwell poskytuje jako výsledky simulací nejen grafy vypočtených hodnot, ale je zde možné například vytvoření barevného modelu rozložení magnetické indukce ve stroji. To je možné v záložce **Field Overlays > Fields > B > Mag_B**. Výsledek je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 4-12 Rozložení magnetické indukce ve stroji

Na obrázku můžeme vidět, jak v některých místech statoru je magnetická indukce větší a dosahuje hodnoty okolo 2,2T. Při této indukci je materiál přesycen a dochází k úniku magnetických siločar mimo stroj. Indukce v těchto místech ve vzduchu může být až 0,3T.

5. Optimalizace spouštěče

Automobilový spouštěč je důležitou součástí motoru automobilu, bez kterého by nedošlo k roztočení motoru na potřebné otáčky a tím pádem by nemohlo dojít k zapálení směsi a spuštění motoru. Spouštěč je však jen krátkodobě pracující zařízení, které pracuje pouze pár sekund v několika cyklech. Z toho důvodu je to silně poddimenzovaný stroj, aby byly jeho rozměry, váha a samozřejmě cena co nejmenší. Za těchto podmínek se také snažíme při co nejmenších rozměrech dosáhnout protichůdného požadavku, a to co největšího momentu. Čím je spouštěč menší a lehčí, tím se také zmenšuje jeho záběrný moment. Musíme tedy zvolit kompromis mezi požadovanými rozměry spouštěče a jeho velikostí. Při řešení optimalizace je zbytečné se zabývat například ztrátami spouštěče. Jak již bylo řečeno, jedná se o stroj pracující pouze krátce. Ztrátami se zabýváme u strojů, které pracují delší dobu. Jako

optimalizaci spouštěče můžeme považovat přizpůsobení spouštěče pro konkrétní motor. Když předem víme, k jakému motoru bude spouštěč přiřazen, a známe k dispozici údaje o momentu odporu konkrétního motoru, můžeme navrhnout spouštěč tak, aby byl schopen roztočit motor na požadované otáčky pro jeho úspěšné spuštění. Moment odporu motoru musíme zjistit měřeními a to hlavně pro mezní teploty. Při mezních teplotách má totiž motor větší moment odporu a tím pádem je potřeba větší záběrný moment spouštěče pro jeho roztočení. Pokud nemá spouštěč dostatečný záběrný moment pro roztočení motoru při mezních teplotách, musíme změnou konstrukce spouštěče dosáhnout vyššího momentu, který již bude pro daný motor dostatečný.

5.1. Návrh zvýšení záběrného momentu pomocí analýzy metodou konečných prvků

V předchozí kapitole na obrázku 4-12 můžeme vidět rozložení magnetické indukce ve stroji. V některých bodech je magnetické indukce poměrně vysoká a vystupuje částečně i do okolního vzduchu. Materiál je přesycen a tím pádem dochází i k zmenšení záběrného momentu, kterého by mohl stroj dosáhnout. Změnu rozložení magnetické indukce ve stroji můžeme dosáhnout několika způsoby - například změnou tvaru drážky rotoru nebo zvětšením tloušťky jha statoru. Jho statoru se vyrábí z bezešvých ocelových trubek o daném vnějším průměru a tloušťce. V původním zadání je použita bezešvá trubka s vnějším průměrem 92mm a tloušťkou 4,5mm. Váha bezešvé trubky se při zadané délce vypočte podle vzorce:

$$m = V \cdot \rho \text{ (kg; m}^3, \text{ kg/m}^3\text{)} \quad (4.1)$$

kde: V – je objem bezešvé trubky

ρ – je hustota oceli (7850kg/m³)

Pro původní rozměry je vypočtená váha jha statoru 0,6988kg.

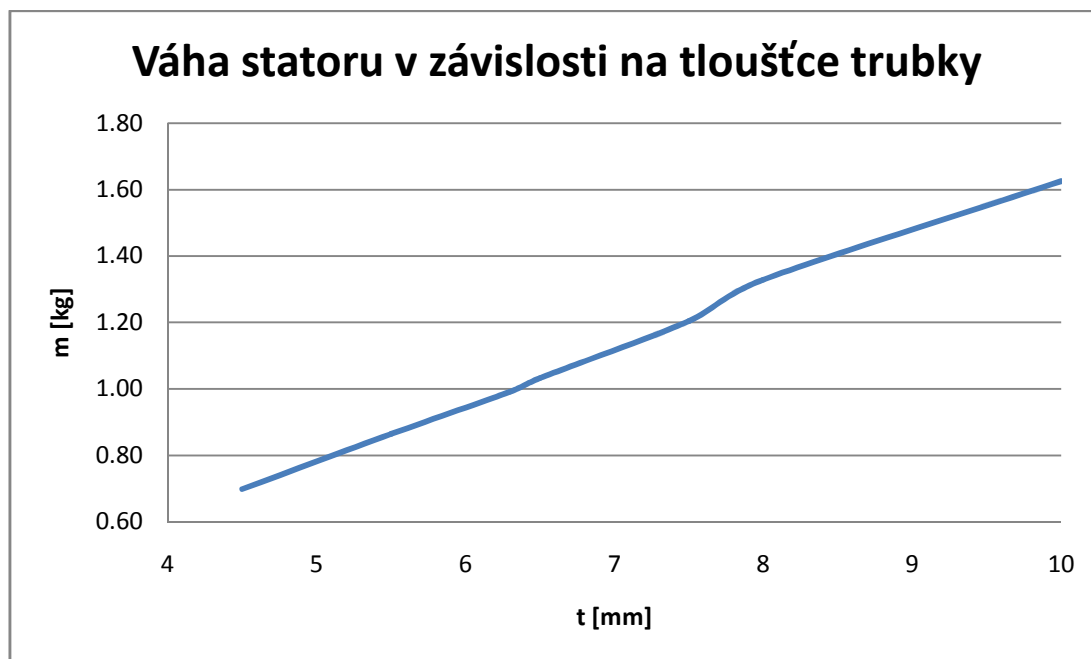
Při zvýšení průměru a tloušťky trubky sice dosáhneme menšího přesycení materiálu a zvýšení záběrného momentu, ale zároveň nám úměrně s přibývajícím materiálem trubky vzroste také její hmotnost. A právě hmotnost je u startéru poměrně důležitá. Startér je sice důležitá součást celého motoru automobilu, ale také je to součást, která pracuje pouze několik málo vteřin při spuštění motoru a pak po úspěšném spuštění již nezastává další funkci a dále již bez činnosti vyčkává na další start motoru. Proto se snažíme o co nejmenší rozměry a hmotnost, aby zbytečně nezvyšoval hmotnost a velikost celého motoru.

Pomocí analýzy metodou konečných prvků v programu Maxwell, provedeme několik výpočtů pro různé rozměry bezešvých trubek a uvidíme, jak se změnil záběrný moment, rozložení magnetické indukce ve statoru a pak vypočteme, jak se změnila váha jha statoru při použití různých trubek. Musíme si ale uvědomit, že si nemůžeme uvažovat libovolné rozměry a tloušťky bezešvých trubek. Každý výrobce může samozřejmě vyrábět různé velikosti trubek, ale většinou jsou vyráběny ve standardizovaných rozměrech. V následující tabulce jsou uvedeny váhy bezešvých trubek pro délku statoru našeho modelu. První hodnota je pro původní zadání a ve zvýrazněných řádcích jsou uvedeny standardizované trubky od výrobce KönigFrankstahl [10].

Tabulka 1 Váhy jednotlivých typů bezešvých trubek

Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Tloušťka [mm]	Objem [dm ³]	Váha [kg]
92	83	4,5	0,089019	0,69880
94	83	5,5	0,110044	0,86385
95	82,4	6,3	0,126336	0,99174
96	83	6,5	0,131522	1,03245
98	83	7,5	0,153452	1,20460
101,6	85,6	8	0,169289	1,32892
101,6	81,6	10	0,207089	1,62565

Jak můžeme vidět na následujícím grafu, závislost je téměř lineární. Drobné odchylky jsou dány zaokrouhlením hodnot.



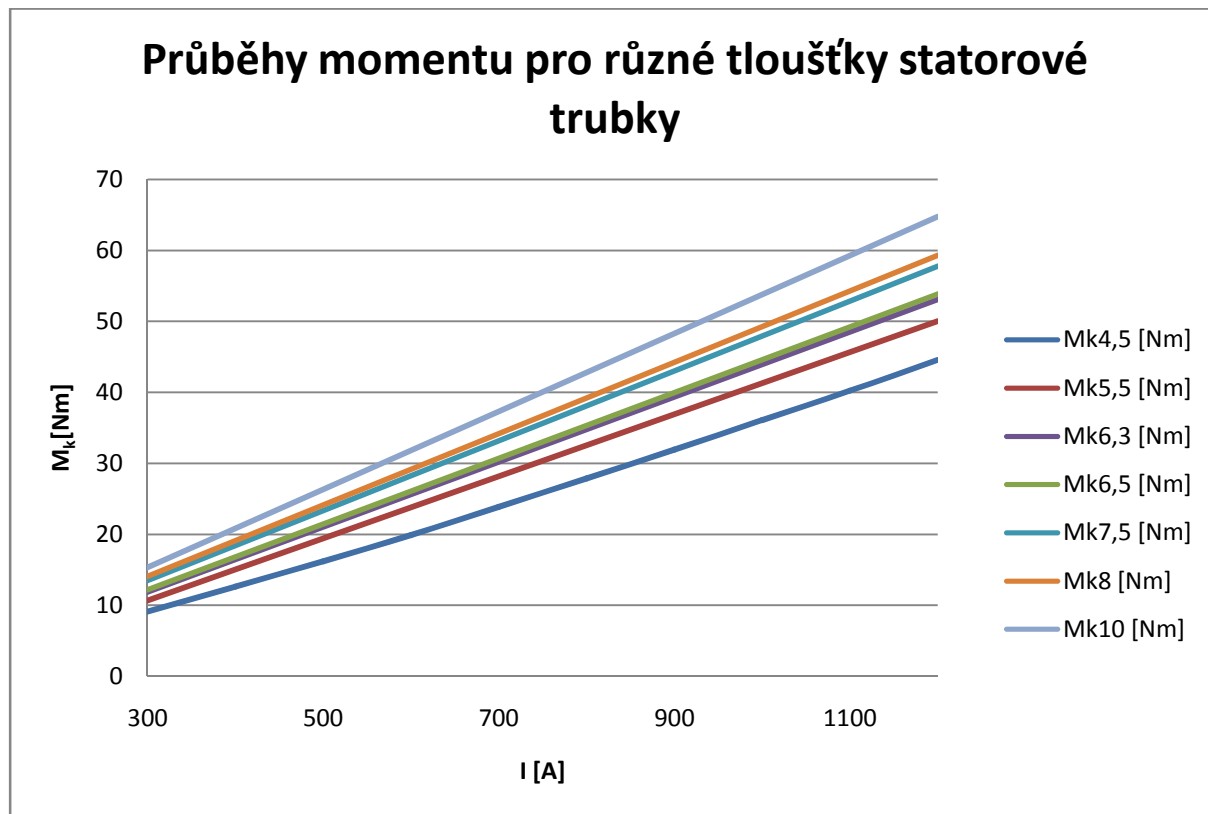
Obrázek 5-1 Závislost hmotnosti na tloušťce trubky

V další tabulce jsou uvedeny hodnoty záběrného momentu pro jednotlivé tloušťky statorových trubek. Pomocí analýzy metodou konečných prvků byly tyto momenty vypočteny pro hodnoty proudů od 300A do 1200A. Pro každou tloušťku trubky byl pozměněn model stroje a provedena analýza pro daný rozsah proudů.

Tabulka 2 Hodnoty záběrného momentu pro jednotlivé druhy bezešvých trubek

Tloušťka [mm]	I [A]	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
4,5	M _{k4,5} [Nm]	9,09	12,63	16,19	19,88	23,84	27,89	31,93	36,09	40,24	44,53
5,5	M _{k5,5} [Nm]	10,64	16,16	18,53	22,72	26,89	30,79	36,43	40,24	48,04	50,02
6,3	M _{k6,3} [Nm]	11,88	16,19	20,84	24,78	29,21	33,55	40,17	43,08	47,89	53,08
6,5	M _{k6,5} [Nm]	12,17	16,60	21,10	27,09	30,21	34,23	39,01	43,47	48,82	53,84
7,5	M _{k7,5} [Nm]	13,49	18,41	23,18	27,91	32,38	37,35	42,26	47,23	52,34	57,76
8	M _{k8} [Nm]	14,07	19,20	24,21	29,15	33,71	39,92	43,71	49,37	54,19	59,32
10	M _{k10} [Nm]	15,35	21,22	26,76	32,24	37,55	43,07	48,40	53,69	59,39	64,75

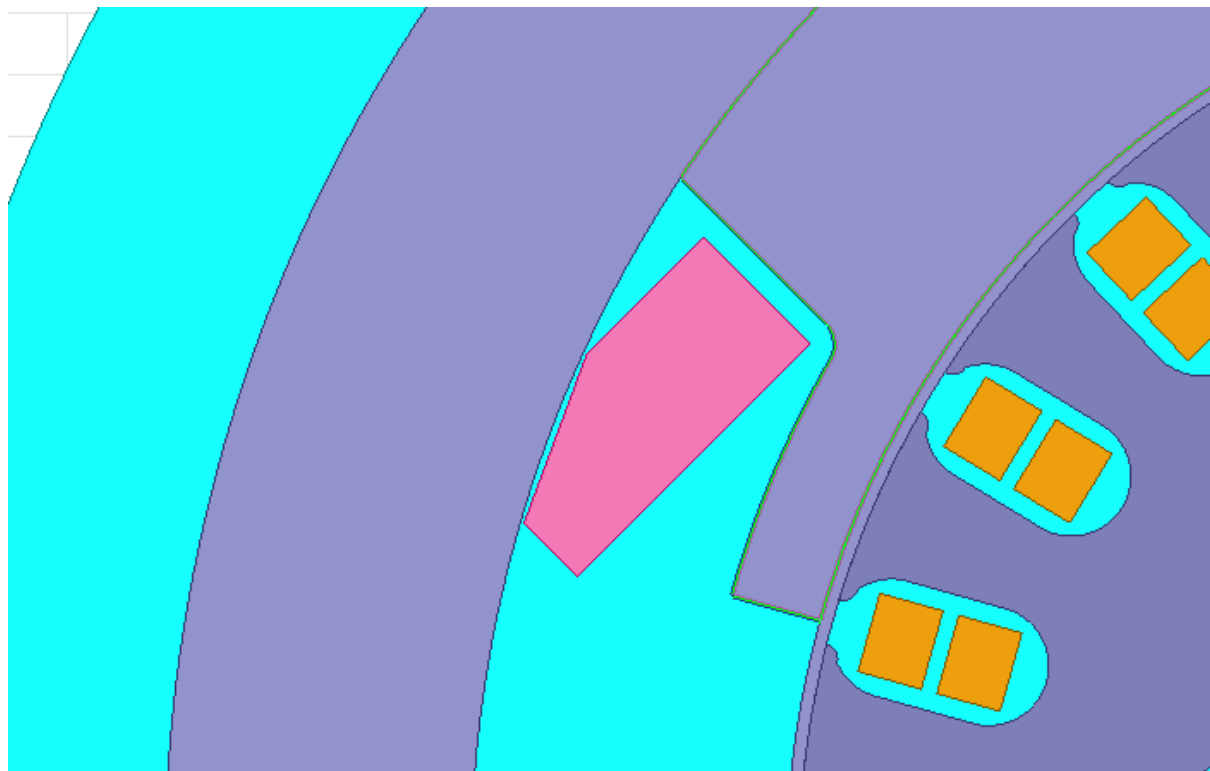
Hodnoty v tabulce jsou pro lepší přehlednost vyneseny do následujícího grafu:



Obrázek 5-2 Závislost záběrného momentu na proudu pro jednotlivé tloušťky trubek

V grafu si můžeme všimnout, že se zvětšující se tloušťkou trubky se zvyšuje také závěrný moment spouštěče. To je dáno tím, že zde dochází k menšímu přesycování stroje a magnetická indukce je tedy v oblasti statoru menší. Zároveň se však zvyšuje váha použité trubky. Při dvojnásobné tloušťce oproti původnímu provedení se zvýší dvojnásobně váha. To bude mít nepříznivý dopad na váhu celého spouštěče a tím pádem i na jeho cenu.

Poslední varianta trubky v tabulce 1, o tloušťce 10mm, má menší vnitřní průměr oproti původnímu zadání. Tím pádem by se musela zmenšit i výška pólu. Vinutí statoru by se téměř dotýkalo trubky, takže by muselo být posunuto níže, kde již ale není mnoho prostoru, protože musíme ještě uvažovat izolaci vinutí. I přes jeho vysoký záběrný moment uvedený v tabulce 2 není tento typ trubky vhodný, zejména kvůli své váze a větším rozměrům.

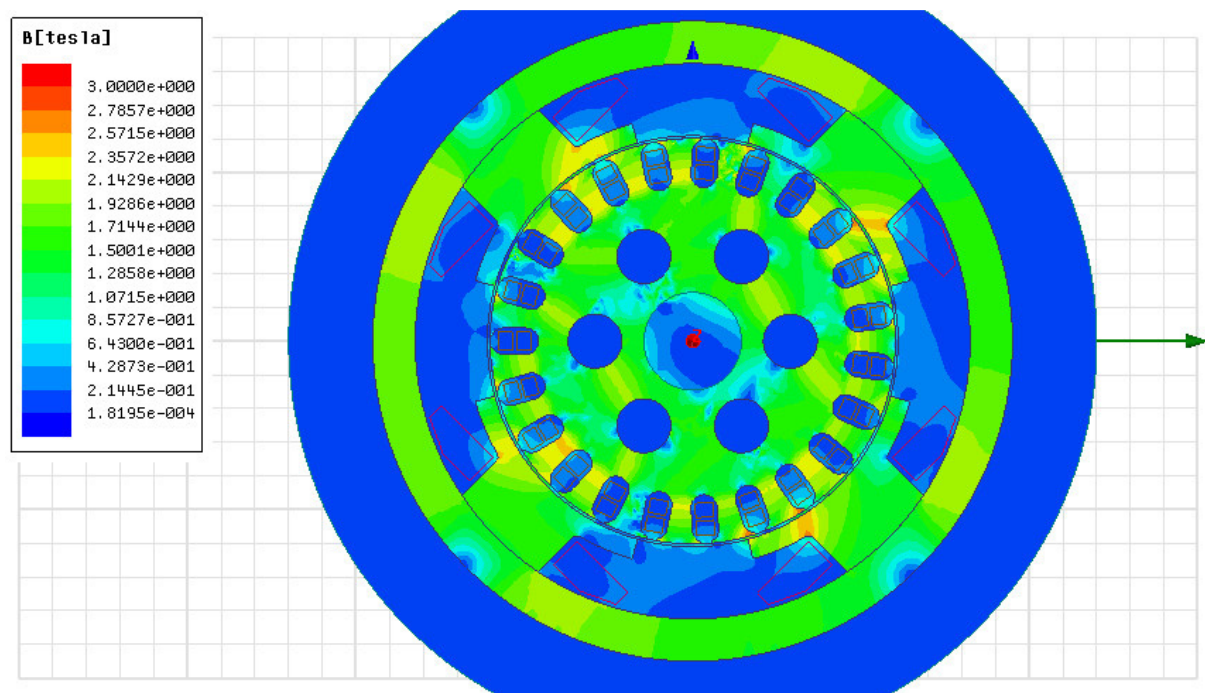


Obrázek 5-3 Uložení vinutí statoru při použití bezešvé trubky o tloušťce 10mm

Trubka statoru o stejném vnějším průměru 101,6mm, ale o tloušťce 8mm má stále velkou hmotnost, tudíž ji budeme taky uvažovat jako nevhodnou pro tento stroj.

Ze standardně vyráběných bezešvých trubek nám tedy zbývá trubka o vnějším průměru 95mm a tloušťce 6,3mm. Vnitřní průměr je sice o pár milimetrů menší, než v původním provedení, ale tento rozdíl není tak velký, aby nám činil nějaký větší problém, například při uspořádání vinutí statoru. Na následujícím obrázku můžeme vidět rozložení magnetické indukce ve stroji při použití této trubky. Jak si můžeme všimnout, magnetická indukce v oblasti statoru se o

něco zmenšila, takže dochází k menšímu přesycování materiálu a úniku magnetických siločar mimo stroj do okolního vzduchu. Díky tomu dojde ke zvětšení záběrného momentu.



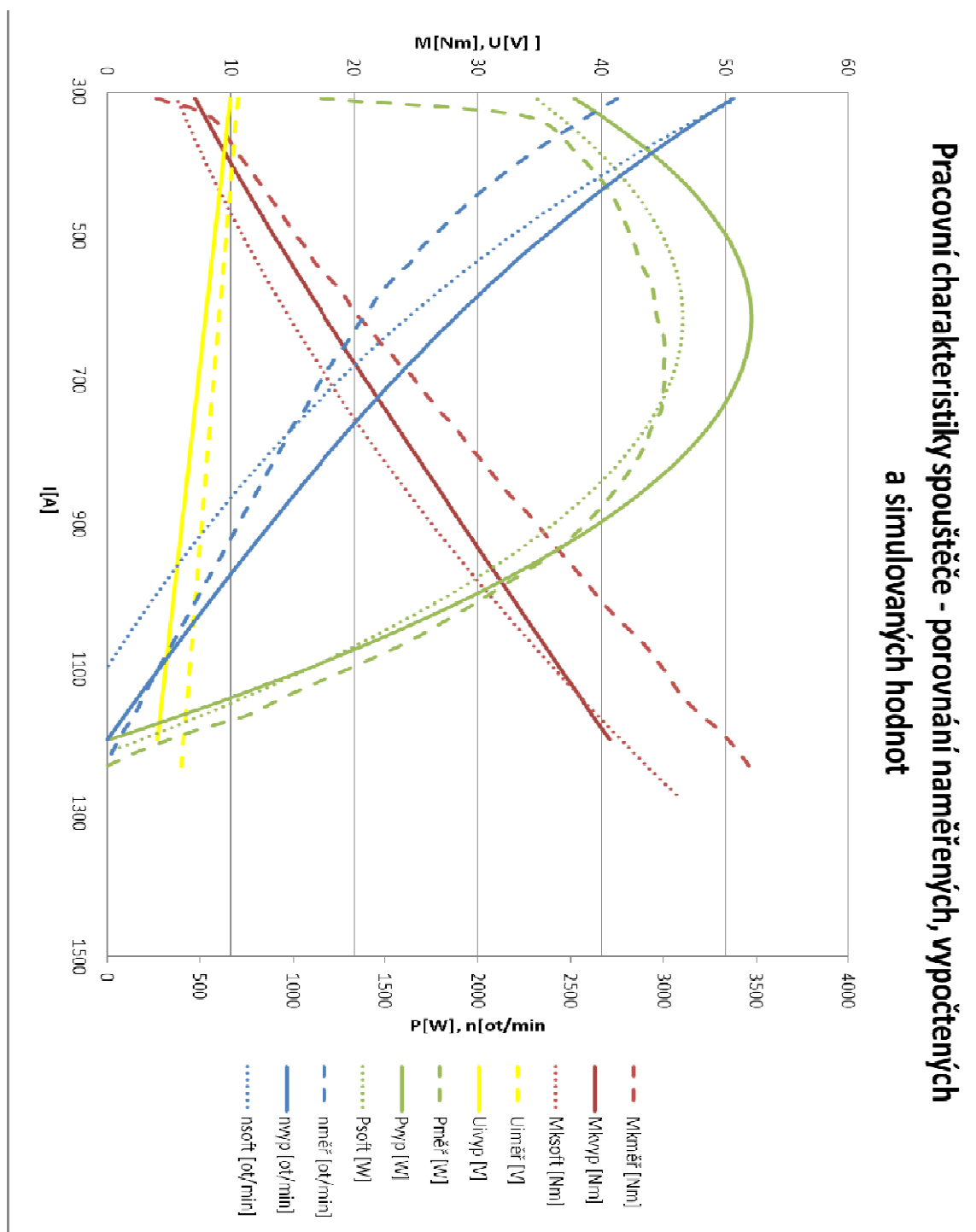
Obrázek 5-4 Rozložení magnetické indukce při použití bezešvé trubky o tloušťce 6,3mm

6. Porovnání výsledků

Cílem této diplomové práce bylo srovnání naměřených hodnot startéru s hodnotami získanými analytickým výpočtem a simulací v programu RMxprt a Maxwell. Měření startéru bylo prováděno při teplotě okolí 23,6°C, proto byl analytický výpočet upraven a počítán také pro kladnou teplotu, aby bylo možno porovnávat naměřené a vypočtené výsledky. Rozdíl při spouštění motoru v kladných a záporných teplotách je dán odporem baterie a viskozitou oleje. Ve výpočtu bylo počítáno s vnitřním odporem baterie 3,85mΩ. Kdybychom uvažovali spouštění při mezních teplotách, odpor baterie by byl větší. Například pro standardní baterii 55Ah by byl její celkový odpor 14mΩ.

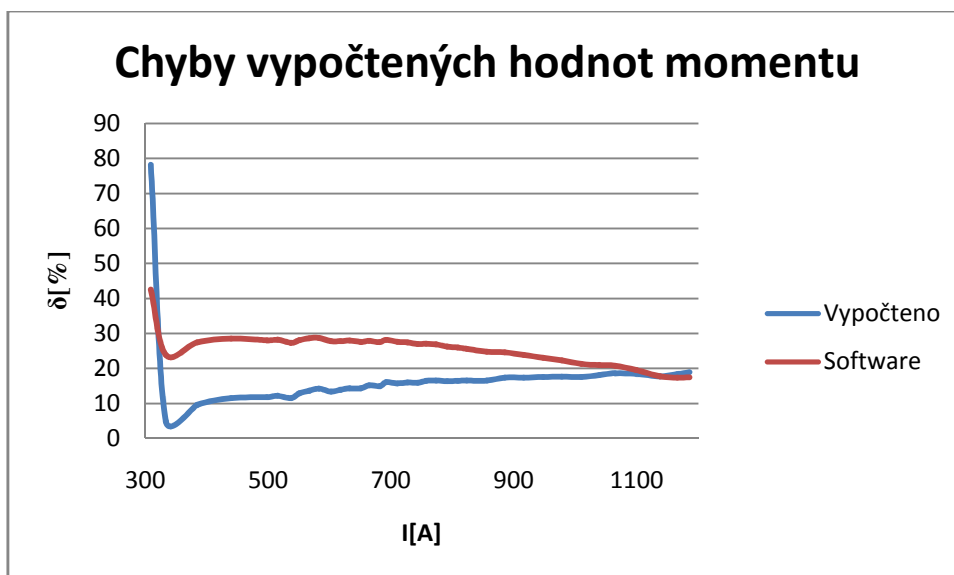
Abychom mohli měřené a vypočtené hodnoty porovnávat, byl proud, který se ve výpočtu volil, volen podle naměřených hodnot. Ze začátku výpočtu je několik nižších hodnot proudu, které nebyly změřeny a musí se tedy porovnávat výsledky až od hodnoty proudu $I = 308,8\text{A}$. Nemožnost měření při nižších proudech je dána tím, že startér nemůže pracovat naprázdno, tedy bez zatížení. Došlo by totiž k nárůstu otáček na příliš vysokou hodnotu a mohlo by tím pak dojít ke zničení startéru.

V následujícím grafu jsou uvedeny jak naměřené, tak vypočtené pracovní charakteristiky a jejich porovnání. Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny plnou čarou, naměřené hodnoty čárkovanou čarou a hodnoty vypočtené softwarem RMxprt čarou tečkovanou.



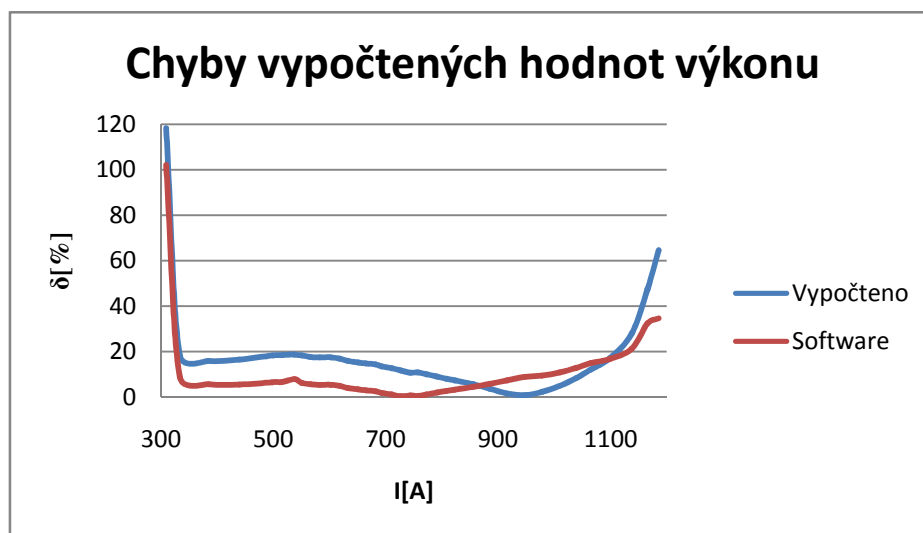
Obrázek 6-1 Porovnání pracovních charakteristik spouštěče - naměřené, vypočtené a simulované hodnoty

Na dalším grafu jsou znázorněny procentuální rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami, v závislosti na zvyšujícím se proudu. Přičemž jako správné hodnoty jsou brány hodnoty naměřené.



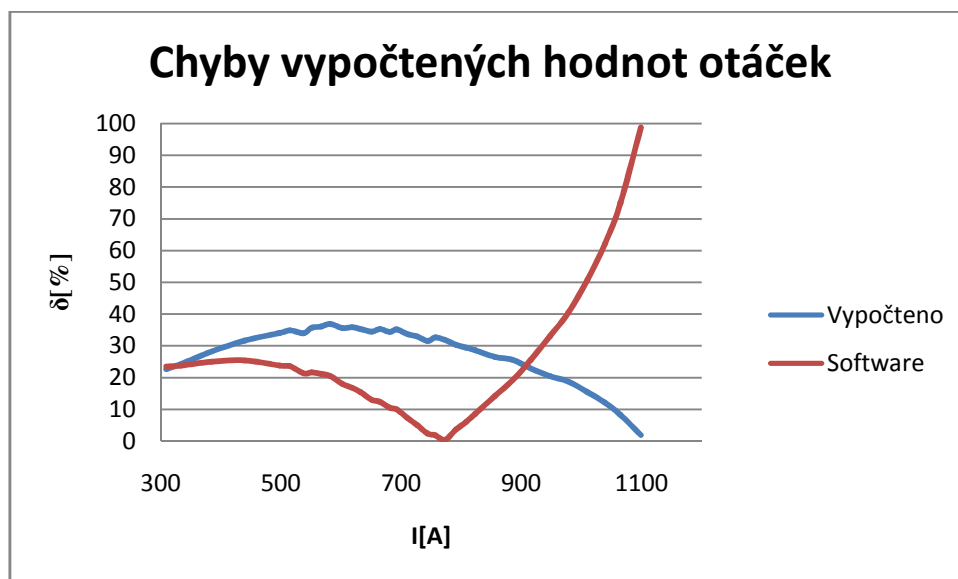
Obrázek 6-2 Procentuální chyby vypočtených a simulovaných hodnot momentu v závislosti na proudu

V prvním bodě je chyba měření poněkud veliká. To může být způsobeno chybou měření při vysokých počátečních otáčkách a malém proudu. Se zvyšujícím se proudem se odchylka vypočtených hodnot momentu zmenšuje.



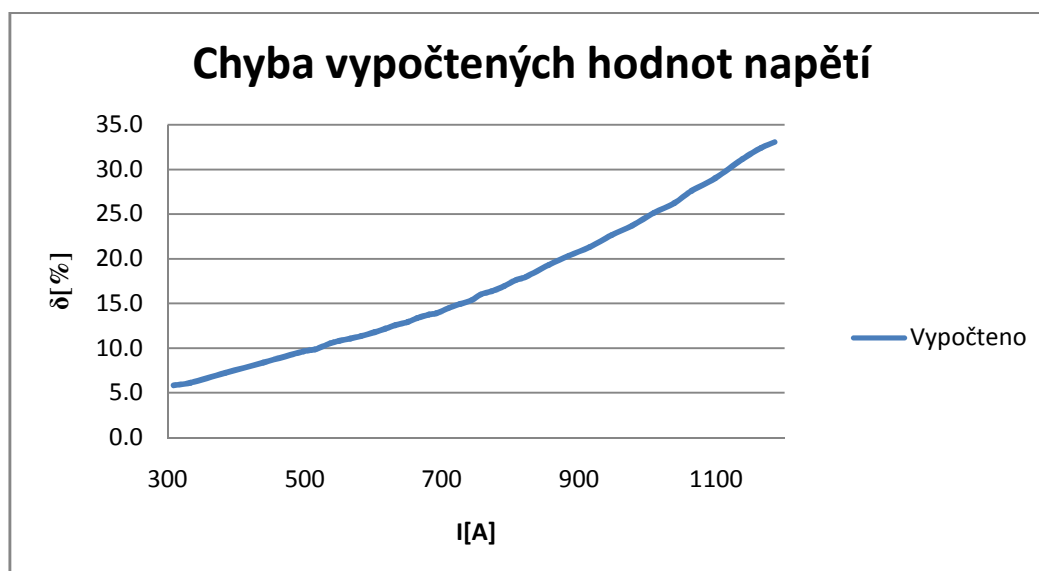
Obrázek 6-3 Procentuální chyby vypočtených a simulovaných hodnot výkonu v závislosti na proudu

Chyba výkonu je na začátku, stejně jako předtím u momentu, hodně vysoká. Při vyšších proudech se ustálí na nižší hodnotě. K dalšímu většímu výkyvu dojde až na konci měření při hodnotách proudu blízkém se proudu nakrátko.



Obrázek 6-4 Procentuální chyby vypočtených a simulovaných hodnot otáček v závislosti na proudu

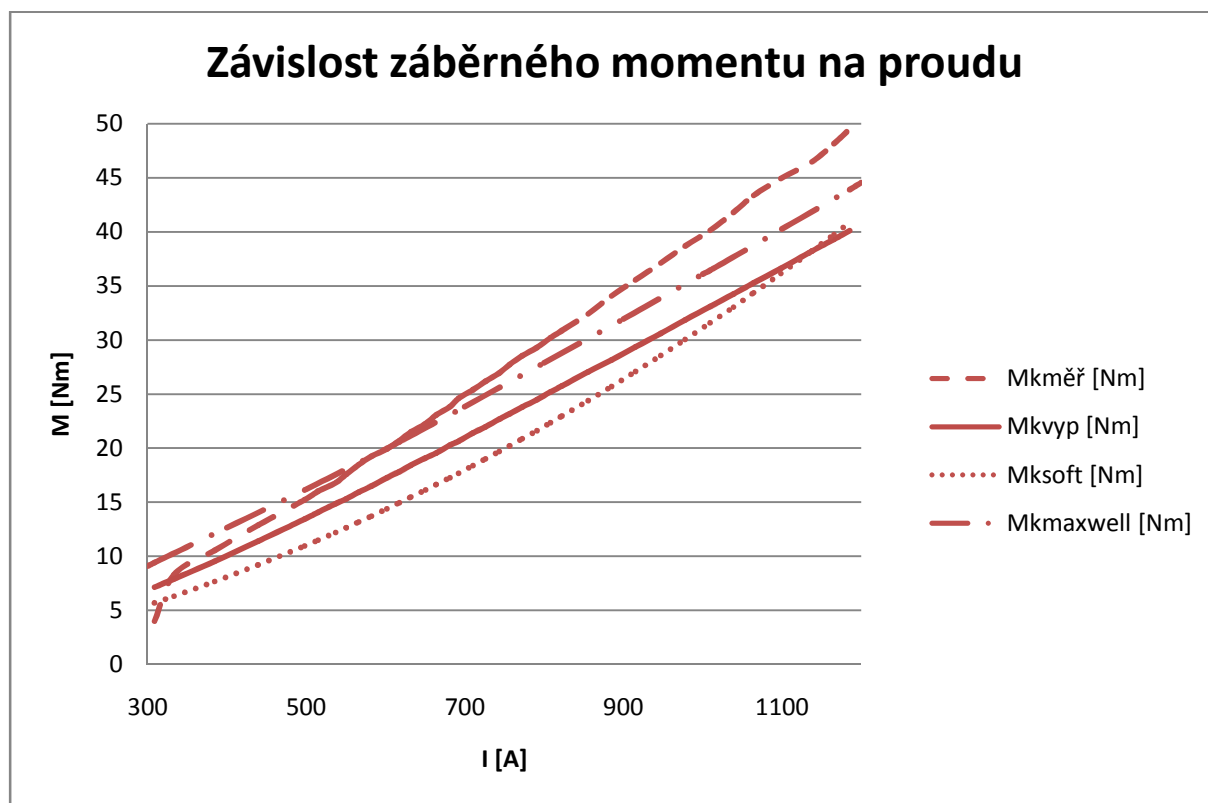
Chyba otáček u vypočtených hodnot analytickým výpočtem se zvyšuje spolu s výkonem. Při maximálním výkonu je chyba největší a se zmenšujícím se výkonem se chyba také zmenšuje. U hodnot vypočtených softwarem se chyba od začátku pomalu zmenšuje, při zhruba 800A je téměř nulová, ale pak se opět zvětšuje. Strmost charakteristiky otáček vypočtené softwarem je větší než naměřená, proto dosáhne nižšího proudu nakrátko.



Obrázek 6-5 Procentuální chyba vypočtených hodnot napětí v závislosti na proudu

Hodnoty výpočtu se od hodnot naměřených v některých místech liší více, než je požadováno. Tyto větší chyby jsou způsobeny nepřesnou charakteristikou chodu naprázdno. Abychom dosáhli přesnější charakteristiky naprázdno a tím pádem i přesnějších pracovních charakteristik, museli bychom mít k dispozici magnetizační charakteristiky pro materiály, které byly použity pro výrobu spouštěče. Tyto charakteristiky se nedají nijak vypočítat, ale pouze změřit. Musely být tedy použity materiály, pro které byly dostupné magnetizační charakteristiky z dřívějších měření. Proto se tedy vypočtené hodnoty liší od naměřených více, než bychom požadovali. Optimální rozdíl hodnot je mezi 5 – 10%.

Při výpočtu spouštěče metodou konečných prvků pomocí programu Maxwell jsme se zaměřili na výpočet záběrného momentu. Nyní můžeme provést porovnání všech tří výpočetních metod a porovnat je s naměřenými hodnotami.



Obrázek 6-6 Závislost momentu na proudu pro všechny výpočetní metody

Naměřené hodnoty momentu jsou znázorněny čárkovanou čarou, analyticky vypočteného hodnoty plnou čarou, hodnoty z RMxprt tečkovanou čarou a hodnoty vypočtené analýzou v Maxwell jsou čerchovanou čarou. Můžeme si všimnout, že největší chybu od naměřených hodnot má výpočet v programu RMxprt. Tímto programem se sice dají vypočítat pracovní charakteristiky stroje, ale výpočet nebývá příliš přesný. Program slouží hlavně pro vytvoření modelu stroje z definovaných šablon strojů. Nemusíme složitě vytvářet model stroje pomocí

jiných softwarů, stačí do RMxpert zadat potřebné parametry a program je schopný vytvořit požadovaný model. Ten se dá následně použít při výpočtu metodou konečných prvků v programu Maxwell. Výpočet touto metodou je náročnější časově i na potřebné vybavení, ale zato je mnohem přesnější. Jak si můžeme všimnout v grafu, výpočet touto metodou je nejbližší skutečným naměřeným hodnotám. Analytický výpočet není tak přesný jak výpočet metodou konečných prvků, ale je přesnější než výpočet pomocí RMxpert.

7. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala návrhem automobilového startéru, metodami výpočtu jeho charakteristik a návrhem změny jeho konstrukce pro zlepšení zvoleného parametru. První část práce je teoretická a pojednává o možnostech spouštění motorů, začlenění spouštěče v obvodu motoru, konstrukční provedení spouštěčů a problematice spouštění motorů při mezních teplotách. Ke konci teoretické části jsou uvedeny charakteristiky stejnosměrných a spalovacích motorů.

Druhá část práce je věnována výpočtům pracovních charakteristik spouštěče a možné optimalizaci magnetické indukce ve statorové bezešvé trubce. K výpočtům pracovních charakteristik jsme použili tři způsoby výpočtu.

První způsob výpočtu je analytický elektromagnetický návrh spouštěče. Postup celého výpočtu je uveden v příloze B. Výstupem z prvního oddílu výpočtu jsou pracovní charakteristiky, jejichž hodnoty porovnáváme následně s naměřenými hodnotami. Jak se ukázalo na obrázku 5-1, výpočet se v některých místech liší od naměřených hodnot více, než bychom požadovali. Přesnějšího výpočtu bychom dosáhli, kdybychom měli k dispozici magnetizační charakteristiky pro přesné materiály, ze kterých je spouštěč vyroben. V druhém oddíle analytického výpočtu jsou výstupem momentové charakteristiky pro kladné a záporné teploty. Z charakteristik je patrné, že při záporných teplotách je moment odporu motoru natolik veliký, že námi počítaný spouštěč by nebyl schopen ho roztočit na požadované otáčky. Při kladných teplotách je záběrný moment spouštěče větší než moment odporu motoru a tím pádem dojde k potřebnému roztočení motoru.

Druhý způsob výpočtu byl proveden pomocí softwaru RMxpert. Ze zadaných parametrů program sám vytvořil model stroje, pro který pak vypočetl potřebné charakteristiky. Avšak jak můžeme opět vidět na obrázku 5-1, pracovní charakteristiky se výrazně liší od naměřených hodnot. Proto tento program slouží hlavně pro sestavení modelu, který pak využijeme pro výpočet následující metodou.

Jedná se o výpočet metodou konečných prvků programem Maxwell 14. Z obrázku 5-6 je patrné, že ze všech použitých metod je výpočet touto metodou nejpresnější. Další výhodou je, že zde můžeme kromě záběrného momentu také názorně vidět rozložení magnetické indukce ve stroji. Tabulky všech vypočtených hodnot jsou uvedeny v příloze C.



Na základě tohoto rozložení magnetické indukce zobrazené na obrázku 4-12 můžeme navrhnout změnu v konstrukci spouštěče, která povede ke zvýšení záběrného momentu. Touto změnou je myšleno použití satorové bezešvé trubky o větší tloušťce. Původní trubka má tloušťku 4,5mm. Když použijeme trubku o tloušťce 6,3mm, dosáhneme tím snížení magnetické indukce v satoru, jak je vidět na obrázku 4-16. Tím pádem nám vzroste záběrný moment (tabulka 2). Zhoršující veličina, která se mění při použití trubky o větší tloušťce, je hmotnost trubky. Podle tabulky 1 je patrné, že váha tlustší trubky se oproti původní zvýší o 0,293kg. Pokud bychom používali spouštěč pro motor, který by vyžadoval větší záběrný moment, než má v původním provedení, a nevalilo by nám, že jeho váha by byla o něco větší, dala by se tato změna konstrukce spouštěče použít.

LITERATURA

- [1] BENETKA, M. *Využití nových funkcí Autodesk Inventoru pro modelování elektrických strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 42 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [2] HAMMERBAUER, J. *Startéry*. Materiály k předmětu NSA [online], 2007, [cit. 2013 - 11- 12]. Dostupný z: <http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/NSA/Texty/Startery.pdf>
- [3] Charakteristiky spalovacích motorů. MENDELOVA ZEMĚDĚLSKÁ A LESNICKÁ UNIVERZITA V BRNĚ ÚSTAV ZÁKLADŮ TECHNIKY A AUTOMOBILOVÉ DOPRAVY. *Vozidlová zkušebna* [online]. 2003 [cit. 2014-18-03]. Dostupné z: <http://zkusebna.wz.cz/charakter.htm#otackovecharakteristiky>
- [4] VŠB - TUO. *Spouštěcí zařízení*. Materiály k předmětu AE[online], 2006, [cit. 2014 - 21- 3]. Dostupný z: <http://fe1.vsb.cz/kat430/data/ae/Spousteci%20zarizeni.pdf>
- [5] HÁJEK, V. *BAEB*. Prezentace z přednášek předmětu BAEB , BRNO, FEKT VUT v Brně, 2010
- [6] DENTON, T. (2004) *Automobile Electrical and Electronic Systems*, 3rd edition. Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-62190, 2004.
- [7] FINK, M. a ŘEZNÍČEK, L. *FEM/MKP - Základy použití metody konečných prvků pro technické výpočty v programu Autodesk Inventor Professional* [online]. Trutnov, 2006 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://spstrutnov.cz/o-skole/projekty/technicke-vypocty/skripta-fem-mkp.pdf>
- [8] ZEMAN, J. *METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)* [online]. Praha, 2006 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://mech.fsv.cvut.cz/~zemanj/teaching/mk10/prednasky/prednaska1.pdf>
- [9] VAVERKA, M a VRBKA, M. *Metoda konečných prvků* [online]. Brno, 2006 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska2_mkp.pdf
- [10] *König Frankstahl: SILNOSTĚNNÉ BEZEŠVÉ OCELOVÉ TRUBKY* [online]. 2010 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://www.ocel.cz/?menu=209>
- [11] Ansys Electromagnetics, RMxprt. [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/rmxprt1>
- [12] Ansys Electromagnetics, Maxwell. [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/maxwell>



-
- [13] HÁJEK V., KUCHYŇKOVÁ H.: Starter Motor Dimension. XLII. International Symposium on Electrical Machines SME 2006. Cracow University of Technology, Poland, s 99 – 102, ISBN 83-88309-36-6
- [14] SÁDLÍK, J. *Modelování provozních stavů a využitelnost elektrického generátoru navrženého pro spinningové kolo* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67900. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Kurfürst.
- [15] NAVRÁTIL, M. I. *SPOUŠTĚČE*. Vsetín, 2009. Výukový materiál. Střední odborná škola Josefa Sousedíka Vsetín.
- [16] KUBÁT, J. a JAN, Z. *Elektrotechnika motorových vozidel 2*. 2. vyd. Brno: Avid, 2003. ISBN 978-802-3964-806.
- [17] HÁJEK, V. *Optimalizace spouštěcích souprav spalovacích motorů*. Brno, 1981. Kandidátská disertační práce. VUT Brno FS.



SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A	72
PŘÍLOHA B.....	74
PŘÍLOHA C	90