

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

ŘEŠENÍ ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO POLE VE STEJNOSMĚRNÉM STROJI

SOLUTION MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN DC MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

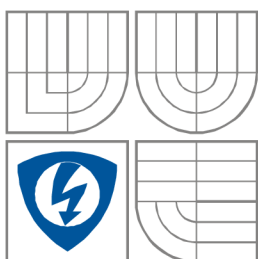
Bc. Jan Hájek

AUTHOR

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ŘEŠENÍ ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉHO POLE VE STEJNOSMĚRNÉM STROJI

SOLUTION MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN DC MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

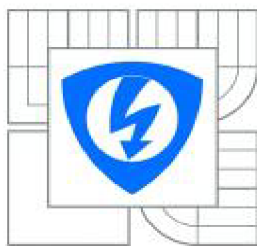
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jan Hájek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Bc. Jan Hájek

Ročník: 2

ID: 109652

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Řešení rozložení magnetického pole ve stejnosměrném stroji

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s funkcí a konstrukčním uspořádáním EC motoru.
2. V programu Ansoft Maxwell proveďte simulace několika konstrukčních variant tohoto stroje.
3. Vyhodnoťte vliv změny konstrukce na rozložení elektromagnetického pole v elektrickém stroji.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí projektu: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

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 Trestného zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce pojednává o rozložení magnetického pole ve stejnosměrném stroji. Součástí této práce je seznámení se stejnosměrnými stroji, principem činnosti a rozdělením stejnosměrných strojů. Dále je zde pojednáno o elektricky komutovaných motorech. V práci jsou ukázány typy permanentních magnetů a jejich vlastností.

Poté je zde provedena analýza magnetického pole elektricky komutovaného motoru Atas Náchod v programu Ansoft Maxwell. Pomocí programu Ansoft Simplorer je provedeno spínání tohoto motoru.

Další součástí této práce je provedení analýzy magnetického pole elektricky komutovaného motoru Atas Náchod pro tři typy drážek statoru tohoto motoru. Zde je patrné, jaký vliv má změna drážek na rozložení magnetického pole v EC motoru. Nakonec je provedeno cvičné měření elektricky komutovaného motoru BOYANG BY92BL48-4000-2200.

Abstract

This thesis deals with distribution of magnetic fields in the DC machine. Part of this thesis is the introduction of DC machines, principles of operation and distribution of DC machines. There is also discussed electrically commutated motors. The thesis demonstrates the types of permanent magnets and their properties.

Then there is an analysis of the magnetic field electrically commutated motor Atas Nachod in the Ansoft Maxwell. Using Ansoft Simplorer, switching is carried out of the engine.

Another part of this work is the analysis of the magnetic field electrically commutated motor Atas Nachod for three types of slot of the stator of the engine. Here it is seen what impact the change has slot on the distribution of magnetic field in the EC motor. Finally, training is carried out measurements of electrically commutated motor BOYANG BY92BL48-4000-2200.

Klíčová slova:

Analýza; Stejnoseměrné stroje; Permanentní magnet; Ansoft Maxwell; Magnetické pole; Metoda konečných prvků; Magnetická indukce; Ansoft Simplorer; EC motor

Keywords:

Analysis; DC machines; Permanent magnet; Ansoft Maxwell; Magnetic field; Finite element method; Magnetic flux density; Ansoft Simplorer; EC machines

Bibliografická citace

Hájek, J. *Řešení rozložení magnetického pole ve stejnosměrném stroji*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Řešení rozložení magnetického pole ve stejnosměrném stroji jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené 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 části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestného zákoníku č.40/2009 Sb.

V Brně dne

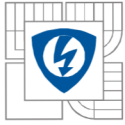
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

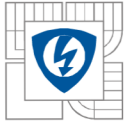
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

1 Úvod	12
2 Stejnoseměrné stroje	14
2.1 Provedení stejnosměrného stroje	15
2.2 Princip činnosti stejnosměrného stroje	16
2.3 Stejnoseměrné stroje a jejich rozdělení	17
2.4 Stejnoseměrné stroje s permanentními magnety	18
3 Elektricky komutované motory (EC motory)	20
3.1 Konstrukce elektricky komutovaného motoru.....	20
3.2 Princip funkce elektricky komutovaného motoru.....	21
4 Permanentní magnety	22
4.1 Magneticky tvrdé ferity	22
4.2 Permanentní magnety ze vzácných zemin	23
4.3 Vlastnosti permanentních magnetů ALNICO	24
4.4 Přednostní osa orientace permanentních magnetů.....	25
5 Ansoft Maxwell	26
5.1 Metoda konečných prvků	26
5.2 Ansoft RMXprt design	27
6 Postup práce při vytváření modelu v programu Ansoft Maxwell v prostředí Rmxprt Design	28
6.1 Vytvoření statoru	28
6.2 Vytvoření vinutí.....	29
6.3 Vytvoření rotoru	29
7 Postup práce při vytváření analýzy v programu Ansoft Maxwell v prostředí 3D Maxwell design	31
8 Postup práce při vytváření simulace spínání EC motoru pomocí Ansoft Simplorer	32
9 Analýza magnetického pole EC motoru Atas Náchod pomocí Ansoft Maxwell 3D Design	33
9.1 Parametry analyzovaného stroje	33
9.2 Rozložení magnetické indukce v elektricky komutovaném motoru (Atas Náchod)	34
9.3 Vektorové rozložení směru a velikosti indukčních čar u elektricky komutovaného motoru (Atas Náchod).....	36
9.4 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt	38
9.5 Výsledky spínání EC motoru (Atas Náchod) pomocí programu Ansoft Simplorer	40



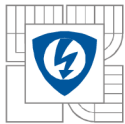
10 Analýza EC motoru pro 3 typy použitých drážek statoru.....	42
10.1 První typ drážky statoru EC motoru	42
10.1.1 Rozložení magnetické indukce pro první typ drážky statoru.....	43
10.1.2 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt.....	45
10.2 Druhý typ drážky statoru EC motoru.....	47
10.2.1 Rozložení magnetické indukce pro druhý typ drážky statoru.....	47
10.2.2 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt.....	49
10.3 Třetí typ drážky statoru EC motoru	51
10.3.1 Rozložení magnetické indukce pro třetí typ drážky statoru.....	51
10.3.2 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt.....	53
11 Měření na EC motoru BOYANG BY92BL48-4000-2200	55
11.1 Základní parametry EC motoru	55
11.2 Měření naprázdno	56
11.3 Měření zatěžovací charakteristiky	58
11.4 Určení důležitých parametrů z naměřených hodnot	60
11.5 Výstupní hodnoty z osciloskopu při měření EC motoru	61
12 Závěr.....	62
Seznam symbolů a zkratk	65
Seznam literatury	66
Přílohy	67

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1</i>	– Stejnoseměrný motor s permanentními magnety [12]	14
<i>Obrázek 2</i>	– Řez moderním stejnosměrným servomotorem s permanentními magnety [1]	15
<i>Obrázek 3</i>	– Princip činnosti stejnosměrného stroje [2]	16
<i>Obrázek 4</i>	– Jednotlivé druhy zapojení stejnosměrných strojů a) cizí buzení b) derivační buzení c) sériové buzení d) s kompaundní buzení [4]	18
<i>Obrázek 5</i>	– Stejnoseměrný motor s permanentními magnety a jeho uspořádání [7]	18
<i>Obrázek 6</i>	– Konstrukce rotoru s magnety na povrchu (a) vestavěnými magnety (b) [14]	20
<i>Obrázek 7</i>	– Elektricky komutovaný motor: a) řez motorem, b) tvar indukce ve vzduchové mezeře, c) tvar proudu v závislosti na poloze rotoru, d) schéma vinutí statoru [14]	21
<i>Obrázek 8</i>	– Teplotní závislost magneticky tvrdých feritů [6]	23
<i>Obrázek 9</i>	– Demagnetizační křivky pro různé permanentní magnety [13]	24
<i>Obrázek 10</i>	– Příklad konečnoprvkové sítě v programu Ansoft Maxwell	26
<i>Obrázek 11</i>	– Uživatelské prostředí programu Ansoft RMxprt	27
<i>Obrázek 12</i>	– Tvorba statoru v prostředí RMxprt	28
<i>Obrázek 13</i>	– Tvorba vinutí v prostředí RMxprt	29
<i>Obrázek 14</i>	– Tvorba pólů v prostředí RMxprt	30
<i>Obrázek 15</i>	– Analyzovaný motor v prostředí 3D Maxwell	31
<i>Obrázek 16</i>	– Model spínání EC motoru v prostředí Ansoft Simplorer	32
<i>Obrázek 17</i>	– Model EC motoru (Atas Náchod) v programu Autodesk Inventor Professional	33
<i>Obrázek 18</i>	– Analyzovaný elektricky komutovaný motor v čase $t=0.5s$	34
<i>Obrázek 19</i>	– Analyzovaný elektricky komutovaný motor v čase $t=0.8s$	35
<i>Obrázek 20</i>	– Detail výskytu nejvyšších hodnot magnetické indukce v čase $t=0.5s$	35
<i>Obrázek 21</i>	– Velikost a směr indukčních čar u elektricky komutovaného motoru v čase $t=0.5s$	36
<i>Obrázek 22</i>	– Závislost magnetické indukce ve vzduchové mezeře na délce v čase $t=0.5s$	37
<i>Obrázek 23</i>	– Závislost výstupního výkonu EC motoru na otáčkách stroje	38
<i>Obrázek 24</i>	– Závislost magnetické indukce ve vzduchové mezeře v závislosti na elektrických stupních	39
<i>Obrázek 25</i>	– Schéma zapojení v programu Simplorer	40
<i>Obrázek 26</i>	– Průběh proudu jednotlivými fázemi při zatěžování motoru	40
<i>Obrázek 27</i>	– Spínání jednotlivých tranzistorů v závislosti na čase	41
<i>Obrázek 28</i>	– První typ drážky statoru	42
<i>Obrázek 29</i>	– Rozložení magnetické indukce pro první typ drážky statoru v čase $t=0,5s$	43
<i>Obrázek 30</i>	– Detail místa s výskytem největších hodnot magnetické indukce v čase $t=0,5s$	43
<i>Obrázek 31</i>	– Velikost a směr indukčních čar v čase $t=0,5s$	44
<i>Obrázek 32</i>	– Magnetická indukce ve vzduchové mezeře v čase $t=0,5s$	44
<i>Obrázek 33</i>	– Závislost účinnosti na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt	45
<i>Obrázek 34</i>	– Závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt	45
<i>Obrázek 35</i>	– Druhý typ drážky statoru	47
<i>Obrázek 36</i>	– Rozložení magnetické indukce pro druhý typ drážky statoru v čase $t=0,5s$	47
<i>Obrázek 37</i>	– Detail místa s výskytem největších hodnot magnetické indukce v čase $t=0,5s$	48
<i>Obrázek 38</i>	– Velikost a směr indukčních čar v čase $t=0,5s$	48
<i>Obrázek 39</i>	– Magnetická indukce ve vzduchové mezeře v čase $t=0,5s$	49
<i>Obrázek 40</i>	– Závislost účinnosti na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt	49
<i>Obrázek 41</i>	– Závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt	50
<i>Obrázek 42</i>	– Třetí typ drážky statoru	51
<i>Obrázek 43</i>	– Rozložení magnetické indukce pro třetí typ drážky statoru v čase $t=0,5s$	51
<i>Obrázek 44</i>	– Detail místa s výskytem největších hodnot magnetické indukce v čase $t=0,5s$	52
<i>Obrázek 45</i>	– Velikost a směr indukčních čar v čase $t=0,5s$	52
<i>Obrázek 46</i>	– Magnetická indukce ve vzduchové mezeře v čase $t=0,5s$	53
<i>Obrázek 47</i>	– Závislost účinnosti na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt	53

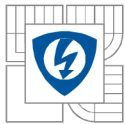


<i>Obrázek 48</i> – Závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti pomocí R_{mxprt}	54
<i>Obrázek 49</i> – Měřený EC motor BOYANG	55
<i>Obrázek 50</i> – Graf závislost momentu M_o na otáčkách stroje n při měření naprázdno	56
<i>Obrázek 51</i> – Graf závislost ztrát naprázdno ΔP_o na otáčkách stroje n při měření naprázdno.....	57
<i>Obrázek 52</i> – Graf závislost účinnosti motoru, účinnosti měniče, účinnosti celkové na zatěžovacím momentu.....	58
<i>Obrázek 53</i> – Graf závislost proudu meziobvodem I_d na zatěžovacím momentu M	59
<i>Obrázek 54</i> – Přepínání jednotlivých fází EC motoru.....	61
<i>Obrázek 55</i> – Průběh fázového proudu (PWM) při měření na EC motoru.....	61



Seznam tabulek

<i>Tabulka 1</i> - Magnetické a fyzikální vlastnosti některých slinovaných NdFeB magnetů [10].....	67
<i>Tabulka 2</i> - Typické magnetické výkonnosti slinovaných SmCo magnetů [10].....	68
<i>Tabulka 3</i> - Typické magnetické výkonnosti ALNICO magnetů [10].....	68
<i>Tabulka 4</i> - Měření na EC motoru naprázdno	69
<i>Tabulka 5</i> - Měření na EC motoru při zatížení ($n=2000 \text{ min}^{-1}$).....	69



1 Úvod

Následkem neustálého rozvoje jednotlivých oblastí průmyslu se také musí neustále zlepšovat pracovní postupy. Pokud chtěl v dřívějších dobách inženýr zjistit parametry stroje a jeho vlastnosti musel provádět složitá měření a složité výpočty. Proto se začalo pracovat na softwarech, které by umožnily provést simulaci stroje a jeho parametrů na počítači. Jeden z těchto programů je Ansys Workbench. Umožňuje řešit fyzikální, elektrotechnické, magnetické a další problematiky za použití metody konečných prvků. V nedávné době přišel na trh nový produkt Ansoft Maxwell, kterým jsou řešeny především problematiky magnetických polí. Součástí tohoto programu je Ansoft Simplorer. Simplorer nám umožňuje simulovat různé elektrotechnické stavy. Toto prostředí je propojeno s prostředím Ansoft Maxwell a umožňuje nám například řešit spínání motoru. Cílem této práce bude seznámit se s programem Ansoft Maxwell a provést analýzu magnetického obvodu stejnosměrného stroje s permanentními magnety.

První část věnuji stejnosměrným strojům, jejich rozdělení, principu činnosti, konstrukci a také stejnosměrným strojům s permanentními magnety. Popisuji zde možnosti zapojení budícího vinutí stejnosměrných strojů. Stejnosměrné stroje patří ke strojům, které mají bohatou historii.

V druhé část tezu je seznamuje s elektricky komutovaným motorem (EC motorem). Dozvíte se něco o principu funkce, konstrukci a spínání tohoto motoru.

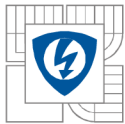
Třetí část je zaměřena na druhy permanentních magnetů. Permanentní magnety mohou být vytvořeny jak ze vzácných zemin, tak magneticky tvrdých feritů. Ukážu Vám zde teplotní závislost magneticky tvrdých feritů a také demagnetizační křivky pro různé permanentní magnety. Seznámím Vás s termínem přednostní osa orientace u permanentních magnetů

Další část je zaměřena na program Ansoft Maxwell. Tento program je založen na metodě konečných prvků. Přiblížím Vám s prostředím Ansoft RMXprt Design.

V páté části je popsán postup tvorby modelu EC motoru s permanentními magnety v prostředí Ansoft RMXprt Design. Je zde například vidět, jak vytvořit vinutí stroje, nastavit vlastnosti materiálů, tvorba rotoru a jeho pólů, tvorba statoru a jeho drážek.

Následná část Vám ukáže prostředí Ansoft 3D Maxwell Design. Po převedení modelu stejnosměrného stroje z prostředí RMXprt do 3D Maxwell design přistoupím k provedení analýzy magnetické pole. Uvedu Vám, jaké kroky se musí provést před spuštěním analýzy.

V následné sedmé části vytvářím spínání elektricky komutovaného motoru v prostředí Ansoft Simplorer. Tady uvidíte, jak je možno řešit spínání EC motoru.



V osmé části provádím analýzu magnetického pole elektricky komutovaného motoru v prostředí Ansoft Maxwell 3D design na motoru Atas Náchod. Zde se dozvíte, jak vypadá rozložení magnetické indukce v tomto motoru, a také uvidíte rozložení magnetických indukčních čar v tomto motoru. Jsou zde vidět některé závislosti vypočtené prostředím Rmxprt a v neposlední řadě výsledky z prostředí Simplorer.

Následná část je zaměřena na analýzu elektricky komutovaného motoru pro případ, že budeme postupně měnit typ drážek statoru. Uvidíte tři typy drážkování statoru a na těchto typech změnu rozložení magnetické indukce. Z těchto příkladů bude patrné, jaký vliv má změna drážek na rozložení magnetické indukce v EC motoru.

Poslední část je zaměřená na praktické měření EC motoru BOYANG BY92BL48-4000-2200. Na tomto motoru bylo provedeno měření momentové charakteristiky naprázdno, měření zatěžovací charakteristiky a následně vypočteny ztráty vznikající na jednotlivých prvcích stroje a vypočteny účinnosti.

2 Stejnosměrné stroje

Stejnosměrné stroje můžeme zařadit mezi nejstarší elektrické stroje. Tyto stroje se používaly jak k výrobě elektrické energie (Dynamy), tak k její přeměně na energii mechanickou (Motory). V současné době nejvíce využíváme motory pro své dobré regulační vlastnosti. Mají lineární mechanické a většinou i regulační charakteristiky. Střídavé motory stejného výkonu mají mnohdy mnohonásobně větší hmotnost a jsou rozměrově větší, než stejnosměrné stroje. Tudíž se s výhodou používají stejnosměrné motory.

Stejnosměrné motory se vyznačují velkým záběrným momentem a poměrně malou časovou konstantou. Mezi jejich největší nevýhodu patří použití kluzných kontaktů mezi kartáči a komutátorem. S rozvojem elektroniky se dnes dají stejnosměrné motory vyrábět s elektronickou komutací, tedy konstrukce pomocí bezkartáčových motorů.

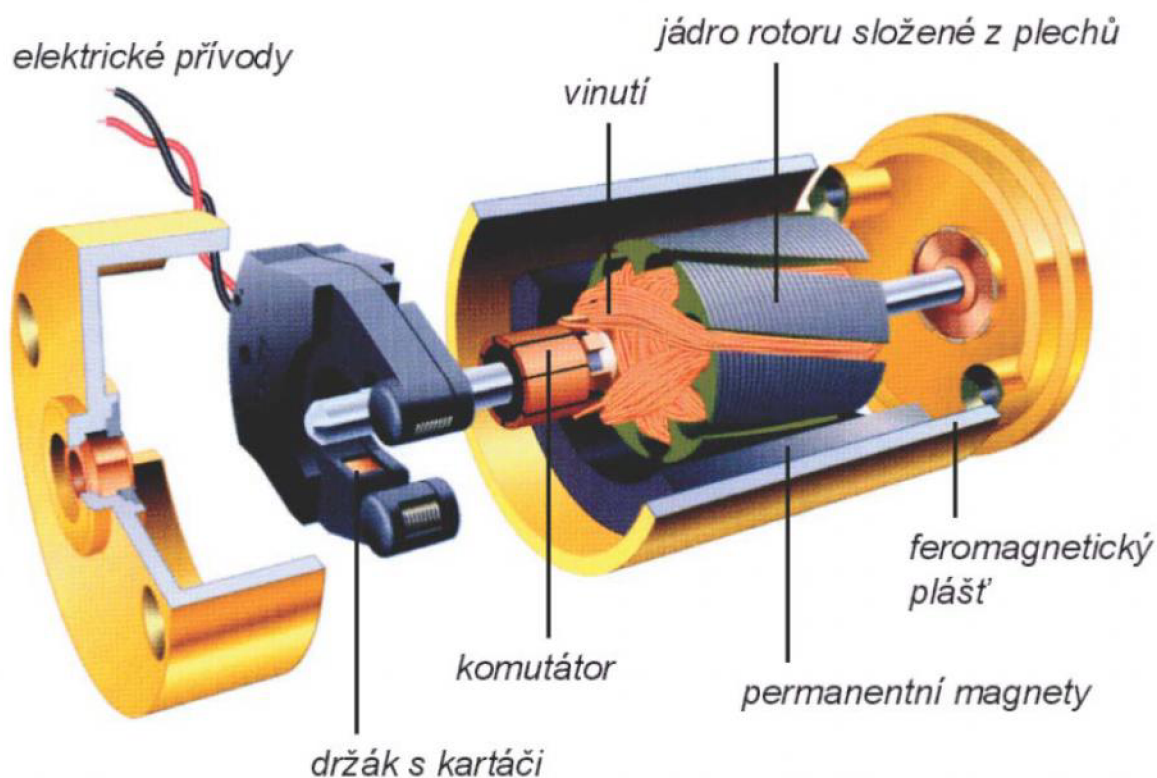


Obrázek 1- Stejnosměrný motor s permanentními magnety[12]

2.1 Provedení stejnosměrného stroje

Základem stejnosměrného motoru je rotor a stator. Budící vinutí je umístěno na pólech statoru a napájíme ho stejnosměrným proudem. Vinutí kotvy je umístěno do drážek rotoru. Na statoru bývají k vytvoření magnetického toku umístěny hlavní póly. Tyto póly mohou být buzeny cívkami nebo permanentními magnety. Budící vinutí a jejich póly se skládají z pólového jádra a pólového nástavce. Pro zlepšení komutačních vlastností stroje zde můžou být pomocné póly (komutační), které jsou umístěny mezi hlavními póly.

Rotor je pohyblivá část stroje, také nazývaná kotva. Je složena z izolovaných dynamových plechů (křemíkových) a v jeho drážkách po obvodu je vinutí. Každá jednotlivá cívka vinutí kotvy je připojena k měděným vzájemně izolovaným lamelám komutátoru. Komutátor zastává funkci mechanického usměrňovače proudu. Magnetický obvod společně s komutátorem je mechanicky připevněn k hřídeli stroje. Další částí jsou kartáče, které přiléhají ke komutátoru a které přivádí proud do vinutí kotvy.[1]

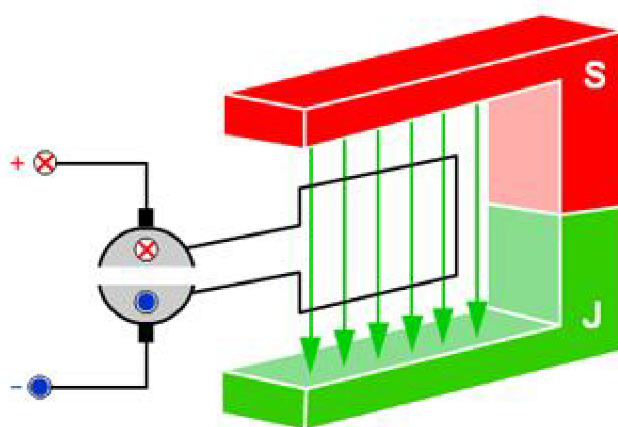


Obrázek 2- Řez moderním stejnosměrným servomotorem s permanentními magnety [1]

2.2 Princip činnosti stejnosměrného stroje

Vysvětlit princip činnosti na elementárním stroji není těžké. Jeho vinutí tvoří pouze dva vodiče a, b spojené do jediného závitu umístěného na rotoru. Tento závit se otáčí v magnetickém poli, které nám vytvoří dvojice hlavních pólů.

Závit je připojen ke dvěma lamelám komutátoru. Tyto lamely jsou navzájem izolovány a otáčejí se společně s rotorem. Nepohyblivé kartáče nám dosedají na komutátor a jsou umístěny do neutrální osy.

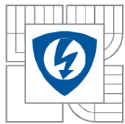


Obrázek 3- Princip činnosti stejnosměrného stroje [2]

Pokud se otáčí kotva otáčkami $n[\text{min}^{-1}]$, pohybují se vodiče závitu o délce $l [\text{m}]$ v magnetickém poli s indukcí $\mathbf{B} [\text{T}]$ rychlostí $\mathbf{v} [\text{m/s}]$, poté zde platí indukční zákon.

$$U_{ind.} = B \cdot l \cdot v \quad [V] \quad (1)$$

Za polovinu otáčky si vodič vymění místa a indukované napětí v nich změní svůj směr. Mají tedy tvar střídavého napětí. Vodiče připojené k lamelám komutátoru dosedají na kartáče. Ke kladnému kartáči je připojen vodič pod jižním pólem, k zápornému kartáči vodič pod severním pólem. Z toho plyne, že polarita na kartáčích se nemění a komutátor usměrňuje střídavé napětí indukované ve vinutí kotvy. Obvodem připojeným ke kotvě protéká stejnosměrný proud a ve vodičích kotvy má proud charakter střídavý.



Časové průběhy indukovaného napětí jsou dány šířkou pólů, tvarem pólových nástavců stroje a indukcí magnetického pole ve vzduchové mezeře. Na svorkách stroje je pulzující indukované napětí. Pro zlepšení indukovaného napětí se vinutí kotvy vyrábí s větším počtem cívek a jemu odpovídajícím počtem lamel komutátoru.

Pokud vodiči bude procházet proud I_a [A] a budou se nacházet v magnetickém poli s indukcí B [H] poté síla F [N] je rovna:

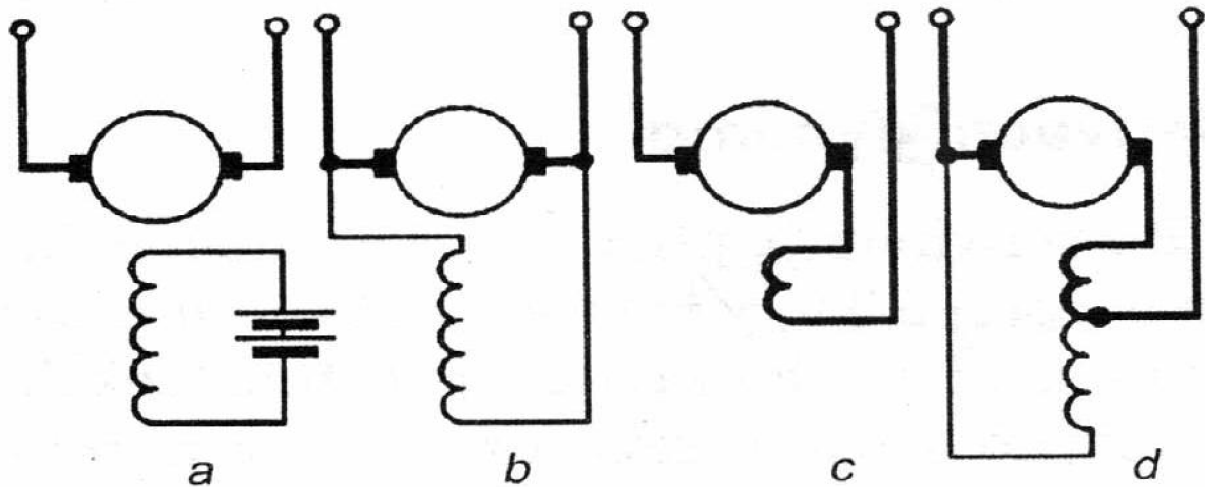
$$F = B \cdot I_a \cdot l \quad [N] \quad (2)$$

Jednotlivé síly působící na vodiče cívky vytvářejí točivý moment, jehož směr bude závislý na směru proudu ve vodičích a v přívodu k motoru. Pokud se připojí napětí zdroje, které je větší než indukované napětí, poté bude mít stroj hnací účinek. V případě, že napětí zdroje bude menší než indukované napětí, stroj bude mít brzdňný účinek.[3]

2.3 Stejnosemřné stroje a jejich rozdělení

Pokud je budící vinutí na hlavních pólech, můžeme stejnosemřné stroje rozdělit do těchto skupin.

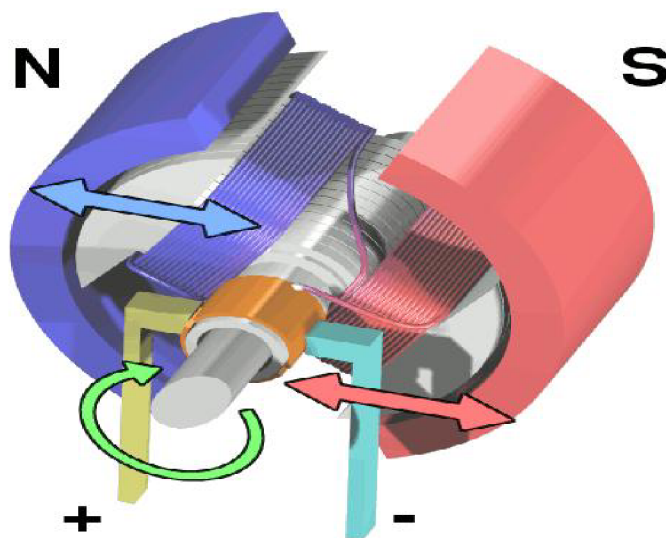
- a. **Stroje s cizím buzením**- Budící vinutí je napájeno z nezávislého stejnosemřného zdroje, také může mít stroj permanentní magnety.
- b. **Stroje s derivačním buzením**- Budící vinutí na hlavních pólech je zapojeno paralelně ke kotvě.
- c. **Stroj se seriovým buzením**- Budící vinutí na hlavních pólech je zapojeno do série s kotvou.
- d. **Stroj se smíšeným buzením** - Hlavní póly tvoří budící vinutí derivační a budící vinutí seriové. Tyto stroje můžeme rozdělit na dva základní druhy:
 - **Kompaundní buzení**- obě buzení vytvářejí magnetické napětí ve stejném směru
 - **Protikompaundním buzením**- buzení na hlavních pólech vytváří magnetické napětí opačného směru
- e. **Stroje s permanentními magnety**- K buzení se využívají permanentní magnety, co je vzhledem ke kotvě jistý druh cizího buzení. Toto buzení se nedá regulovat.



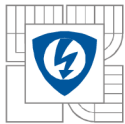
Obrázek 4 - Jednotlivé druhy zapojení stejnosměrných strojů a) cizí buzení b) derivační buzení c) sériové buzení d) s kompaundní buzení [4]

2.4 Stejnosměrné stroje s permanentními magnety

Patří mezi nejjednodušší stroje na stejnosměrný proud. Stator je tvořen permanentními magnety a rotující kotvou ve formě elektromagnetu s dvěma póly. Komutátor mění směr proudu a polaritu magnetického pole procházející kotvou dvakrát během každé otáčky. To má za následek, že síla působící na póly rotoru má stále stejný směr. Pokud přepneme polaritu, běh motoru ve správném směru zajišťuje setrvačnost.



Obrázek 5- Stejnosměrný motor s permanentními magnety a jeho uspořádání [7]



Na obr.5. je vidět, že rotor (kotva) je přes komutátor připojen ke zdroji stejnosměrného napětí. Stator je tvořen dvěma velkými permanentními magnety. Díky polaritě statoru a rotoru se souhlasně orientované póly odpuzují a rotor se otáčí. Opačné póly se přitahují, a tak se rotor může neustále točit. V okamžiku, kdy rotor dojde do vodorovné polohy, tak se na komutátoru změní polarita magnetického pole rotoru.

Nejvíce se tyto motory uplatňují v modelářském průmyslu. Mívají minimálně třípólovou kotvu kvůli problematice mrtvého úhlu. Mezi největší výhodu patří snadná změna směru otáčení pomocí vstupního napětí. Oproti jiným komutátorovým strojům tolik neopotřebovává statorové vinutí.

Největší nevýhodou těchto motorů je, že se skládají z komutátoru. Ten má velké nároky na údržbu a je náchylný k poruchám. Jiskření na kartáčích je zdrojem velkého elektromagnetického rušení.

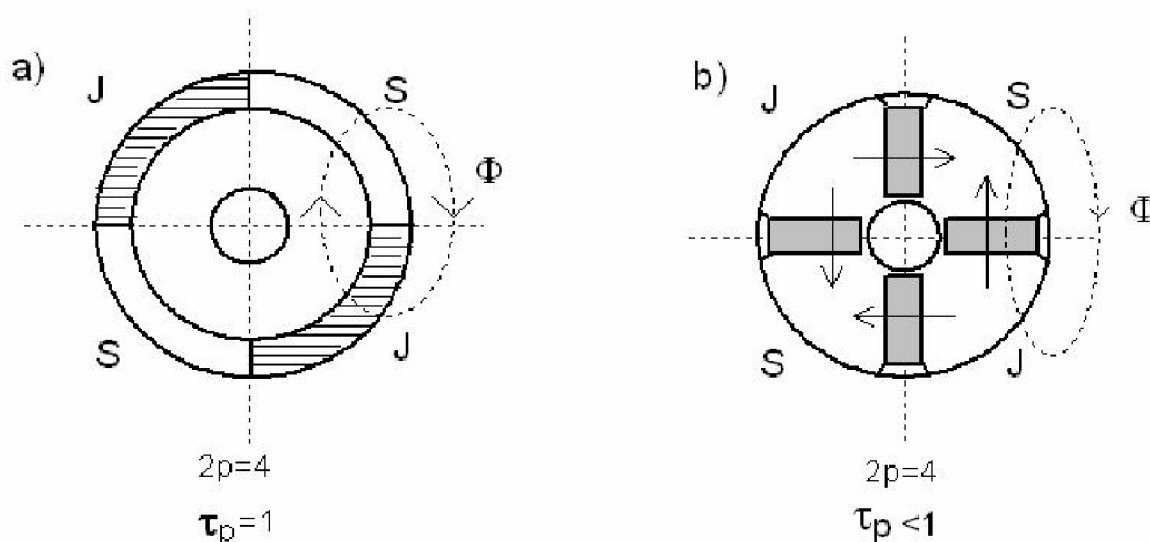
3 Elektricky komutované motory (EC motory)

V případě elektricky komutovaného motoru se téměř jedná o obrácený stejnosměrný motor. Proto se mu někdy říká bezkomutátorový stejnosměrný motor. Elektricky komutovaný motor má vinutí na statoru a magnety na rotoru. Funkce komutátoru je zde nahrazena tranzistorovým měničem, který dle polohy rotoru přepíná proud do jednotlivých statorových vinutí.

3.1 Konstrukce elektricky komutovaného motoru

Tento motor je tvořen státorem, který se podobá statoru třífázového asynchronního nebo synchronního stroje. V lištěném statoru je v drážkách uloženo třífázové vinutí. Statorové drážky bývají zešíkmeny o jednu drážkovou rozteč. Toto zešíkmení se provádí z důvodu reluktančního momentu.

Rotor bývá konstrukčně uspořádán s magnety na povrchu. Nedochozí ke koncentraci magnetického toku a magnetická indukce v mezeře je shodná s indukcí permanentních magnetů. Rotor může mít magnety vestavěné i uvnitř. Pak je magnetický tok koncentrován pólovými nástavci.



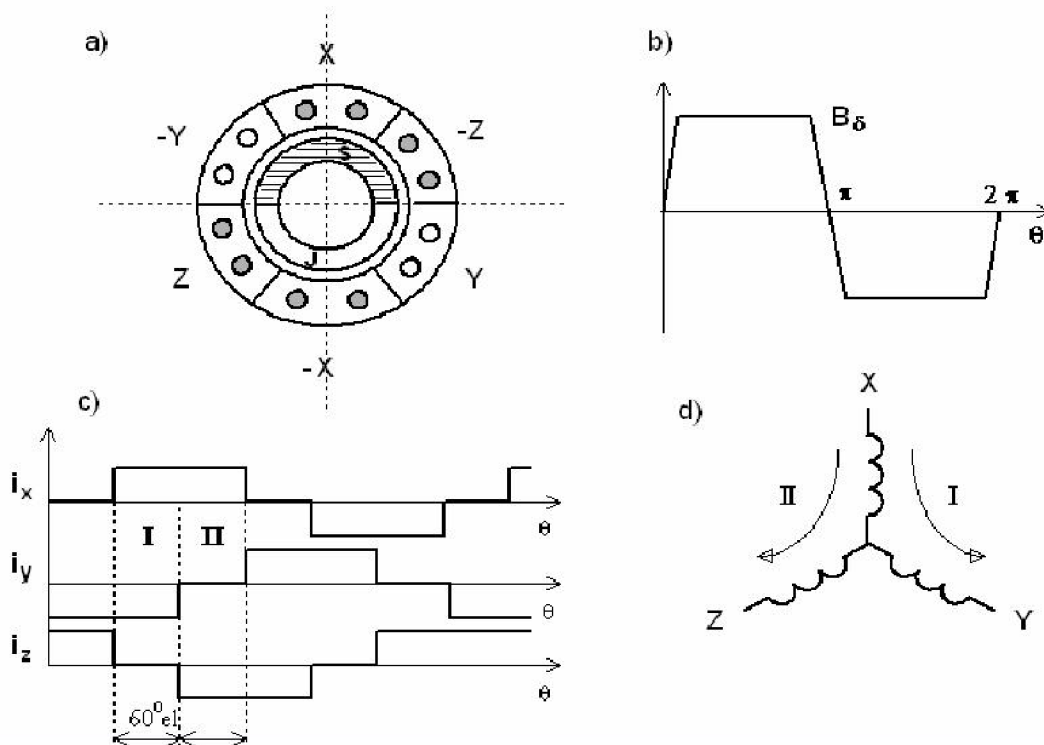
Obrázek 6 – Konstrukce rotoru s magnety na povrchu (a) vestavěnými magnety (b) [14]

3.2 Princip funkce elektricky komutovaného motoru

Pro komutaci statorového stejnosměrného proudu do následujícího fázového vinutí je zapotřebí snímat polohu rotoru. Toto snímání se provádí diskrétně vždy po 60 elektrických stupních. Tedy součástí motoru je snímač polohy rotoru s Hallovými sondami.

Pro otáčkovou zpětnou vazbu je ve stroji bezkartáčové komutované tachodynamo. Tachodynamo je elektricky komutovaný stroj s permanentními magnety na rotoru orientovanými souhlasně a s dostatečnou přesností a s úhlovou polohou magnetů vlastního motoru.

Na rozdíl od synchronního a asynchronního motoru, které jsou napájeny do všech tří fází současně sinusovým proudem, je elektronicky komutovaný motor vždy v jednom okamžiku napájen dvoufázově a tvar proudu je obdélníkový. Pro správnou funkci elektricky komutovaného motoru je nutná přesná montáž snímače polohy vzhledem k ose magnetů rotoru.



Obrázek 7 – Elektricky komutovaný motor: a) řez motorem, b) tvar indukce ve vzduchové mezeře, c) tvar proudu v závislosti na poloze rotoru, d) schéma vinutí statoru [14]

4 Permanentní magnety

Hmota je složena z částic, jako jsou protony, neutrony a elektrony, jejichž základem je spin. Spin každou tuto částici obohatí o magnetické pole. Proto by se dalo předpokládat, že každá hmota bude magnetická. Opak je ale pravdou.

V každém atomu a molekule je spin uspořádán podle Pauliho vylučovacího principu. Typ tohoto uspořádání však neplatí na velkou vzdálenost mezi atomy a molekulami. Bez tohoto vzdáleného uspořádání zde nevzniká síťové magnetické pole.

Permanentní magnety mají tu zvláštnost, že u nich vzdálené uspořádání existuje. Nejvyššího stupně uspořádání docílíme v magnetických doménách. Čím vyšší je uspořádanost v doméně, tím větší je výsledné magnetické pole.[5],[6]

Mezi nejčastěji používané permanentní magnety používané v elektrických strojích patří

- Alnico (Al, Ni, Co, Fe)
- Feritové, Barium Ferrite $\text{BaO}_x6\text{Fe}_2\text{O}_3$ a Strontium Ferrite $\text{SrO}_x6\text{O}_2\text{Fe}_3$
- Samarium-cobalt SmCo a Neodym-železo-bor NeFeB ze vzácných zemin

4.1 Magneticky tvrdé ferity

Patří mezi nejlevnější a také nejvíce používané permanentní magnety. Vyrábějí se cestou práškové metalurgie jako anizotropní nebo izotropní.

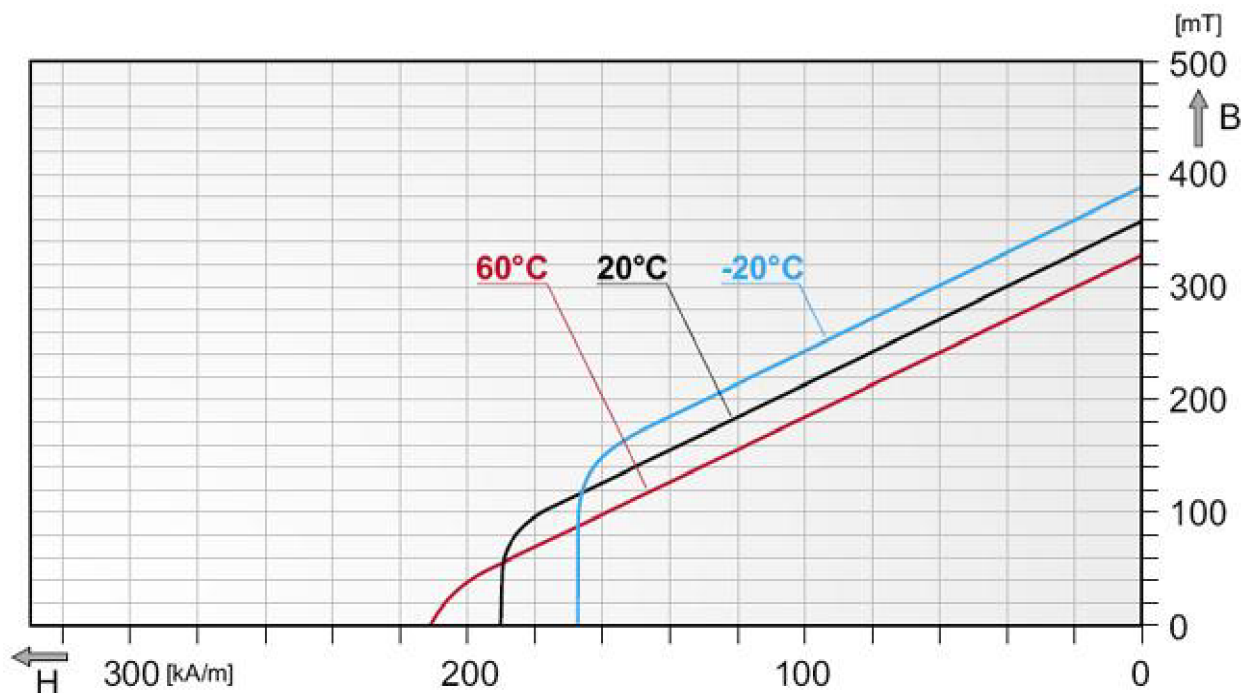
Anizotropní magnety se vyznačují dobrými magnetickými vlastnostmi pouze v jednom směru. Tomuto směru se říká přednostní osa magnetizace. Tyto magnety jsou vyráběny v magnetickém poli a tím je docílen prioritní směr magnetizace. Mají dvakrát vyšší hodnotu remanentní magnetické indukce než izotropní magnety. Prioritní směr magnetování je totožný se směrem orientace magnetizace.

Izotropní magnety se vyznačují tím, že mají ve všech směrech prakticky stejné magnetické vlastnosti. Jsou lisovány bez přítomnosti magnetického pole. Nemají přednostní osu magnetizace a mohou se magnetovat v libovolné ose. Jejich výhodou je lepší cenová dostupnost.

Magnetické vlastnosti feritů

Pracovní teplota feritových magnetů se pohybuje od -40°C až do 250°C . Pokud teplotně zatížíme anizotropní a izotropní feritové magnety, pak se změní jejich magnetické vlastnosti. Teplotní závislost koerzivní intenzity magnetického pole probíhá u feritových magnetů opačně než u magnetů ze vzácných zemin. Při rostoucí teplotě klesá remanence feritových magnetů a

koercitivní intenzita vzrůstá. Tato vlastnost způsobuje, že magnety s nízko položeným pracovním bodem mohou při nízkých teplotách trvale ztratit své magnetování. Magnety mohou ztratit své magnetické vlastnosti při zvýšení teploty nad hodnotu Curierovy teploty. Tato teplota se pohybuje u železa (770°C), Alnico (860°C), Samarium Cobalt (800°C), Ferit (450°C) a u niklu (360°C). Zahřejeme-li feromagnetickou látku nad hodnotu Curierovy teploty, přestane se přitahovat k magnetu.[8]



Obrázek 8 - Teplotní závislost magneticky tvrdých feritů [6]

4.2 Permanentní magnety ze vzácných zemin

V podstatě máme tři druhy magnetických materiálů ze vzácných zemin (Sm, Nd) a přechodového kovu (Co, Fe). Tyto materiály jsou založeny na intermetalických fázích SmCo_5 , SmCo_{17} , $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Permanentní magnety jsou podle velikosti, tvaru, tolerancí a počtu řezány buď z izostaticky lisovaných surových magnetů, popřípadě lisovány v příčném poli nebo v axiálním poli. Výrobní způsoby mají hlavní vliv na vlastnosti permanentních magnetů.

Vývoj permanentních magnetů ze vzácných zemin

Na rozdíl od běžných permanentních magnetů jsou tyto permanentní magnety podstatně výkonnější a základem je intermetalická sloučenina ze vzácných zemin (Samarium, Neodym) a přechodových kovů. Permanentní magnety na bázi SmCo_5 , SmCo_{17} byly doplněny vývojem na

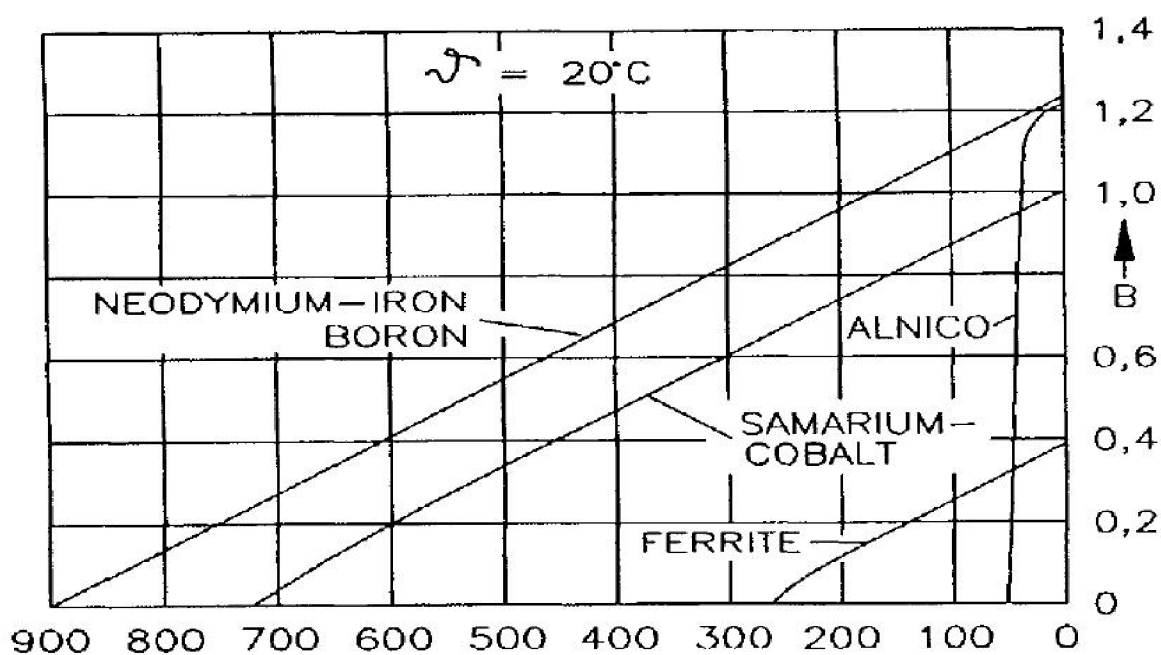
bázi NeFeB. Jejich hospodárnost a levná dosažitelnost patří mezi výhody. Nevýhodou je nižší Curierova teplota a vyšší teplotní koeficient.

Chemické vlastnosti

Magnety ze vzácných zemin jsou považovány za kovové materiály a mají podobné vlastnosti. Typickou vlastností je jejich lesk bezprostředně po opracování. K oxidaci magnetů dochází ve vlhké atmosféře SmCo velmi málo. Magnety SmCo se vyznačují pouze nepatrnou oxidací povrchu a magnety NeFeB se velmi pomalu rozpouštějí.

4.3 Vlastnosti permanentních magnetů ALNICO

Největší výhodou Alnica je jeho velká remanentní magnetická indukce a nízký teplotní koeficient. Teplotní koeficient B_r se pohybuje okolo $-0,02\%$ a maximální pracovní teplota je 520°C . Tyto parametry umožňují velkou vzduchovou mezeru magnetické indukce při vysoké teplotě magnetu. Koercitivní síla je velmi malá a demagnetizační křivka je nelineární. Toto má za následek, že Alnico lze velmi snadno demagnetizovat. [13]



Obrázek 9 - Demagnetizační křivky pro různé permanentní magnety [13]

4.4 Přednostní osa orientace permanentních magnetů

Pro permanentní magnety je důležité si určit přednostní osu orientace. Permanentní magnety totiž dosahují nejlepších magnetických vlastností obvykle jen v jednom směru. Tento směr je nazýván přednostní osa orientace. Vytvoření přednostní osy orientace se docílí při výrobě, vystavíme-li material silnému magnetickému poli. Permanentní magnety dle osy orientace můžeme rozdělit do pěti skupin.[11]

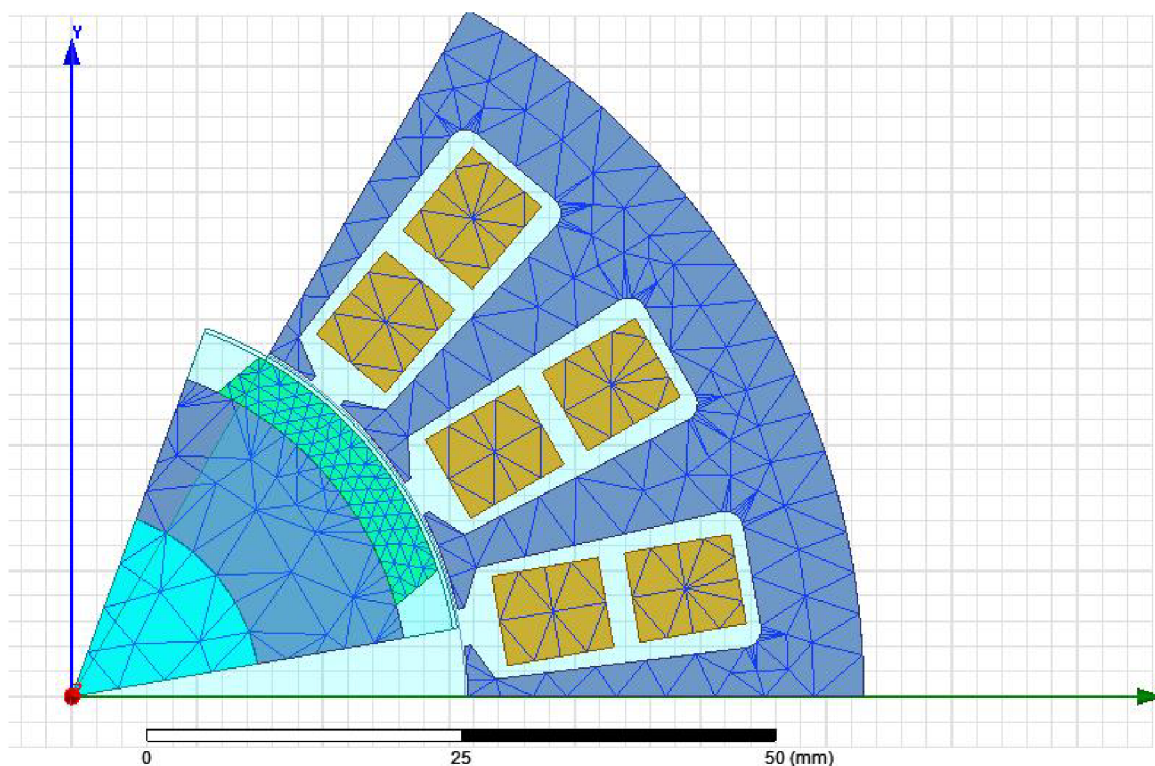
- a) **Izotropní permanentní magnety** – vyznačují se tím, že nemají žádnou přednostní osu orientace. Způsob magnetování je tedy libovolný.
- b) **Anizotropní permanentní magnety** – získávají svou přednostní osu orientace tím, že jsou lisovány v magnetickém poli. Mají dobré magnetické vlastnosti pouze v přednostní ose magnetizace a mohou být magnetovány pouze v této ose. Umožňují docílit vyššího magnetického toku než magnety izotropní. Jejich remanence je oproti izotropním dvojnásobná.
- c) **Permanentní magnety s axiální osou orientace** – používají se pro orientaci kruhových a válcových magnetů a hranolů přes výšku.
- d) **Permanentní magnety s diametrální osou orientace** – využití pro zvláštní případy. Kruhové či válcové permanentní magnety motorů nebo čerpadel. Přednostní osa orientace je kolmá k ose rotace (diametrální).
- e) **Permanentní magnety pólově orientované** – užití těchto trvalých magnetů je především u čerpadel, generátorů nebo v pohonech motorů. Remanence je oproti izotropním magnetům 1,5 až 2 násobná.

5 Ansoft Maxwell

Tento program od společnosti Ansys patří mezi přední simulační softwary, je vhodný pro simulaci elektromagnetických polí. Umožňuje provádět analýzu motorů, pohonů, transformátorů, senzorů a cívek ve 2D nebo 3D prostředí. Ansoft Maxwell je založen na metodě konečných prvků, pro řešení statických, frekvenčních domén nebo pro řešení časově proměnných elektromagnetických a elektrických polí. Maxwell poskytuje přesné řešení pro oblast parametrů jako je síla, kroutící moment, kapacita, indukčnost, odpor, impedance a je schopen zobrazit elektromagnetická pole. Velkou výhodou je, že program nevyžaduje složitá nastavení. Stačí zadat pouze geometrii, vlastnosti materiálů a požadovaný výkon. Po zadání základních nastavení program již sám vyhledává vhodná řešení problému. Tento program je vhodný pro inženýrskou práci a je velkým pomocníkem při řešení elektromagnetických problémů.[9]

5.1 Metoda konečných prvků

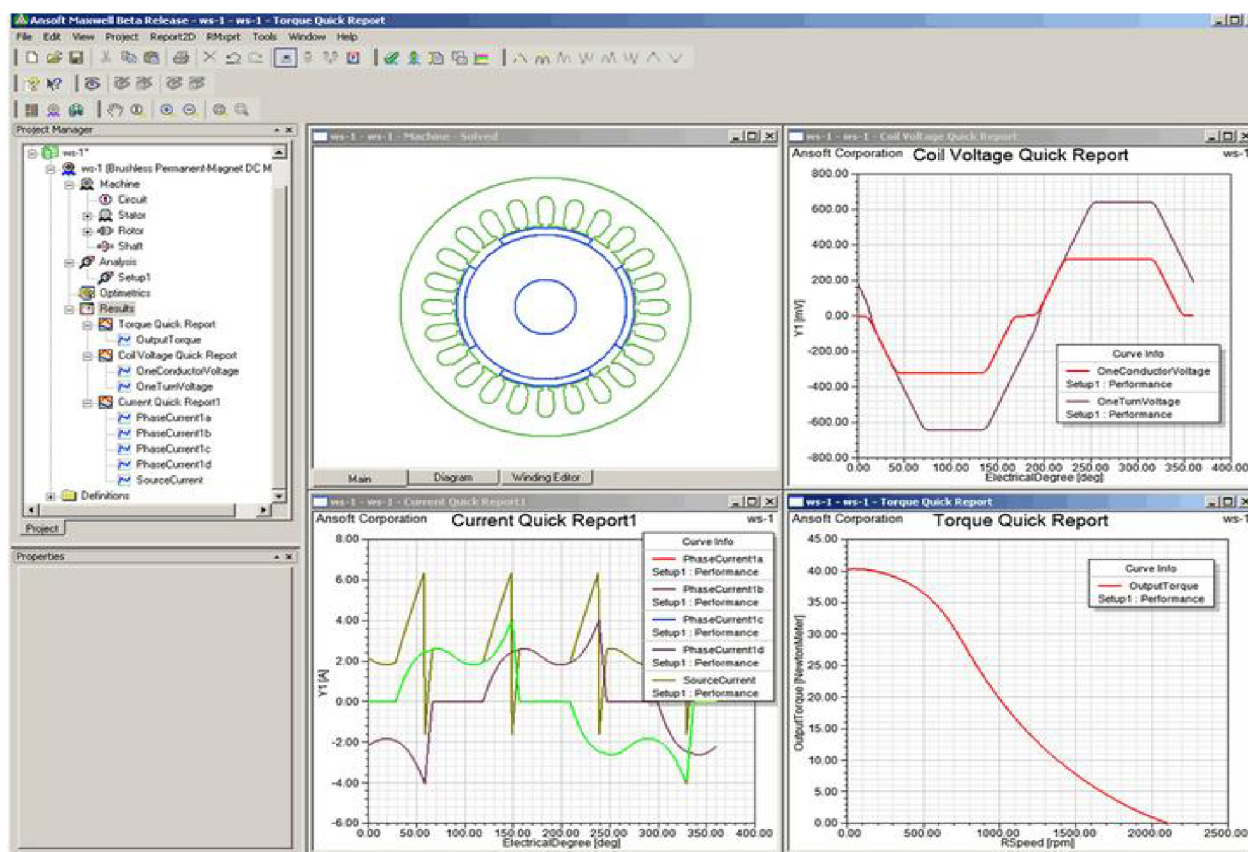
Tato metoda slouží k simulaci průběhů napětí, výpočtu deformací, frekvencí, proudění tepla a elektromagnetických jevů na námi vytvořeném modelu. Metoda konečných prvků spočívá v úpravě jednotlivých elementů do určitého počtu prvků. Jednotlivé parametry jsou určovány v uzlových bodech. Tuto metodu užíváme především ke kontrole navržených zařízení. Rovněž je můžeme užít pro zjištění kritického místa konstrukce.



Obrázek 10 – Příklad konečnoprvkové sítě v programu Ansoft Maxwell

5.2 Ansoft RMXprt design

Toto prostředí programu Ansoft Maxwell urychluje navrhování a optimalizaci elektrických točivých strojů. Prostředí tohoto programu umožňuje výběr ze seznamu motorů, které má přednastavené. Je zde možno vytvořit model podle vlastních představ, kde uživatel nastavuje pouze rozměry stroje, přidělí jednotlivým částem materiály, provádí nastavení drážek, provede nastavení vinutí a další základní kroky pro nastavení svého stroje. V průběhu nastavování si uživatel může kontrolovat, zda provádí nastavení správně užitím příkazu *validate*. Pokud má uživatel nastavené základní parametry, převádí se motor pomocí jednoduchého příkazu do prostředí Maxwell 2D nebo 3D, kde se provádí analýza stroje.



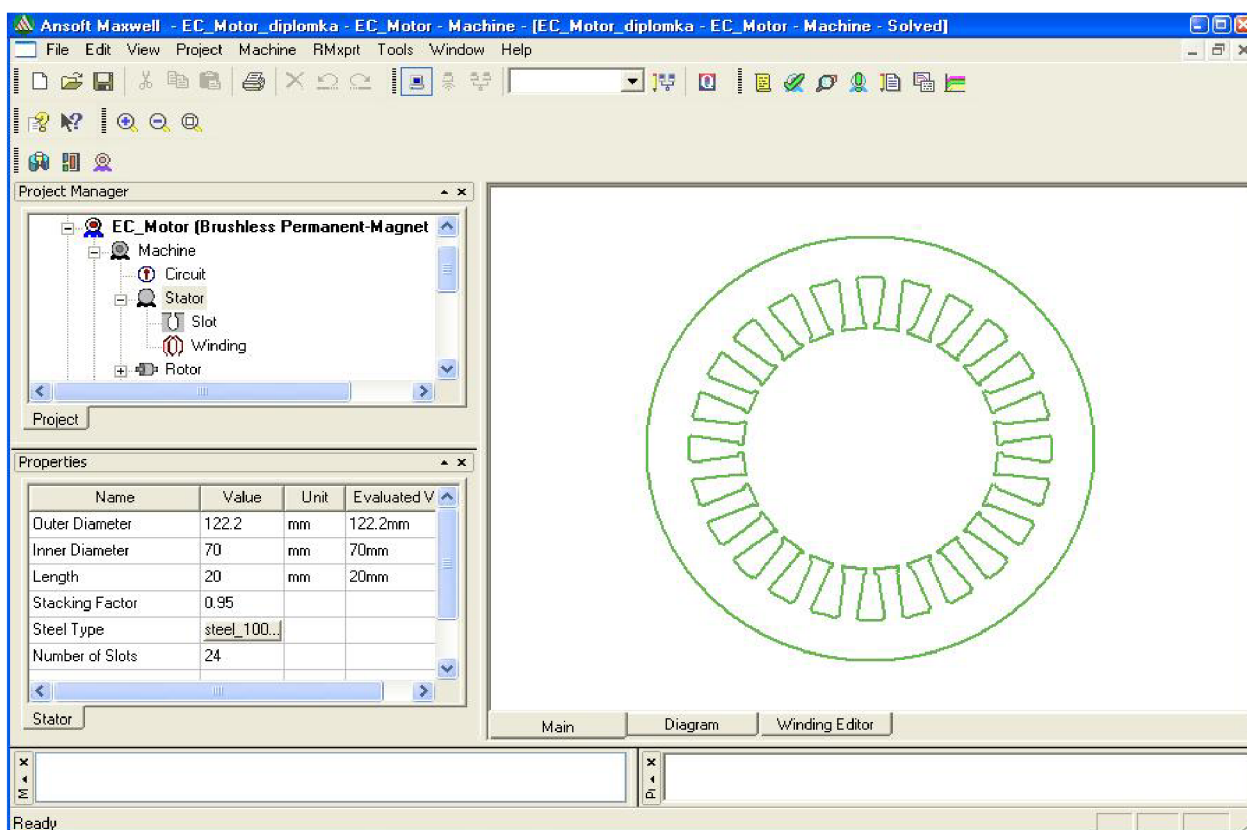
Obrázek 11 – Uživatelské prostředí programu Ansoft RMXprt

6 Postup práce při vytváření modelu v programu Ansoft Maxwell v prostředí Rmxprt Design

V první fázi po spuštění programu Ansoft Maxwell přejdu do prostředí RMxprt. Toto prostředí mi bude sloužit k vytvoření modelu elektricky komutovaného motoru s permanentními magnety. Pro svůj model vyberu ze seznamu motorů *Brushless Permanent-Magnet DC motor*.

6.1 Vytvoření statoru

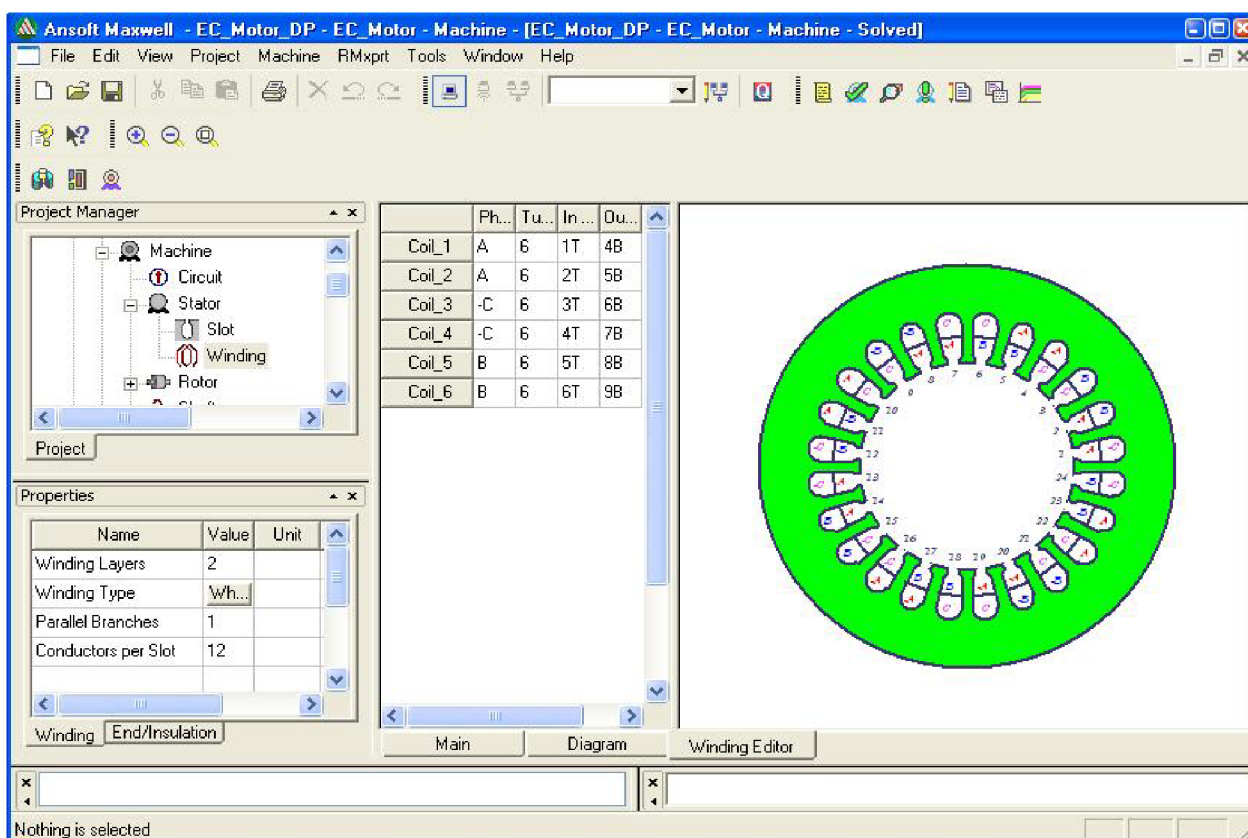
Při vytváření statoru v prostředí RMxprt se postupuje podle tabulky, kde se zadávají veškeré důležité parametry. Do okna *Outer Diameter* zadám vnější průměr statoru a do okna *Inner Diameter* vnitřní průměr statoru. Poté zadám ještě délku statoru *Length*. Důležité pro nastavení statoru je zadat, jaký materiál (*Steel Type*) statoru přidělím. V této tabulce ještě zbývá zadat počet drážek statoru *Number of Slots* a jaký bude použit typ drážek *Slot Type*. Toto prostředí umožňuje při tvorbě drážek využít buď toho, že nám program sám vytvoří rozměry drážek (*Auto Design*), a nebo si rozměry drážek můžeme nastavit sami.



Obrázek 12 – Tvorba statoru v prostředí RMxprt

6.2 Vytvoření vinutí

Pokud mám vytvořený stator, musím nastavit vinutí tohoto statoru. K tvorbě vinutí využívám opět tabulky, která mě navádí, jaké parametry mám zadat. Nejdříve nastavím počet vrstev vinutí na jednu drážku. Můj model motoru má dvě vrstvy na jednu drážku *Winding Layers*. Následně vyberu druh vinutí *Winding Type*. Nyní je potřeba zadat počet paralelních větví *Parallel Branches* a počet vodičů na drážku *Conductors per Slot*. Podle tabulky je dále vidět, že musím zadat ještě počet drátů na vodič *Number of Strands* a velikost drátu jaký bude použit na vinutí *Wire Size*. Poslední věc, kterou pro vytvoření vinutí musím zadat, je *Coil Pitch*. Tím nastavím, kde mi bude jednotlivé vinutí fází vstupovat a vystupovat.

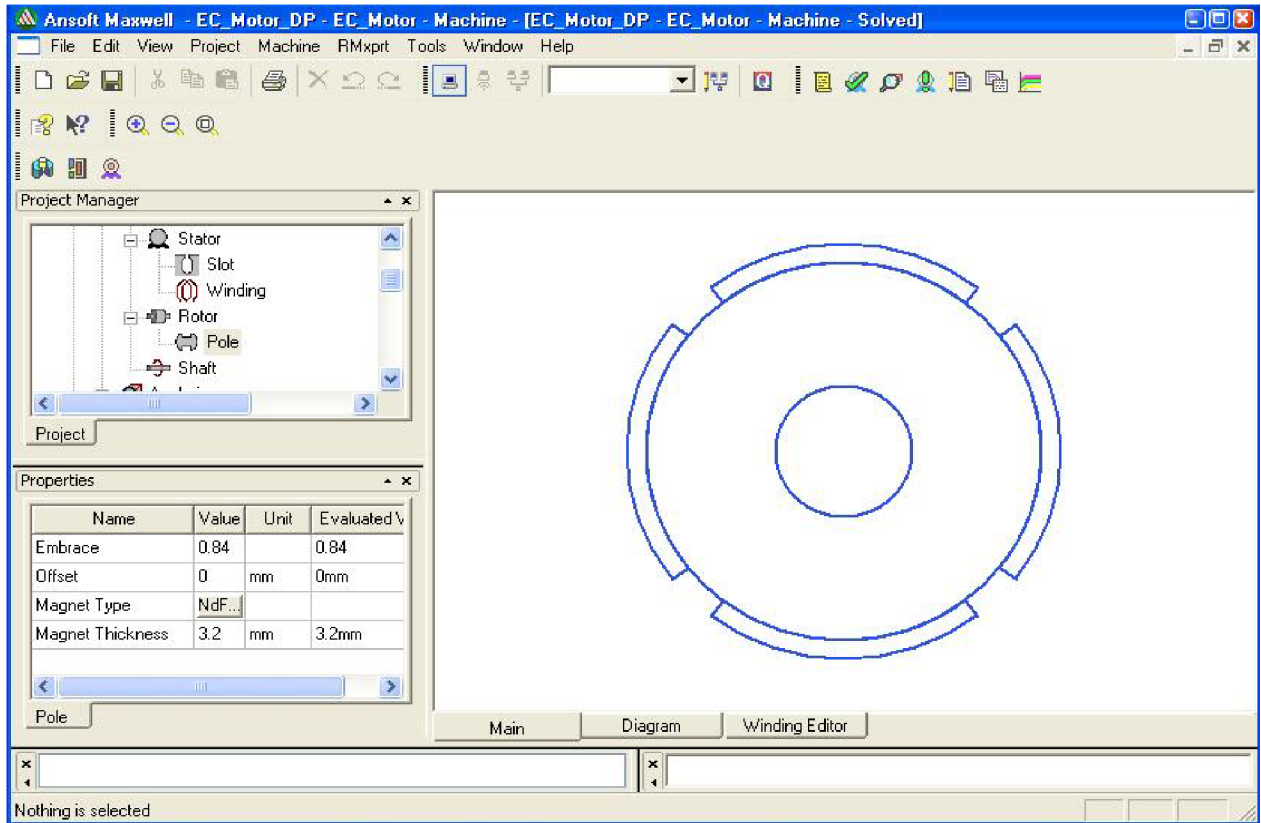


Obrázek 13 – Tvorba vinutí v prostředí RMxprt

6.3 Vytvoření rotoru

Při vytváření rotoru stejnosměrného stroje postupuji podobně jako u tvorby statoru. Opět zadám vnější průměr rotoru *Outer Diameter* a vnitřní průměr rotoru *Inner Diameter*. Dále nastavím délku rotoru *Lenght*. Po přiřazení materiálu, který rotor bude mít *Steel Typ*, následně nastavím typ pólů *Pole Type*. V mém případě má motor 4 póly. Jednotlivým pólům musím přiřadit materiál (permanentní magnet NdFe30) a zadám rozměr magnetů *Magnet Thickness*. Poté přidělím motoru hřídel a nastavím vstupní parametry elektricky komutovaného motoru

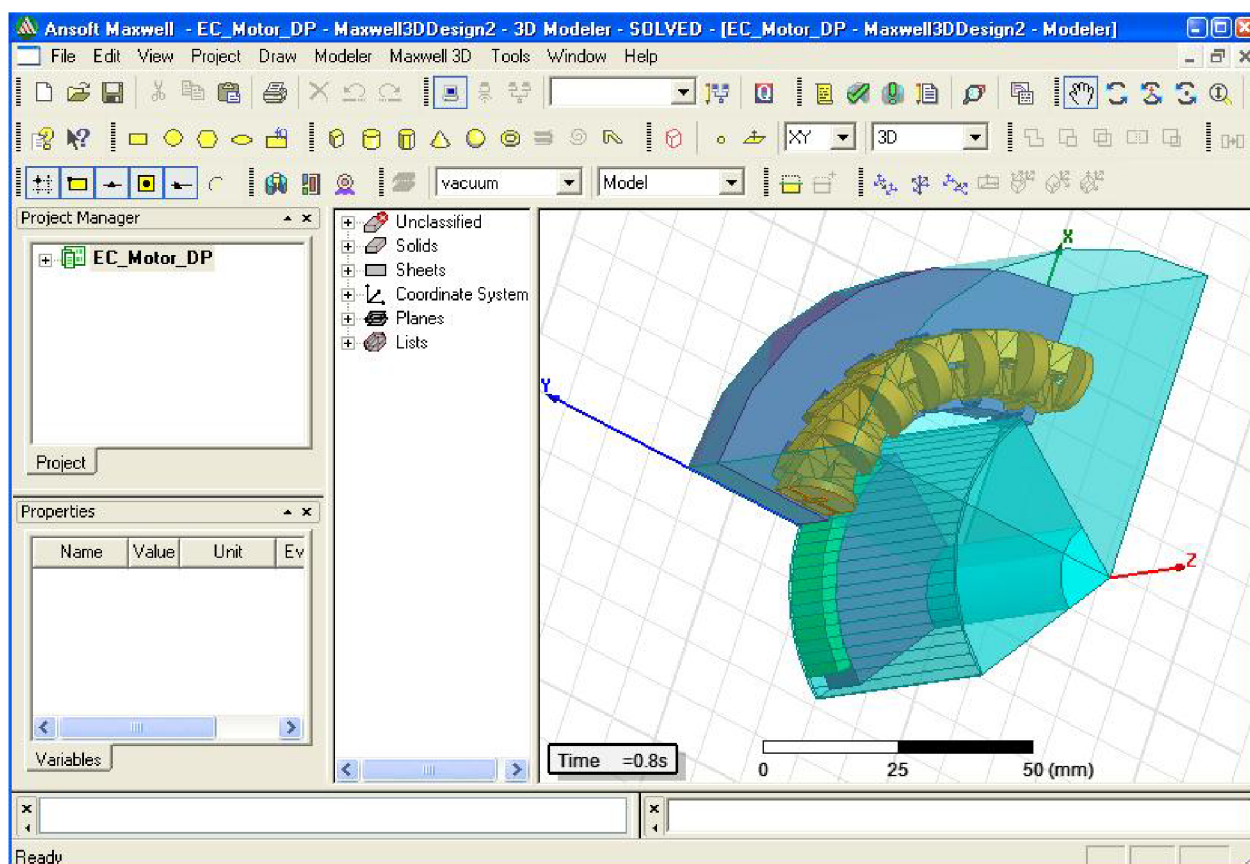
s permanentními magnety. Nyní stačí pomocí příkazu *Validate* zkontrolovat, zda mám nastavené všechny parametry a můžu přejít do 3D Maxwell.



Obrázek 14 – Tvorba pólů v prostředí RMXprt

7 Postup práce při vytváření analýzy v programu Ansoft Maxwell v prostředí 3D Maxwell design

Po převedení elektricky komutovaného motoru s permanentními magnety z prostředí RMXprt Design do prostředí 3D Maxwell design postupují následovně. Aby byla analýza správně nastavena, musím zadat proudy do jednotlivých fází. Kliknutím na příkaz *Excitations* uvedu hodnoty proudu do jednotlivých fází. Analyzovaný motor má dvouvrstvé vinutí. Každá vrstva obsahuje 6 vodičů. Dále vyberu typ analýzy (*Transient*). Aby bylo nastavení kompletní, musím ještě zadat příkaz *Set Eddy Effects*. Pomocí tohoto příkazu vyberu všechny vinutí, se kterými chci pracovat, protože musíme uvažovat vířivé proudy, které se tu objeví. Pomocí příkazu *Validate* si zkontroluji, zda mám provedená všechna důležitá nastavení. Poté již stačí vybrat, jaké veličiny chci analyzovat v mém případě, to je rozložení magnetické indukce *Mag_B* a *B_Vector*. Nyní již stačí provést příkaz *Analyze All* a program provede analýzu.

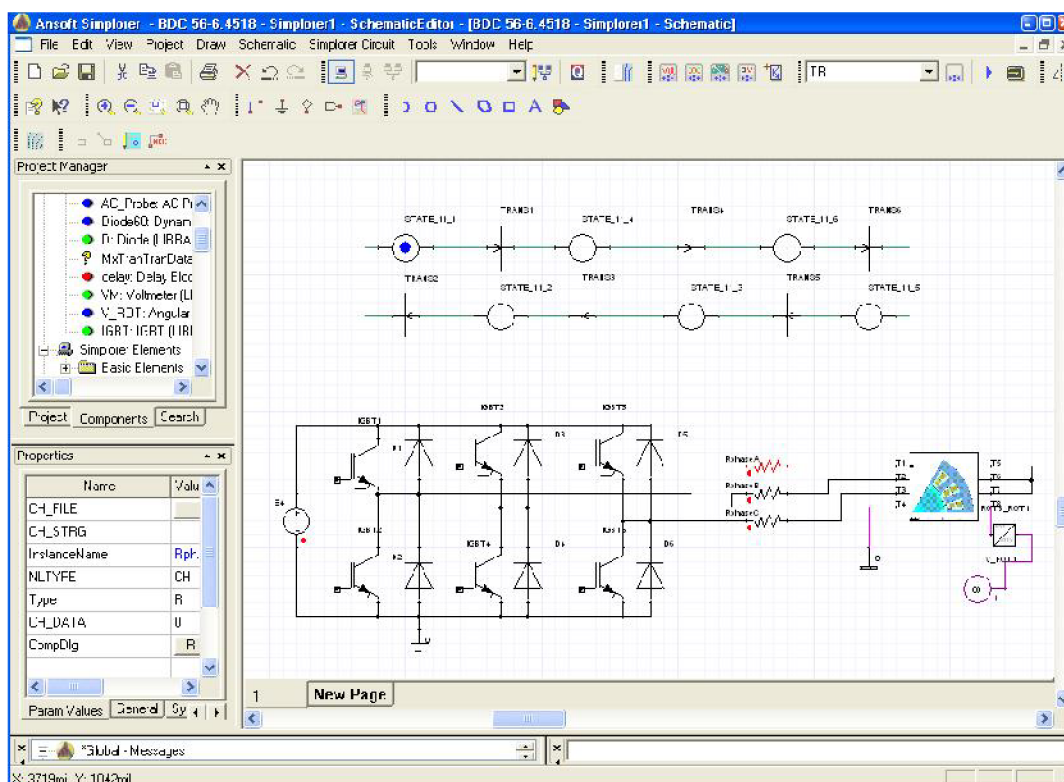


Obrázek 15 – Analyzovaný motor v prostředí 3D Maxwell

8 Postup práce při vytváření simulace spínání EC motoru pomocí Ansoft Simplorer

Nejprve si musím vytvořit měnič, který mi bude spínat EC motor. Tento měnič je napájen stejnosměrným napětím 24V. Měnič obsahuje šest tranzistorů IGBT a šest diod. Tento měnič je připojen na model EC motoru exportovaný z programu Ansoft Maxwell a na EC motor je připojena zátěž. V neposlední řadě si musím vytvořit model spínání jednotlivých tranzistorů.

Pro výběr jednotlivých prvků obvodu si v okně *Project manager* vyberu *Components*. Jednotlivé prvky, které chci použít, přenesu na kreslicí plochu tažením myši. Po vytvoření schématu nakreslím obvod pro spínání jednotlivých tranzistorů. Musím to provést tak, aby právě v jednom okamžiku byly sepnuty jen dvě fáze obvodu. Pomocí prvků *State* a *Trans*, nasimuluji obvod pro spínání tranzistorů. Do prvků *Trans* zadám podmínky pro sepnutí a do prvků *State* zadám prvky, které chci spínat v mém případě tranzistory IGBT. Pomocí prvku *V_ROT* nasimuluji zátěž EC motoru. Dále musím ještě zadat odpory jednotlivých vinutí. Prvkem *Rezistor* vytvořím odpory jednotlivých vinutí. Když mám vytvořené schéma, exportuji si model z programu Ansoft Maxwell 2D Design. Toto provedu tak, že příkazem *Simplorer Circuit – SubCircuit - Maxwell Components – Add Transient Cosimulation* nahraji vytvořený model v Ansoftu do prostředí Simploreru.

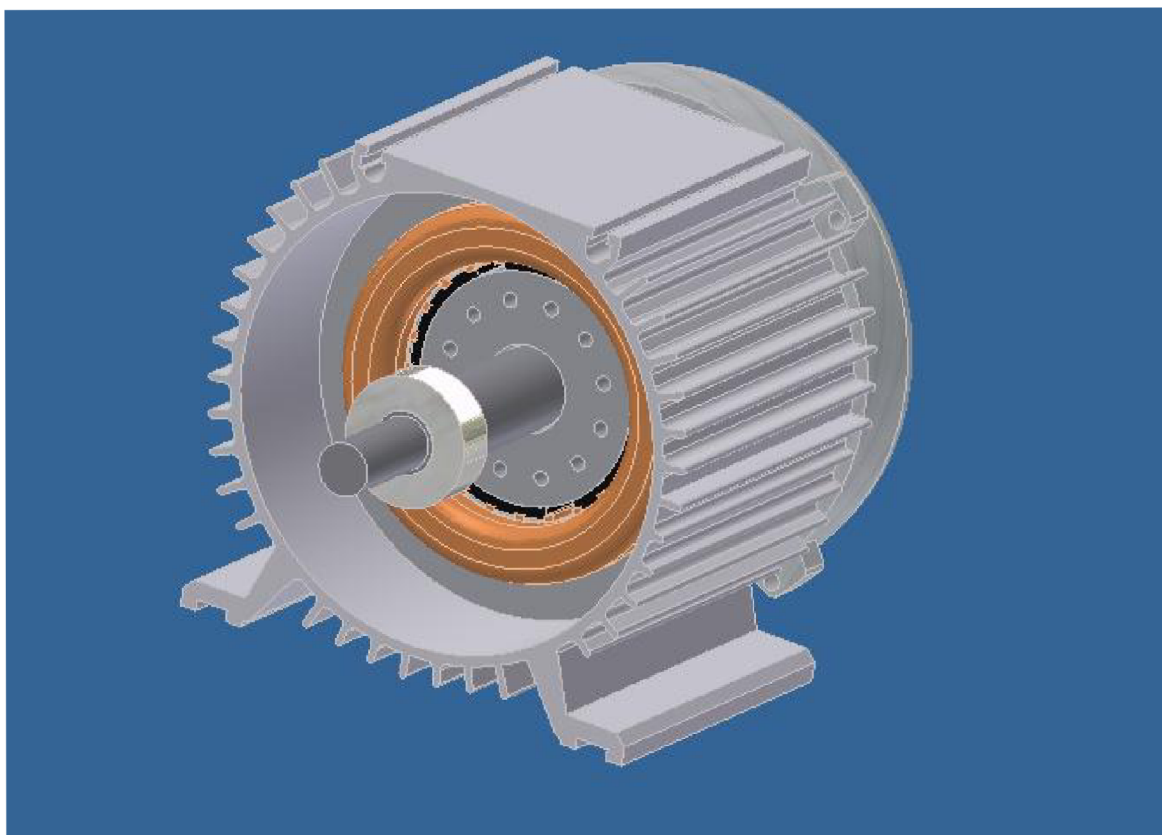


Obrázek 16 – Model spínání EC motoru v prostředí Ansoft Simplorer

9 Analýza magnetického pole EC motoru Atas Náchod pomocí Ansoft Maxwell 3D Design

9.1 Parametry analyzovaného stroje

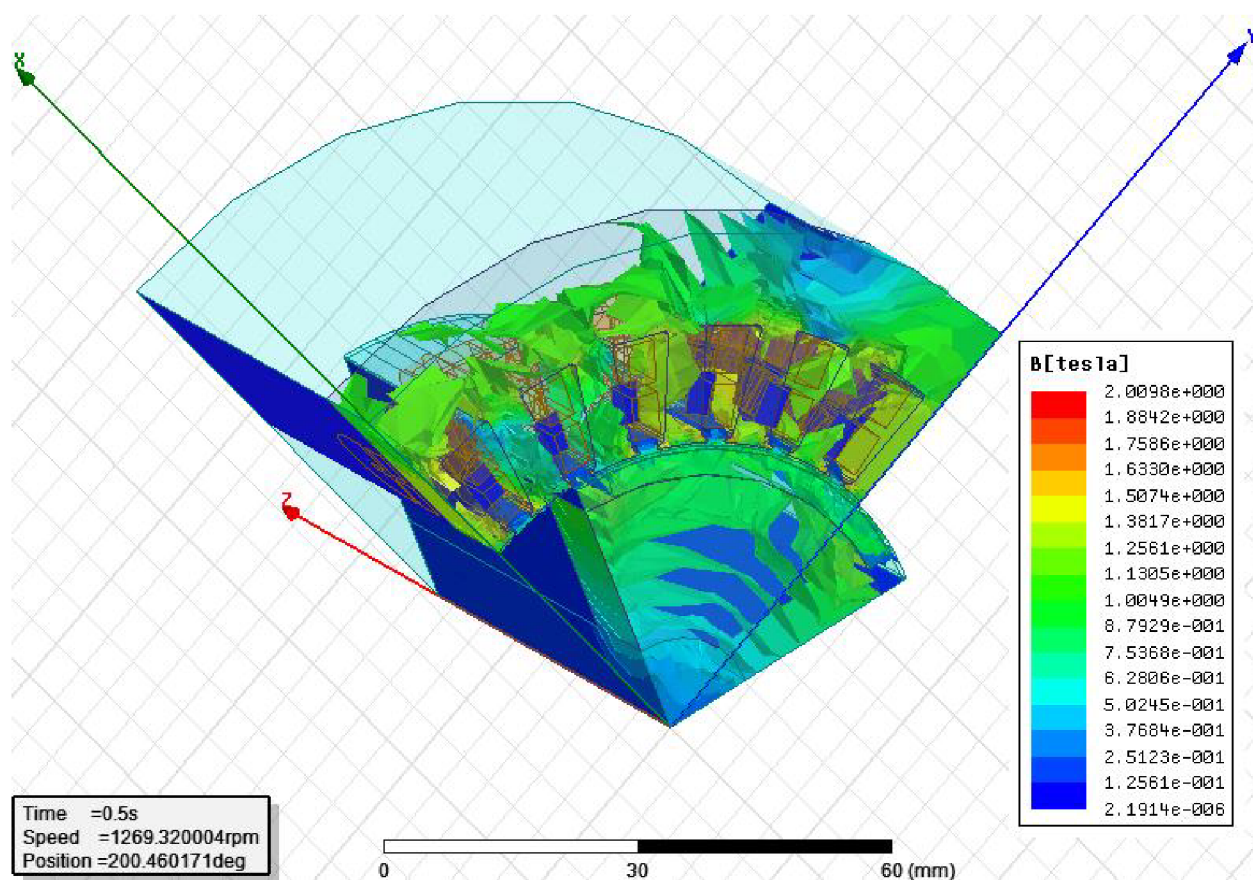
- Jmenovité napětí: 24V
- Jmenovitý proud: 25A
- Jmenovitý moment: 1,6N.m
- Počet pólů: 4
- Počet drážek na pól a fázi: 2
- Jmenovité otáčky: 3600min⁻¹
- Permanentní magnety: NdFe30
- Materiál statoru: ocel
- Materiál rotoru: ocel
- Materiál vinutí: měď



Obrázek 17 – Model EC motoru (Atas Náchod) v programu Autodesk Inventor Profesional

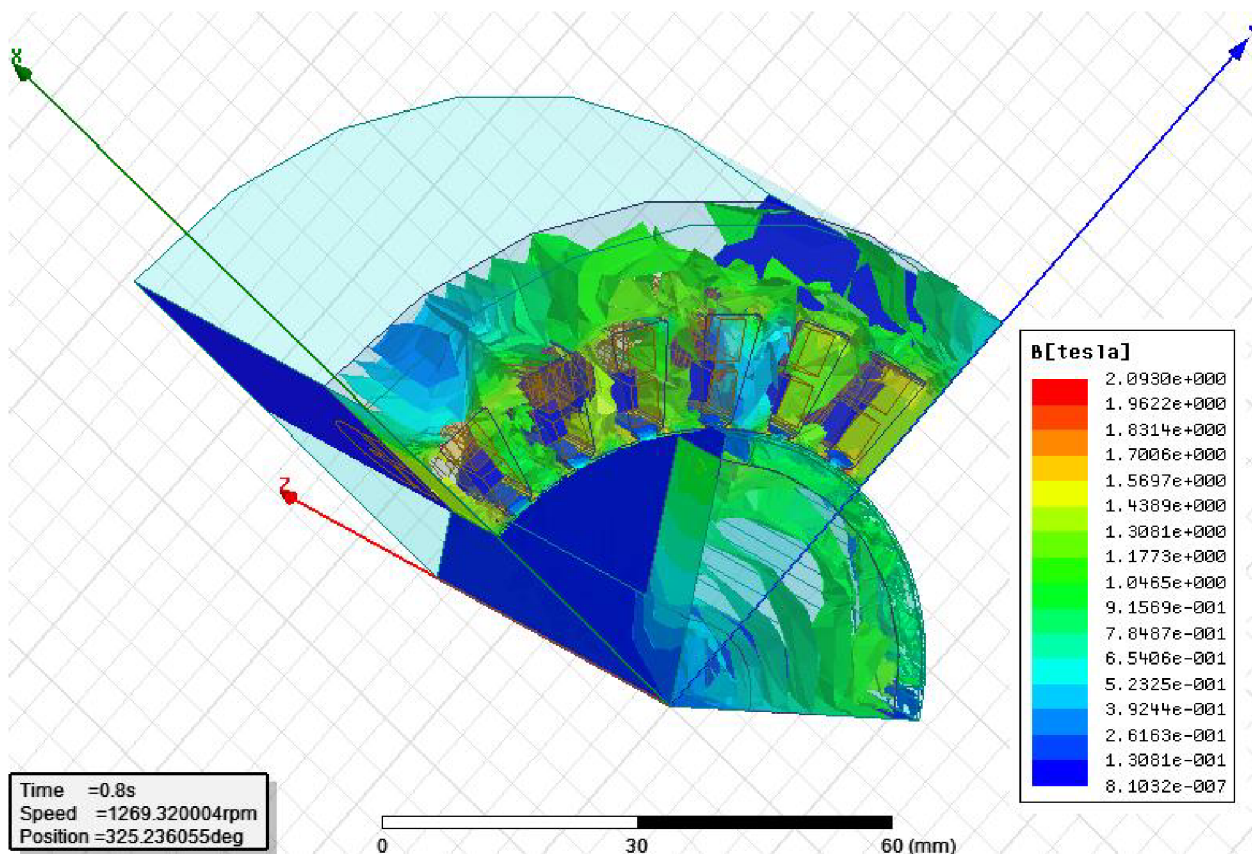
9.2 Rozložení magnetické indukce v elektricky komutovaném motoru (Atas Náchod)

Po provedení analýzy elektricky komutovaného stroje s permanentními magnety v programu Ansoft Maxwell 3D mi program vypočetl hodnoty magnetické indukce a zobrazil rozložení magnetické indukce uvnitř elektricky komutovaného motoru. Tuto analýzu jsem provedl pro čas 0s až 1s (krok 0.1s).

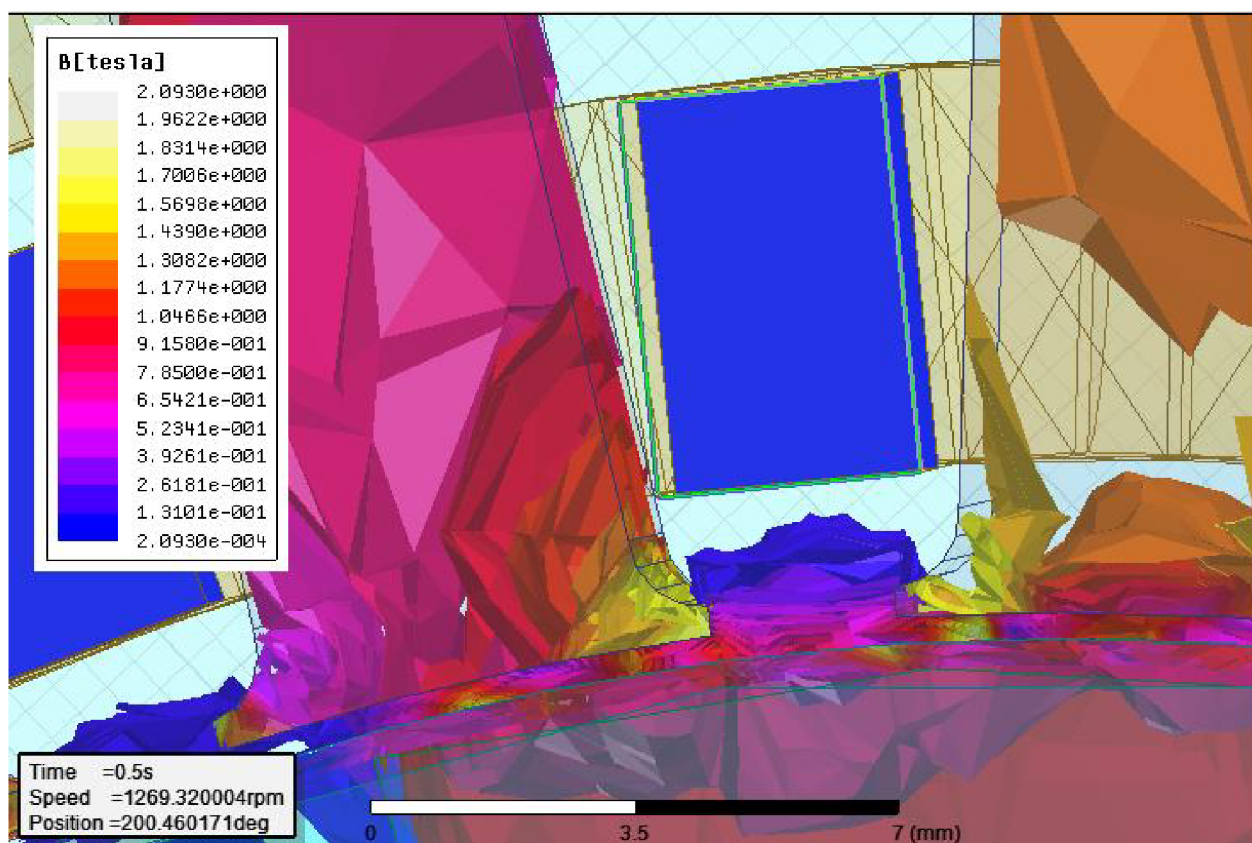


Obrázek 18 – Analyzovaný elektricky komutovaný motor v čase $t=0.5s$

Je patrné, že magnetická indukce má největší hodnotu v místě nejslabší části materiálu v oblasti zubu drážky. Tato hodnota byla 2,0098T v čase $t=0,5s$. O velikosti magnetické indukce nerozhoduje jenom tloušťka materiálu, ale také typ použitého magnetu a rozměry magnetu. Na velikost magnetické indukce má také vliv typ drážky, která je použita.

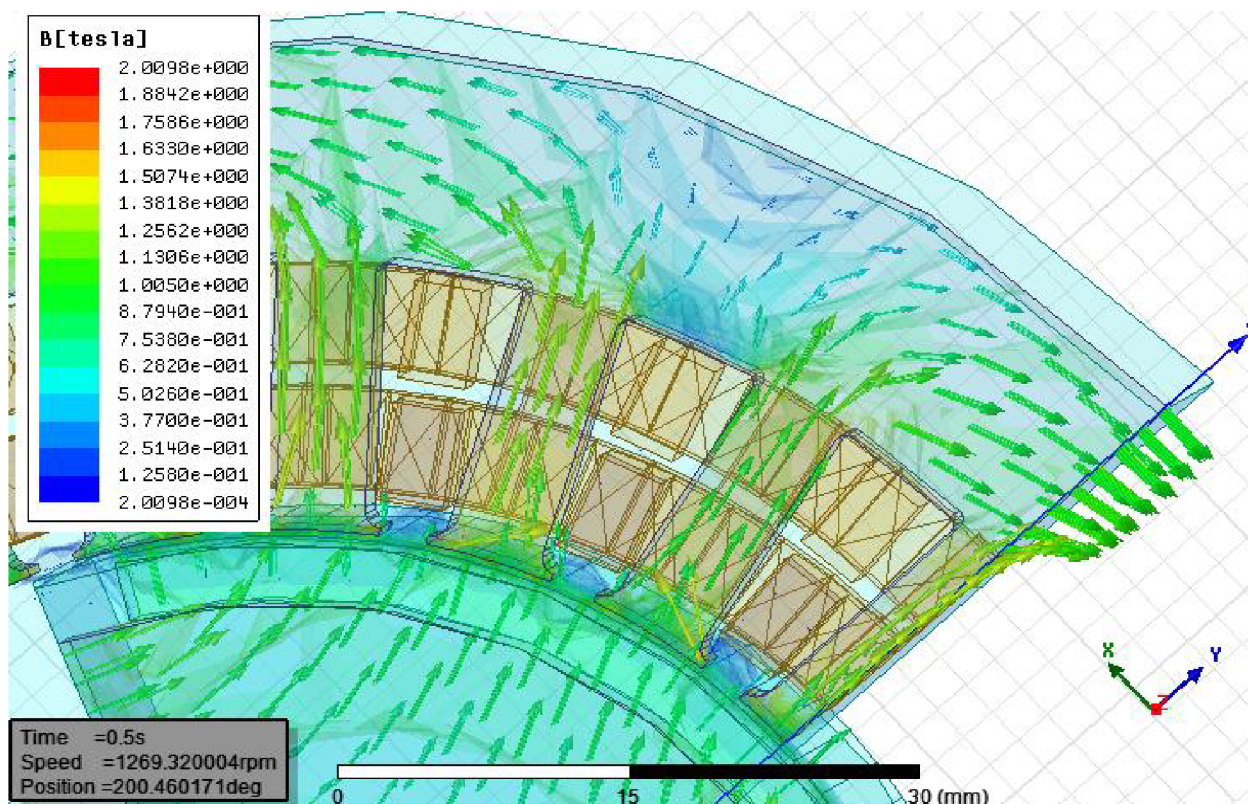


Obrázek 19 – Analyzovaný elektricky komutovaný motor v čase $t=0.8s$



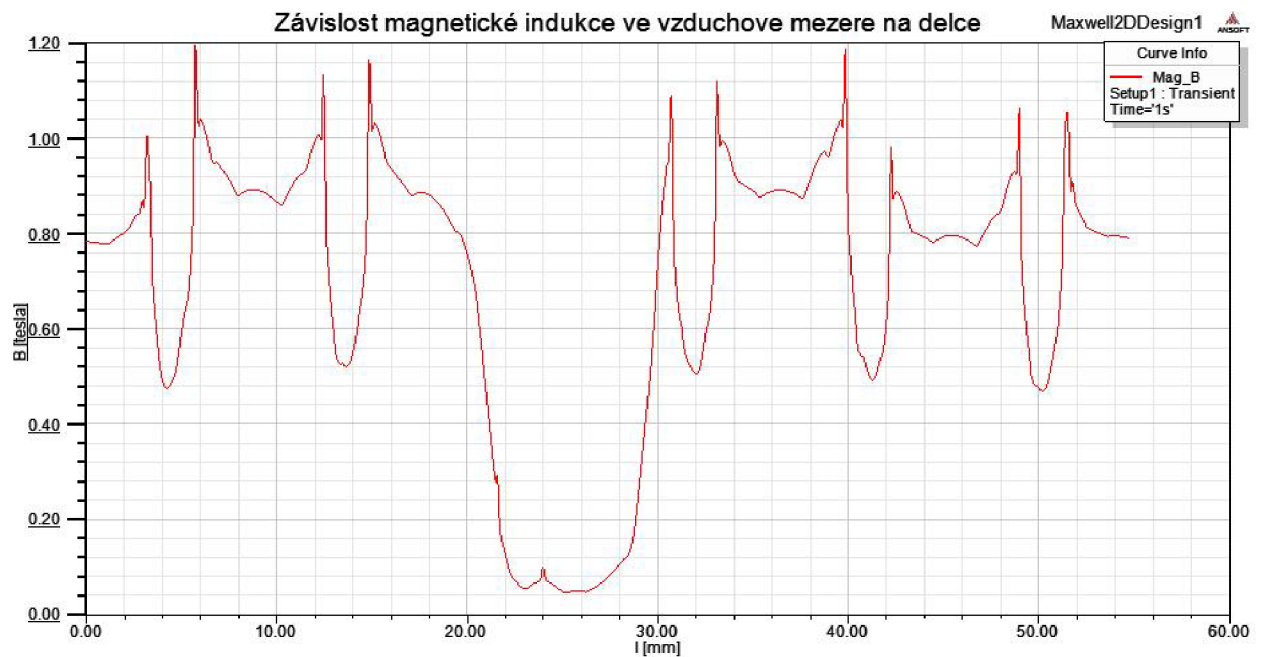
Obrázek 20 – Detail výskytu nejvyšších hodnot magnetické indukce v čase $t=0.5s$

9.3 Vektorové rozložení směru a velikosti indukčních čar u elektricky komutovaného motoru (Atas Náchod)



Obrázek 21 – Velikost a směr indukčních čar u elektricky komutovaného motoru v čase $t=0.5s$

Velikost a směr indukčních čar určuje typ magnetu a materiál, který se použije pro konstrukci statoru a rotoru. Pro tento model byla použita *Steel 1008* jak pro rotor tak stator a permanentní magnety *NdFe30*. Z výsledků je patrné, že největší hodnoty velikosti indukčních čar jsou podobně jako u zobrazení velikosti magnetické indukce v oblasti nejtenčí části zubu drážky. Tato hodnota je okolo 2.0098T. Nejmenší hodnoty se objevují na samém kraji statoru a směrem ke středu rotoru.

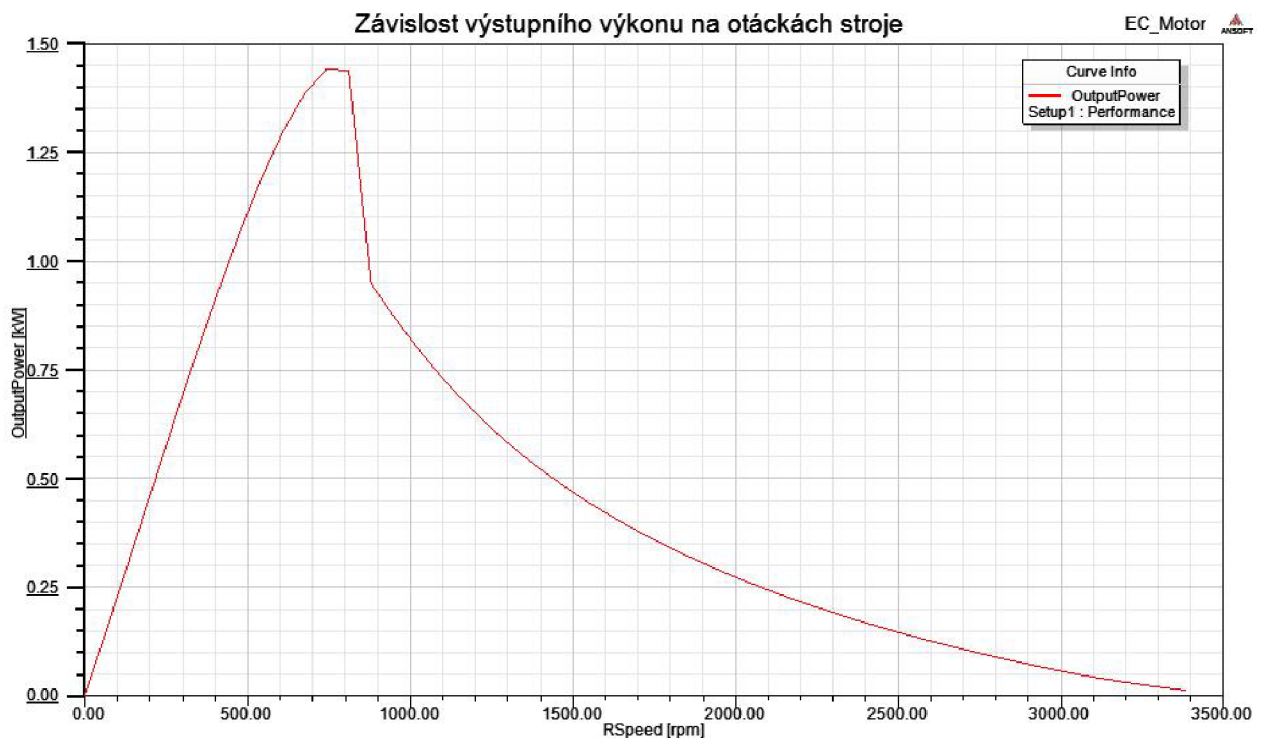


Obrázek 22 – Závislost magnetické indukce ve vzduchové mezeře na délce v čase $t=0.5s$

Z grafu pro magnetickou indukci ve vzduchové mezeře je patrné, že hodnoty magnetické indukce vždy poklesnou v oblasti drážky. Tento jev je dán tím, že magnetický indukční tok se nám vždy uzavírá přes materiál. Tudiž v místě, kde žádný materiál není, tedy v oblasti drážek motoru je hodnota magnetické indukce nejmenší.

9.4 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt

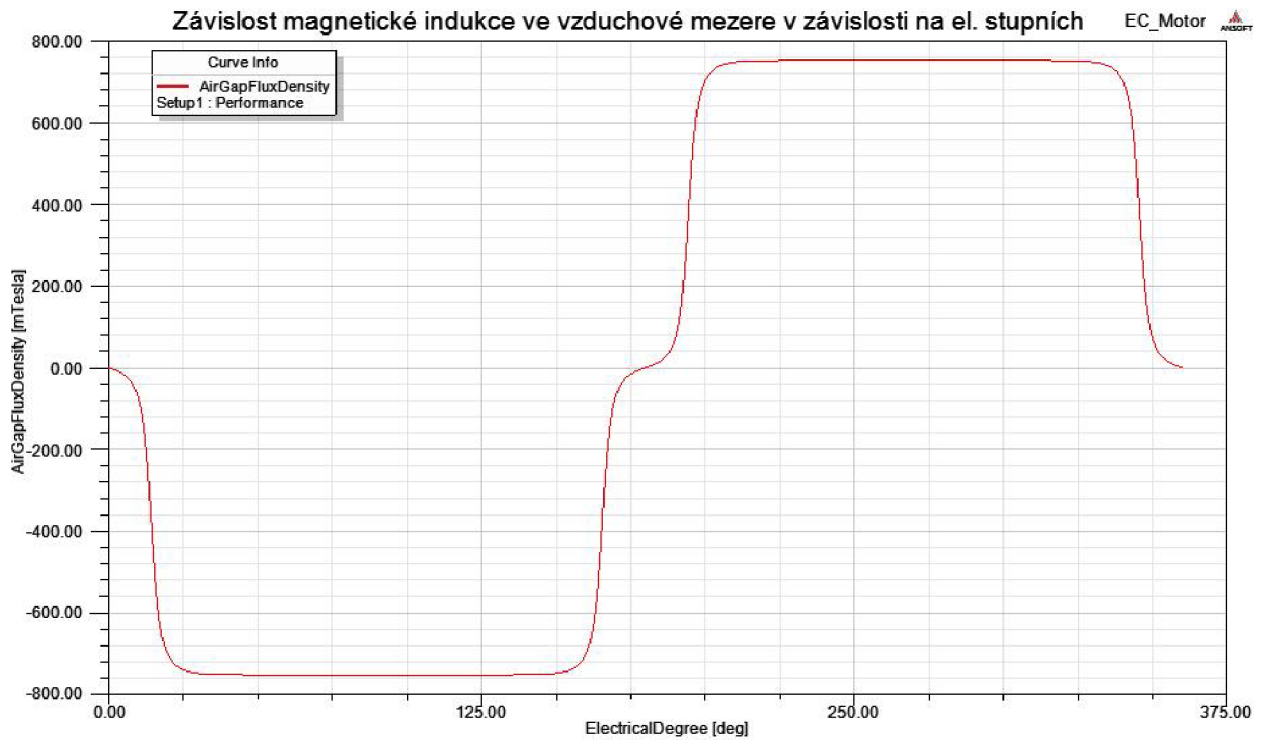
Po provedení analýzy v prostředí Rmxprt si můžeme zobrazit grafické závislosti jednotlivých veličin. Toto prostředí nám může usnadnit řešení konstrukce motoru, abychom nemuseli řešit složité výpočty a tudíž nám velmi usnadní práci. Například si zde můžeme ukázat, jaký bude výstupní výkon analyzovaného motoru v závislosti na otáčkách.



Obrázek 23 – Závislost výstupního výkonu EC motoru na otáčkách stroje

Ze závislosti výstupního výkonu na otáčkách stroje je patrné, že největší výkon, který se zde objevuje je okolo 1,4kW v oblasti, kdy se otáčky pohybují okolo 800ot/min. Je patrné, že výkon nejprve takřka lineárně roste, a v okamžiku, kdy dosáhne otáček 800ot/min, začne exponenciálně klesat.

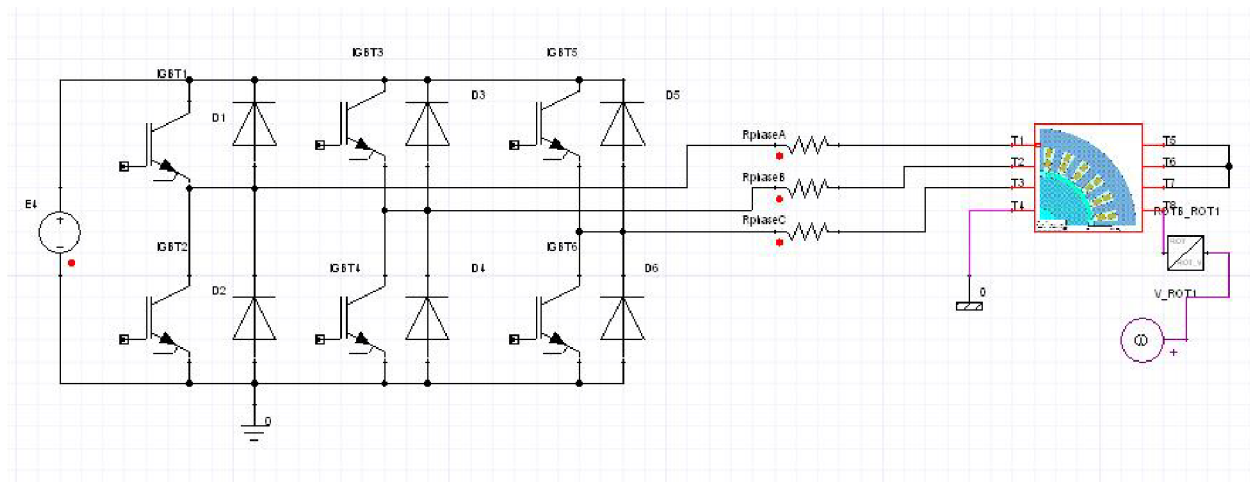
Dále si pomocí prostředí Rmxprt můžeme zobrazit například magnetickou indukci ve vzduchové mezeře v závislosti na elektrických stupních. Z této charakteristiky je vidět, že nejvyšší hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře je okolo 0,7mT v oblasti kolem 200° - 360° elektrických.



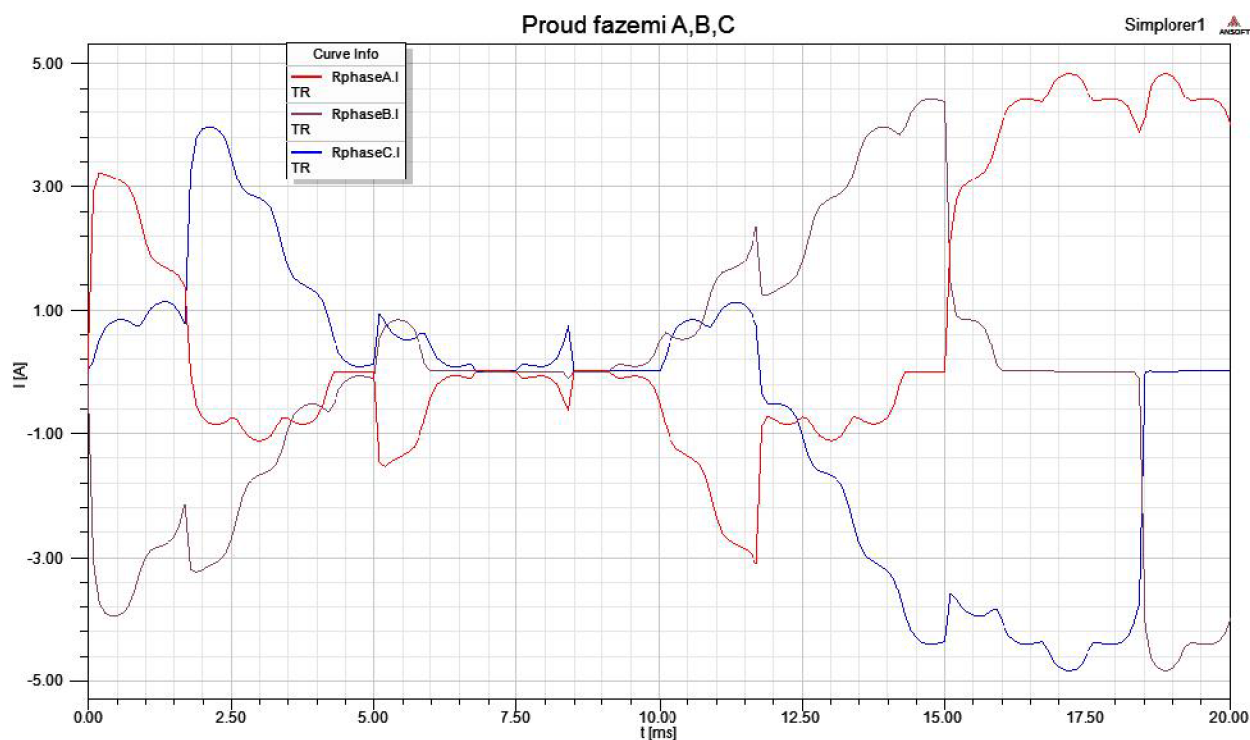
Obrázek 24 – Závislost magnetické indukce ve vzduchové mezeře v závislosti na elektrických stupních

9.5 Výsledky spínání EC motoru (Atas Náchod) pomocí programu Ansoft Simplorer

Pro spínání tohoto EC motoru byl použit měnič, který byl napájen 24V. Odporů jednotlivých vinutí motoru jsou 5Ω . Jako zátěž tohoto motoru byla použita $\omega=3000\text{rad/s}$. Čas simulace zatěžování motoru byl 20ms.

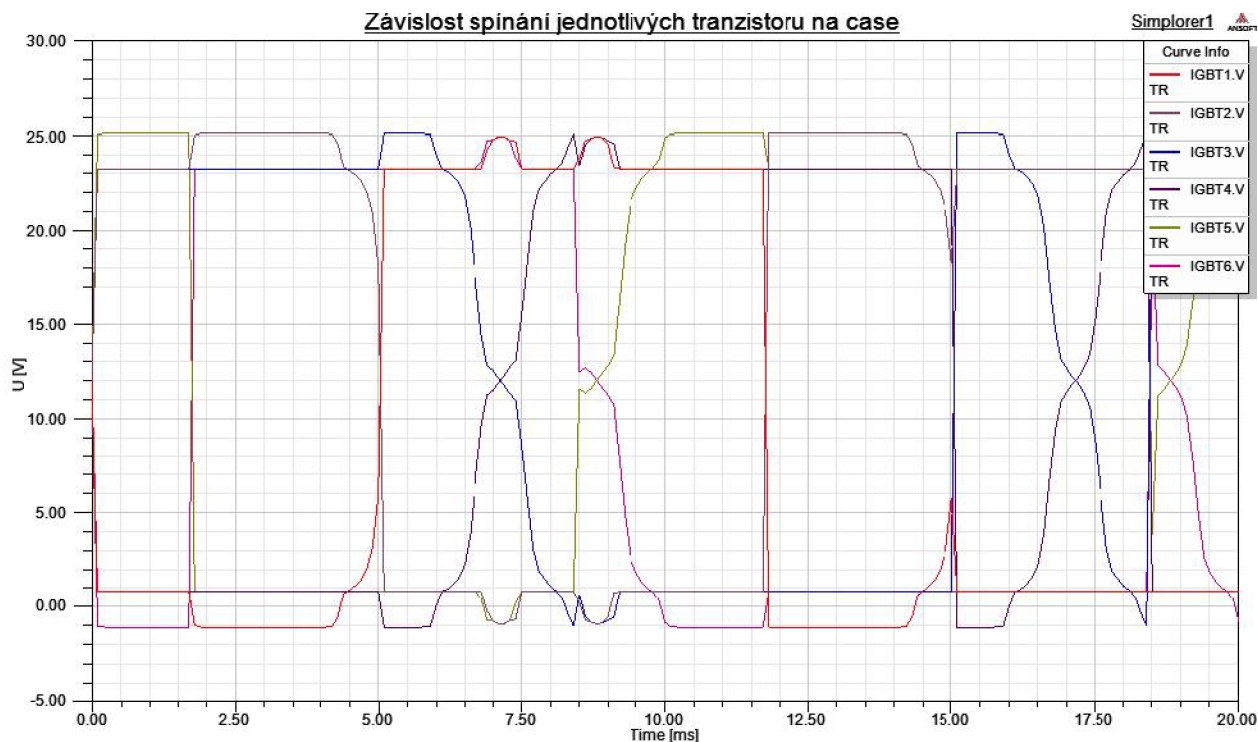


Obrázek 25 – Schéma zapojení v programu Simplorer



Obrázek 26 – Průběh proudu jednotlivými fázemi při zatěžování motoru

Po provedení analýzy EC motoru v programu Ansoft Simplorer je na grafické závislosti spínání jednotlivých tranzistorů IGBT. Vždy jsou sepnuty pouze dva tranzistory IGBT, protože v jednom okamžiku spínání EC motoru jsou sepnuty pouze dvě fáze. Úhel spínání je 60° elektrických.

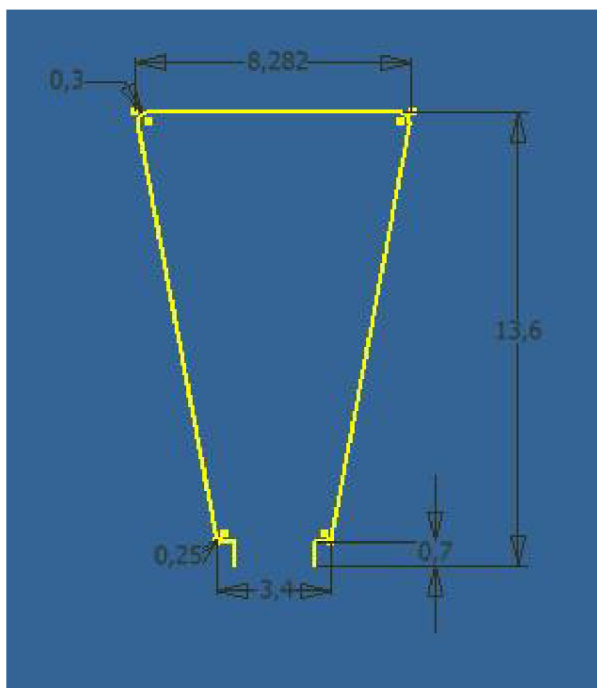


Obrázek 27 – Spínání jednotlivých tranzistorů v závislosti na čase

10 Analýza EC motoru pro 3 typy použitých drážek statoru

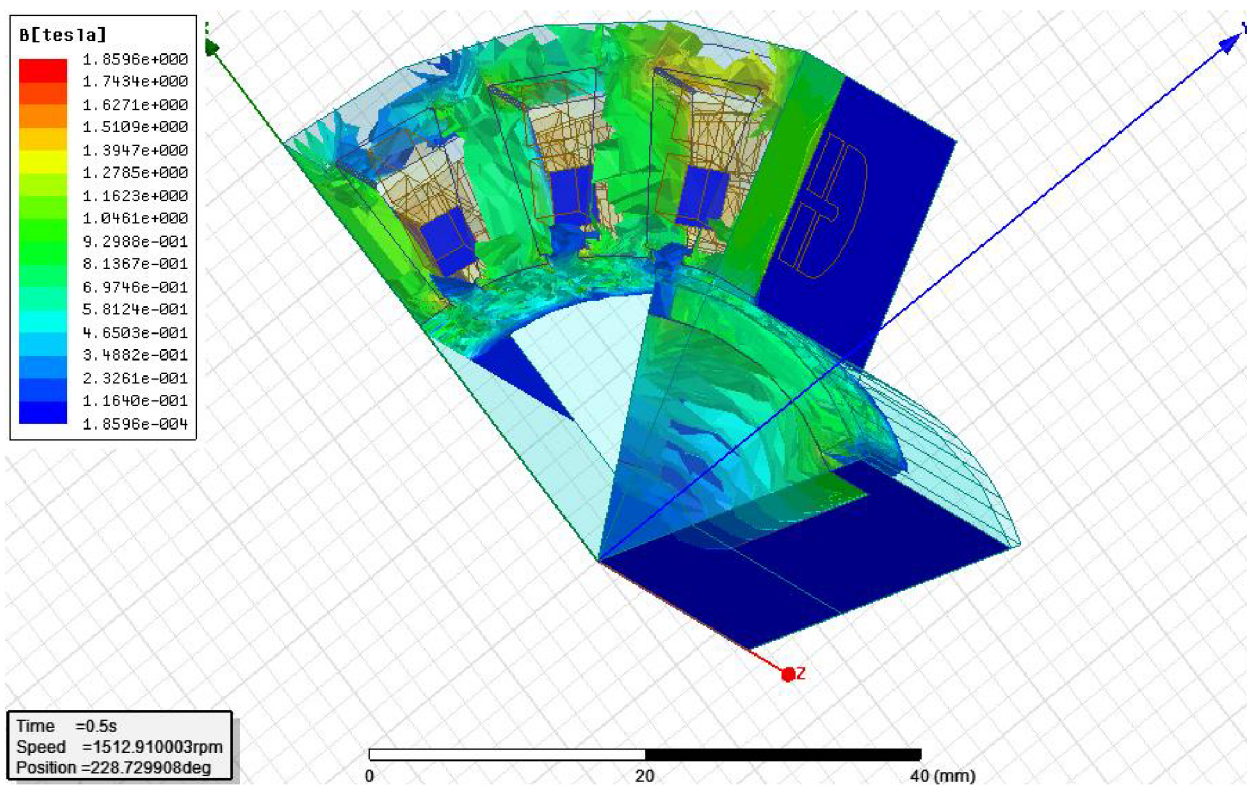
Tato analýza byla provedena pro jeden druh elektricky komutovaného motoru, kdy se u tohoto stroje měnily jen rozměry a tvary drážek statoru. Pomocí analýzy těchto třech drážek statoru bylo nasimulováno rozložení magnetické indukce a směr indukčních čar v EC motoru. Tato analýza byla provedena pomocí programu 3D Maxwell Design. Poukazuje se zde, jaký má vliv velikost a tvar drážek statoru na rozložení magnetické indukce.

10.1 První typ drážky statoru EC motoru

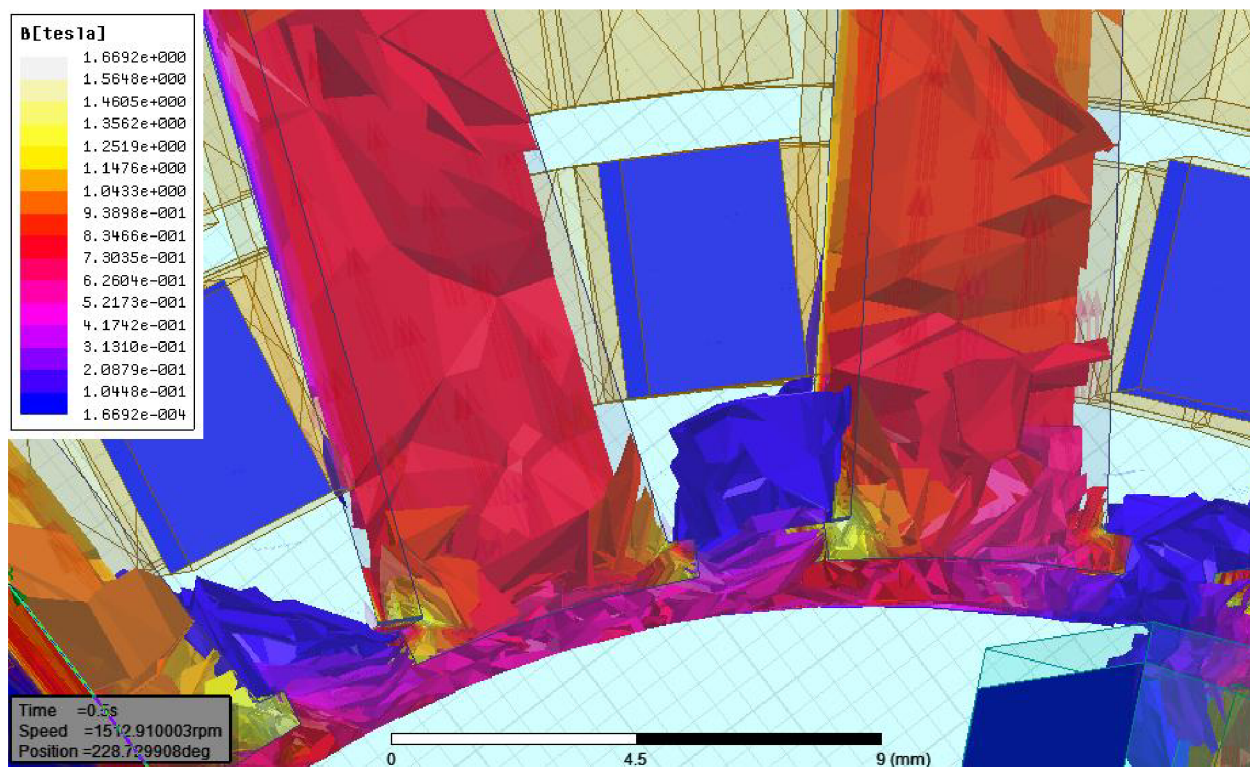


Obrázek 28 – První typ drážky statoru

10.1.1 Rozložení magnetické indukce pro první typ drážky statoru

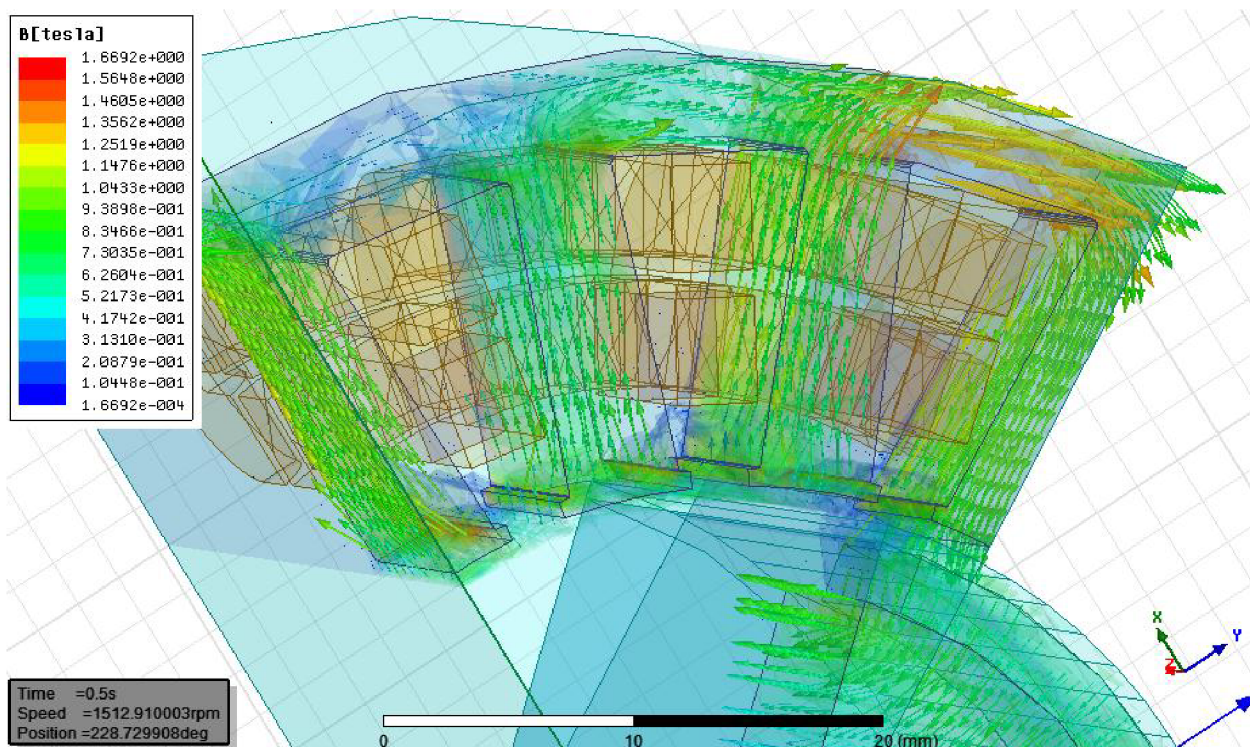


Obrázek 29 – Rozložení magnetické indukce pro první typ drážky statoru v čase $t=0,5$ s

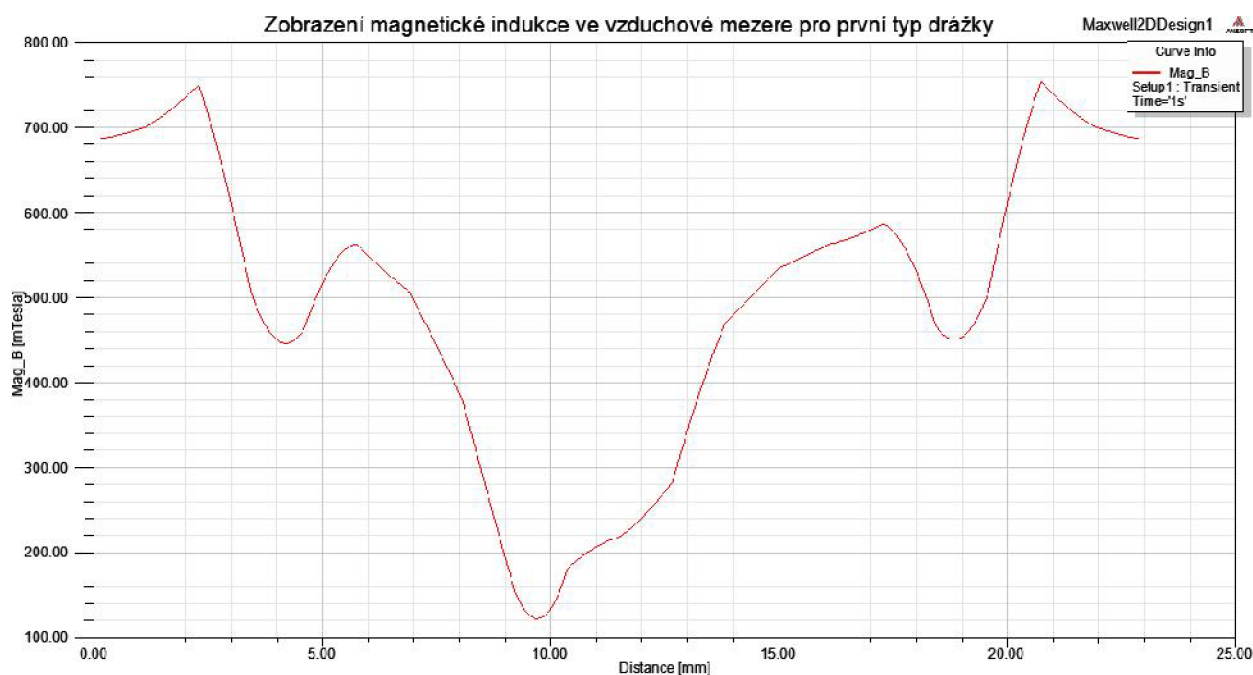


Obrázek 30 – Detail místa s výskytem největších hodnot magnetické indukce v čase $t=0,5$ s

Z rozložení magnetické indukce pro první typ drážky statoru je patrné, že se nejvyšší hodnoty magnetické indukce pohybují v čase $t=0,5s$ okolo 1,8596T. Tyto maximální hodnoty jsou v místě nejslabší části materiálu v oblasti drážky.



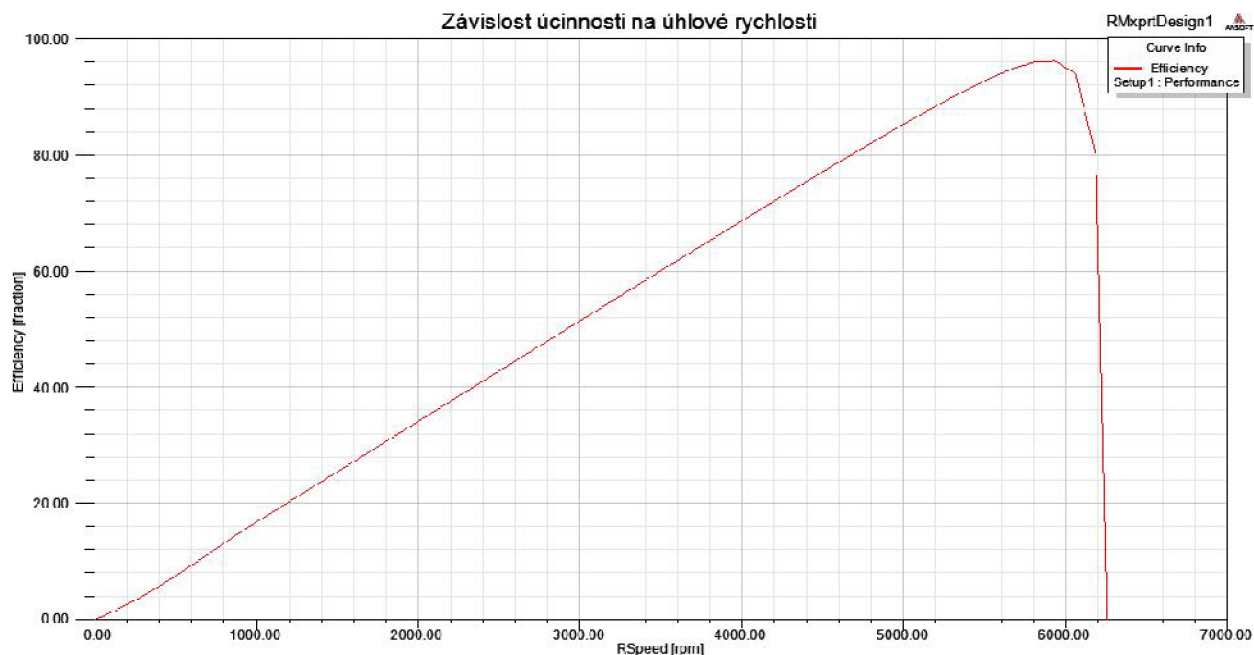
Obrázek 31 – Velikost a směr indukčních čar v čase $t=0,5s$



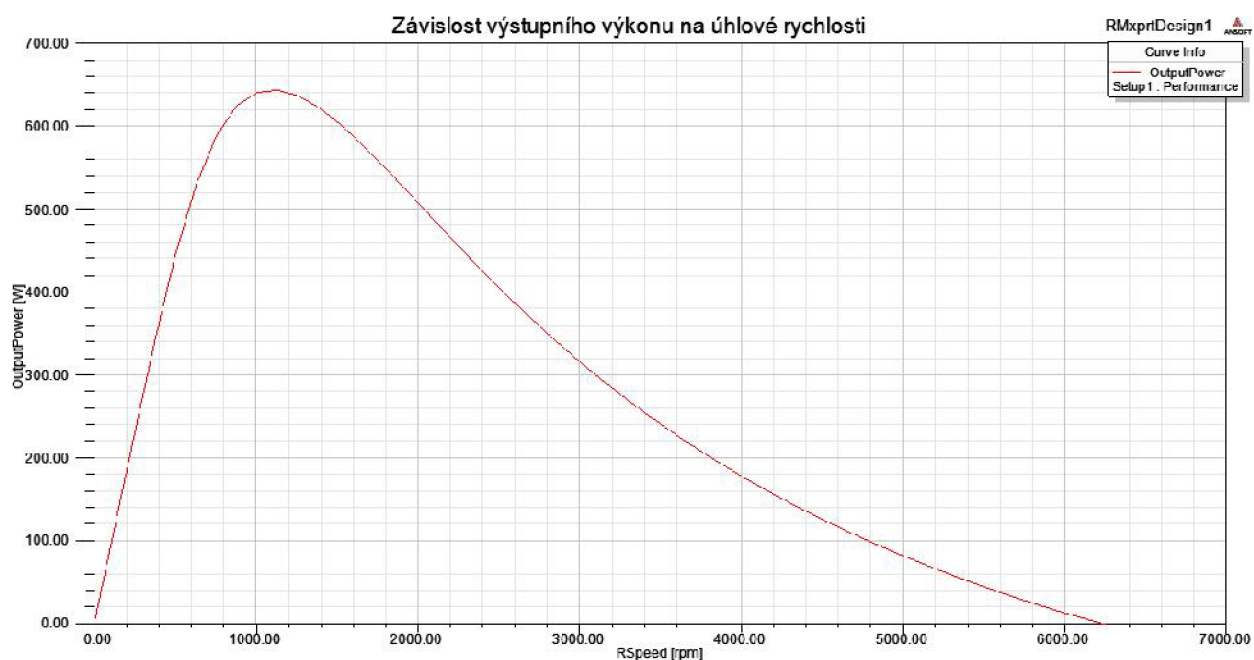
Obrázek 32 – Magnetická indukce ve vzduchové mezeře v čase $t=0,5s$

Magnetická indukce na zvolené čáře ve vzduchové mezeře u tohoto typu drážky má své minimum někde okolo 120mT při délce přibližně 9,8mm. Maximální hodnota je zde okolo 750mT při délce 3,2mm a při délce 20,8mm.

10.1.2 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt



Obrázek 33 – Závislost účinnosti na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt



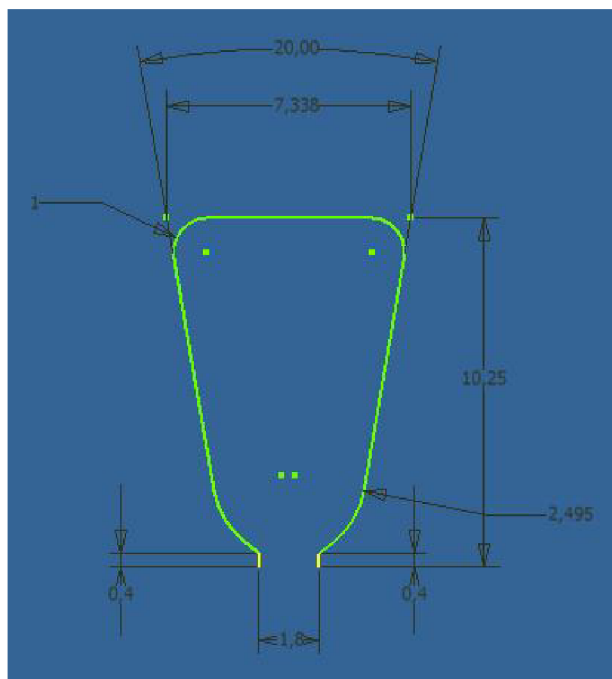
Obrázek 34 – Závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt



Pomocí programu Rmxprt Design byla zobrazena závislost výstupního výkonu a účinnosti na úhlové rychlosti. Z těchto grafických závislostí je patrné, že účinnost zde lineárně roste s rostoucí úhlovou rychlostí a svého maxima dosáhne v oblasti okolo 5800ot/min. Tato hodnota účinnosti je 98%.

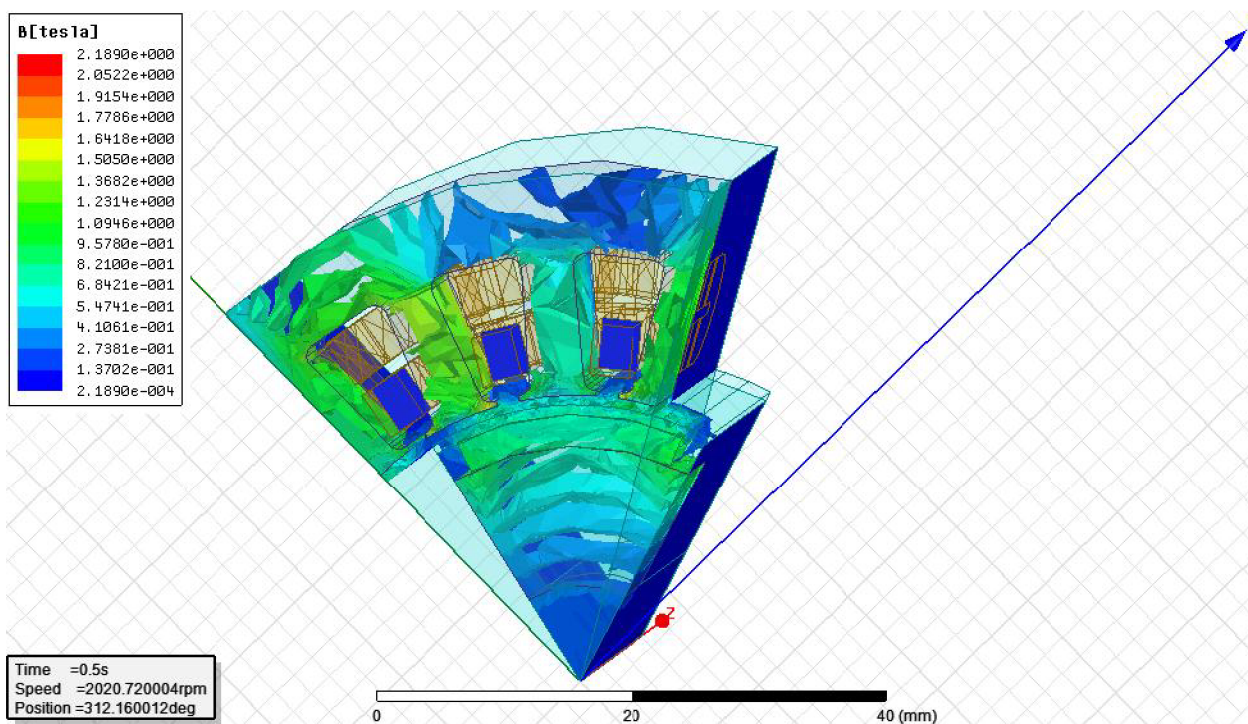
Výstupní výkon v závislosti na úhlové rychlosti má takřka lineární nárůst a svého maxima dosáhne při 1100ot/min a hodnota tohoto výkonu je 640W. Poté začne exponenciálně klesat.

10.2 Druhý typ drážky statoru EC motoru

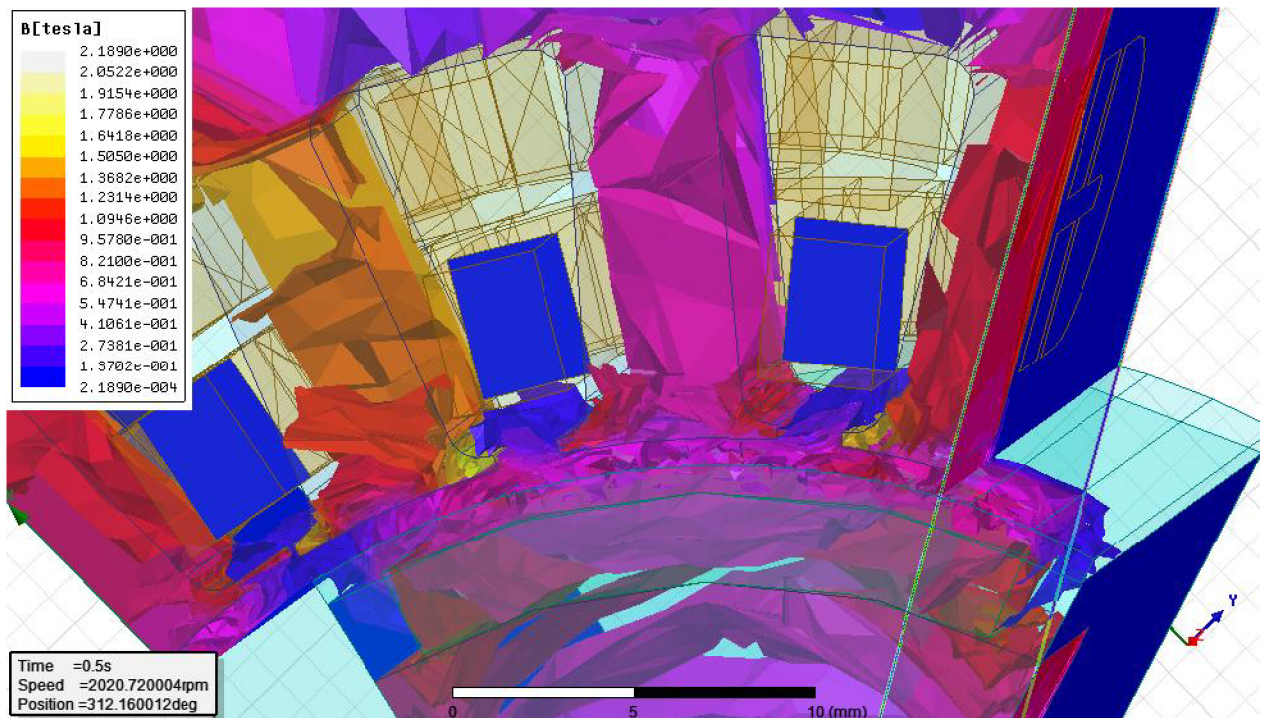


Obrázek 35 – Druhý typ drážky statoru

10.2.1 Rozložení magnetické indukce pro druhý typ drážky statoru

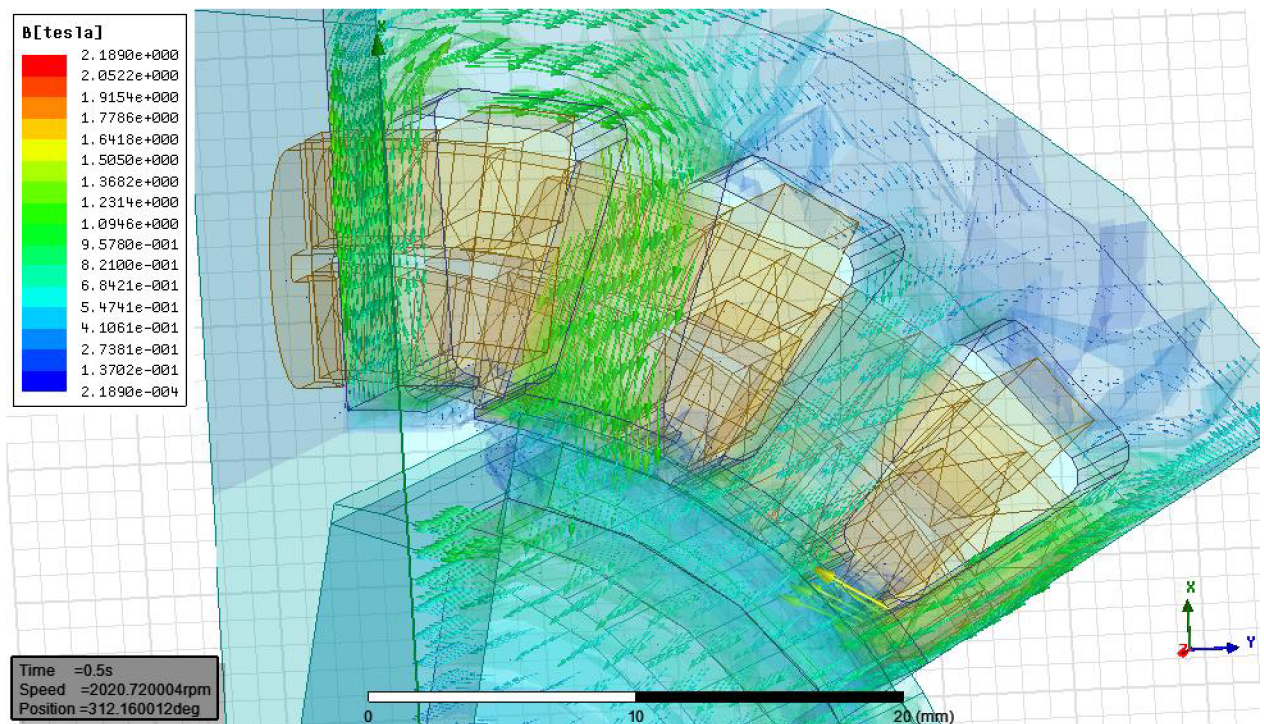


Obrázek 36 – Rozložení magnetické indukce pro druhý typ drážky statoru v čase $t=0,5s$

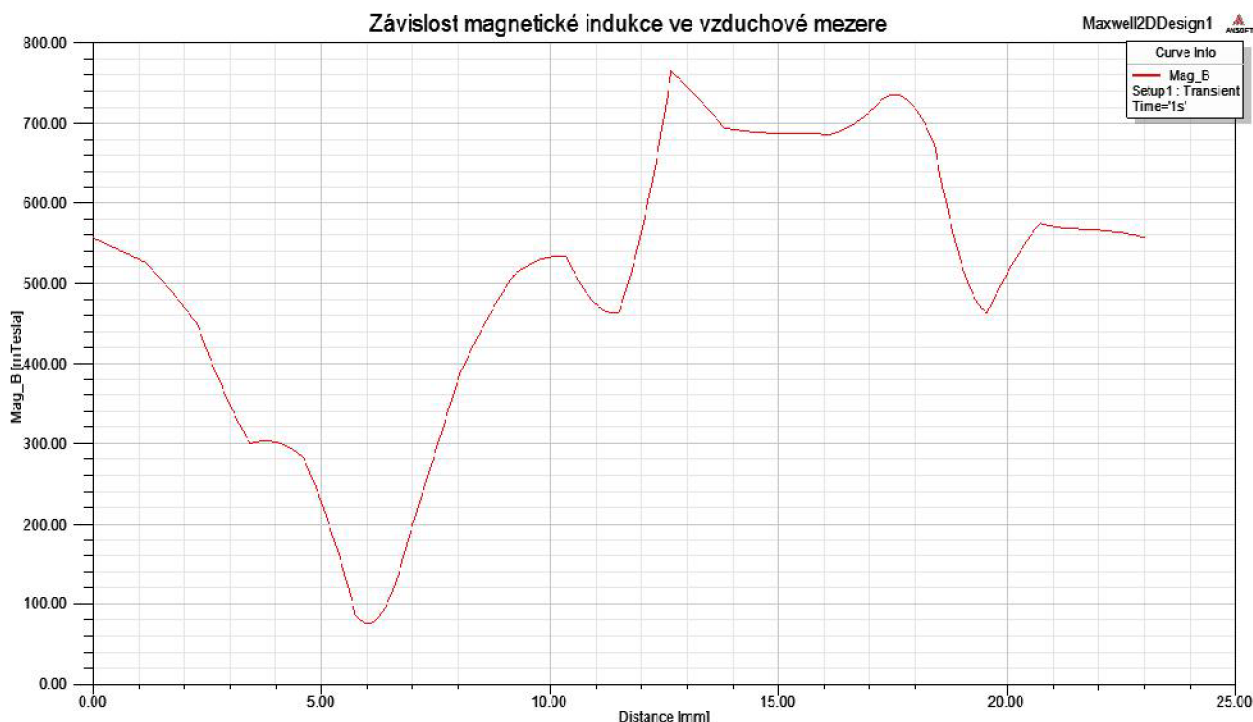


Obrázek 37 – Detail místa s výskytem největších hodnot magnetické indukce v čase $t=0,5s$

Z rozložení magnetické indukce pro druhý typ drážky statoru je patrné, že se nejvyšší hodnoty magnetické indukce pohybují v čase $t=0,5s$ okolo 2,198T. Tyto maximální hodnoty jsou v místě nejslabší části materiálu v oblasti drážky.



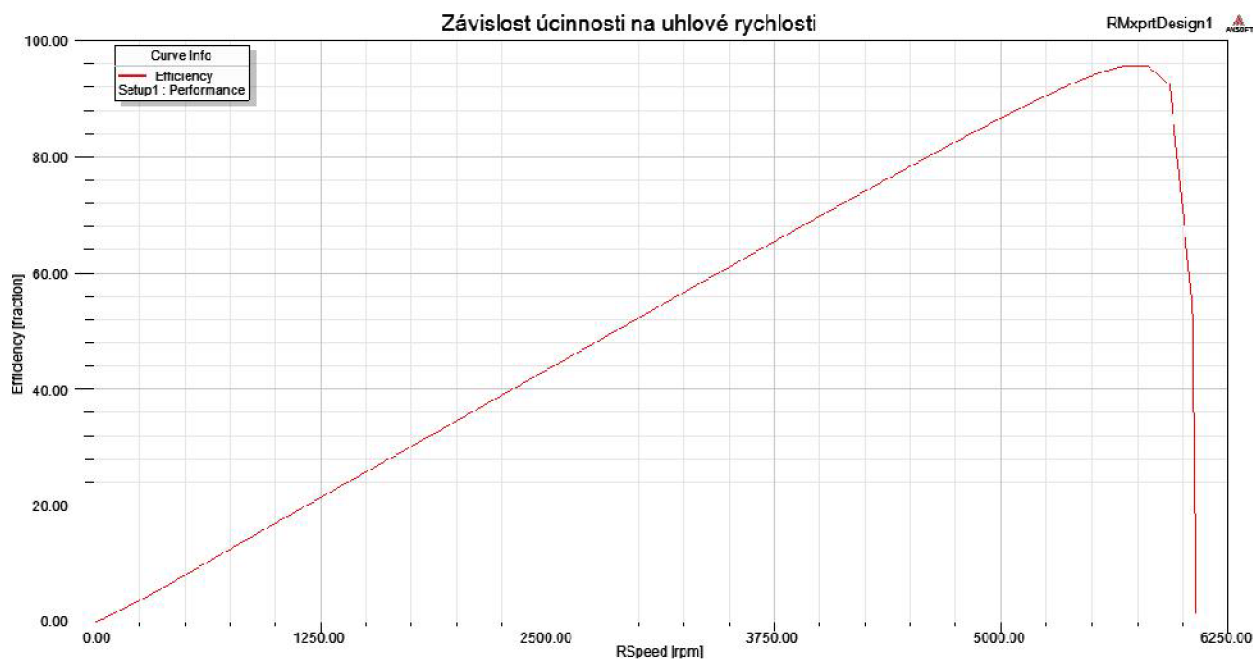
Obrázek 38 – Velikost a směr indukčních čar v čase $t=0,5s$



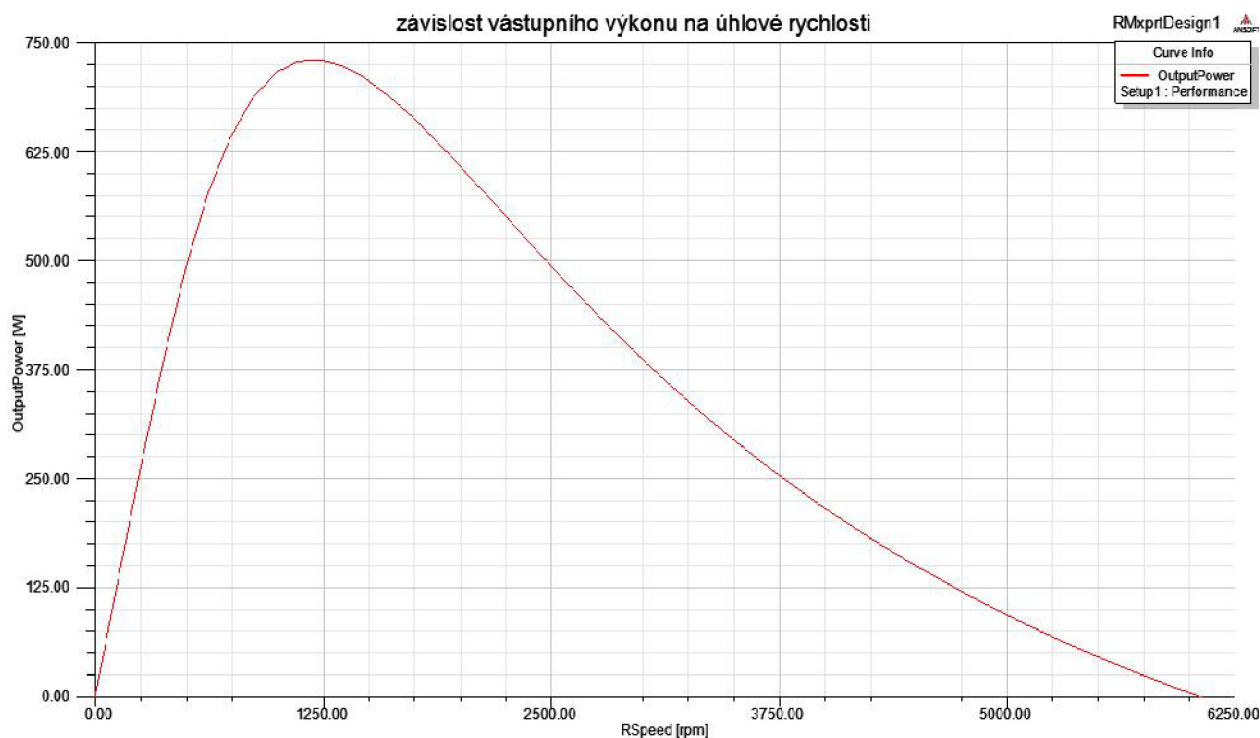
Obrázek 39 – Magnetická indukce ve vzduchové mezeře v čase $t=0,5s$

Magnetická indukce na zvolené čáře ve vzduchové mezeře u tohoto typu drážky má své minimum někde okolo 80mT při délce přibližně 6mm. Maximální hodnota zde je okolo 760mT při délce 12,5mm.

10.2.2 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt



Obrázek 40 – Závislost účinnosti na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt

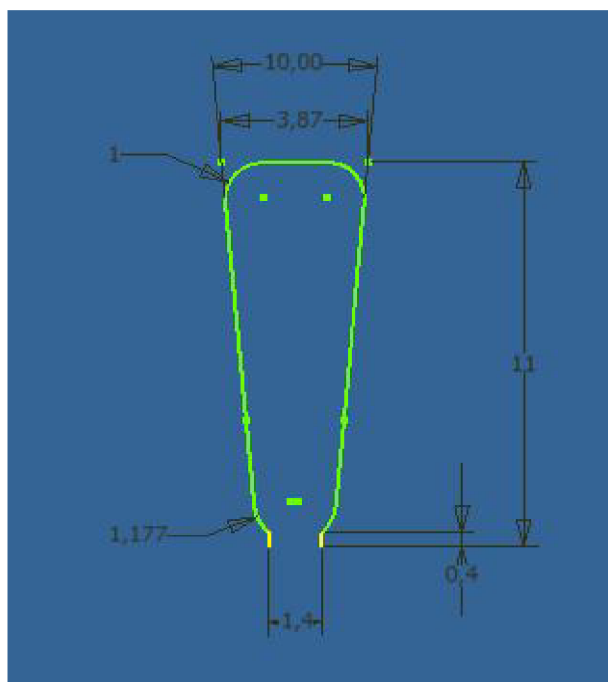


Obrázek 41 – Závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt

Pomocí programu Rmxprt Design byla zobrazena závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti a účinnosti na úhlové rychlosti. Z těchto grafických závislostí je patrné, že účinnost zde lineárně roste s rostoucí úhlovou rychlostí a svého maxima dosáhne v oblasti okolo 6080ot/min. Tato hodnota účinnosti je 98%.

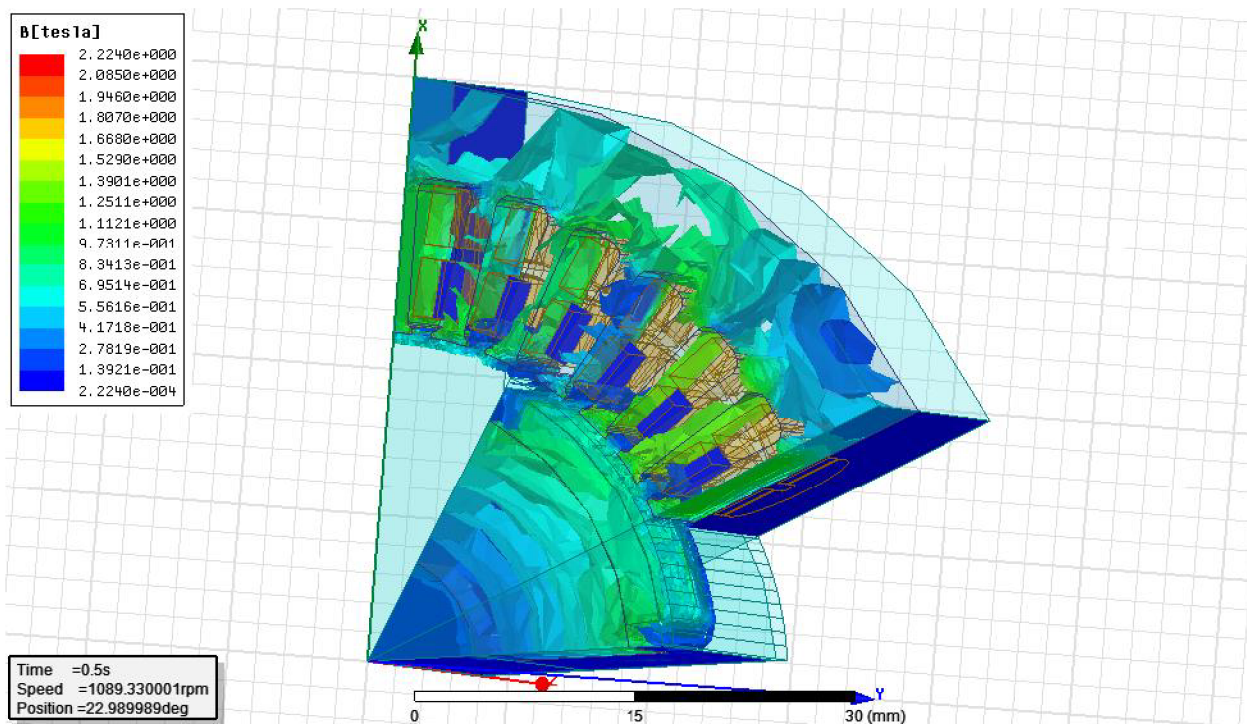
Výstupní výkon v závislosti na úhlové rychlosti má takřka lineární nárůst a svého maxima dosáhne při 1200ot/min a hodnota tohoto výkonu je 725W. Poté začne exponenciálně klesat.

10.3 Třetí typ drážky statoru EC motoru

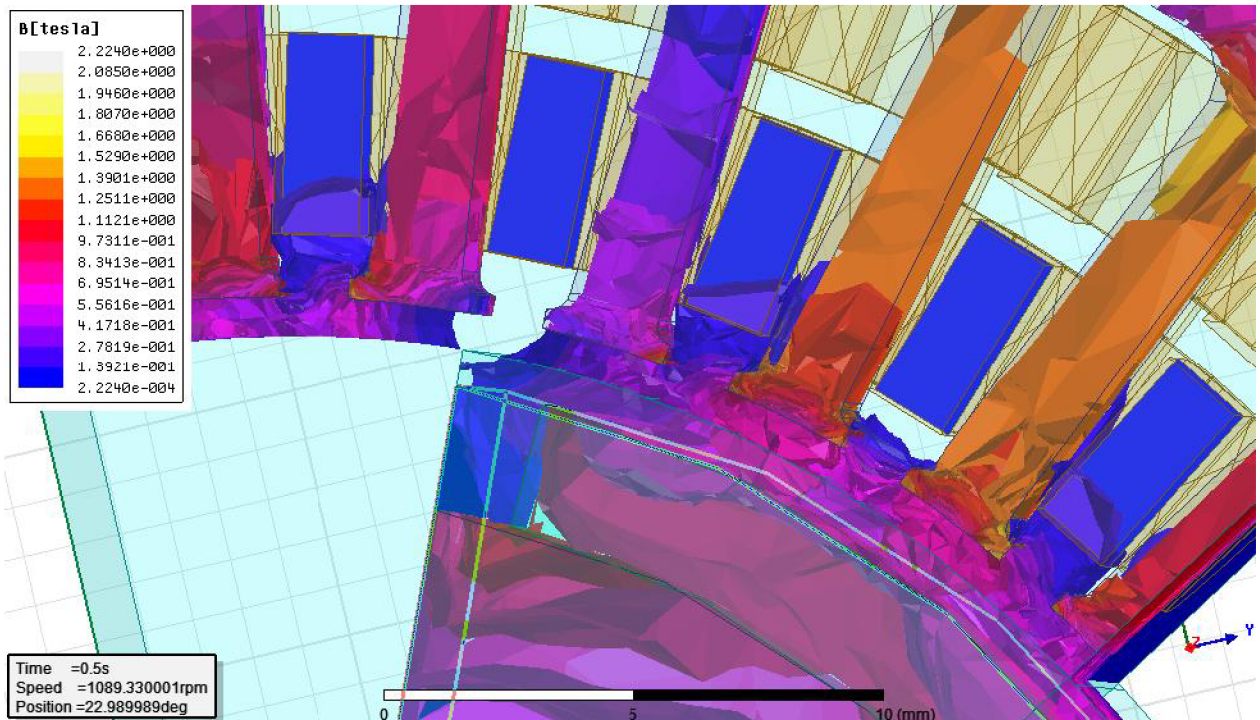


Obrázek 42 – Třetí typ drážky statoru

10.3.1 Rozložení magnetické indukce pro třetí typ drážky statoru

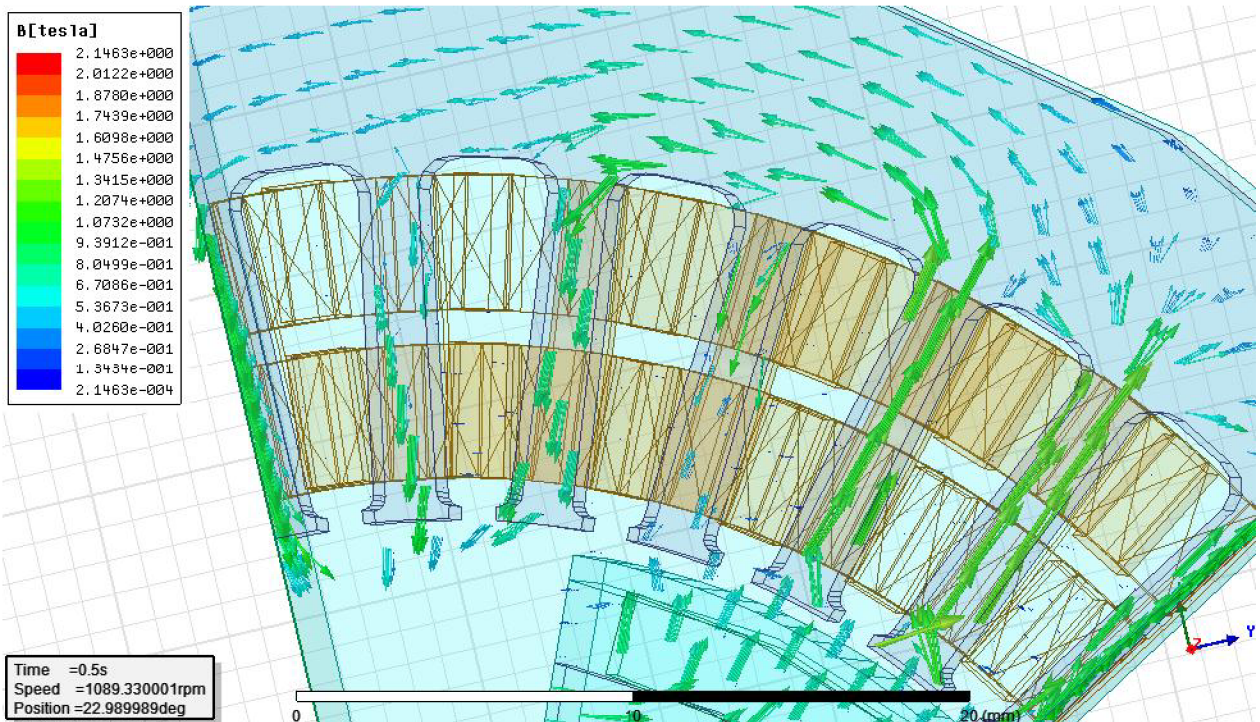


Obrázek 43 – Rozložení magnetické indukce pro třetí typ drážky statoru v čase $t=0,5s$

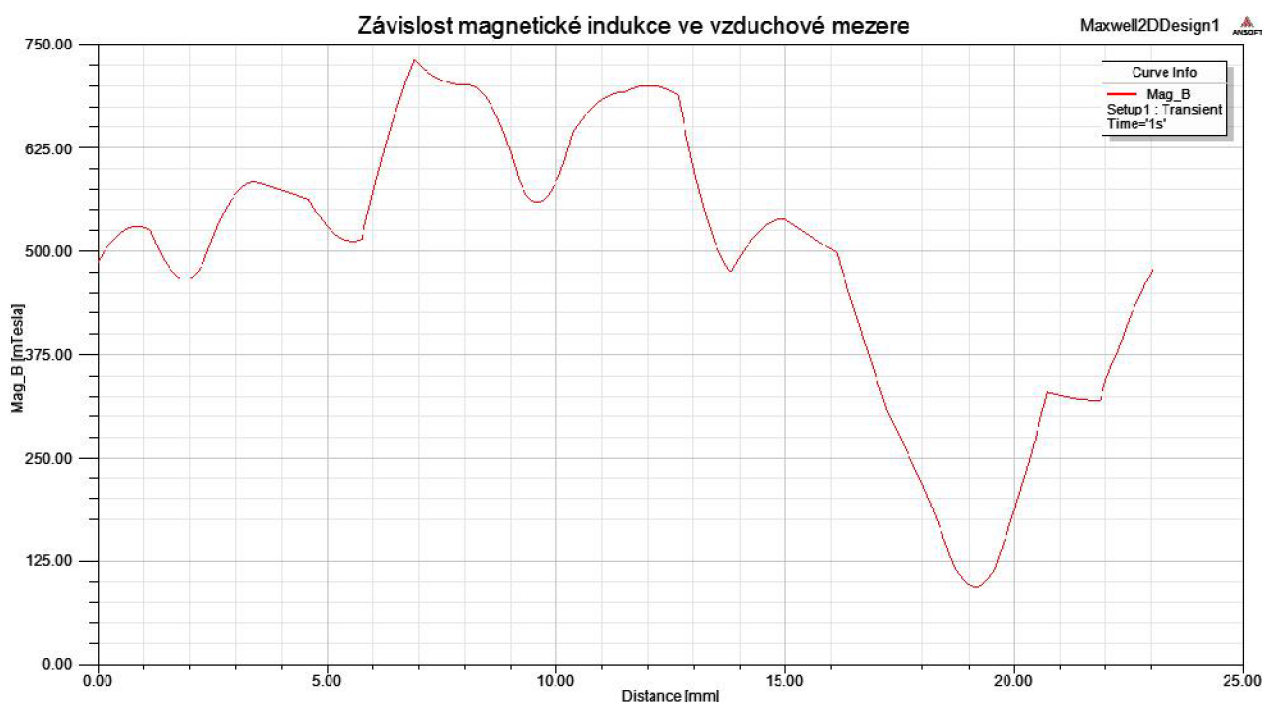


Obrázek 44 – Detail místa s výskytem největších hodnot magnetické indukce v čase $t=0,5s$

Z rozložení magnetické indukce pro třetí typ drážky statoru je patrné, že se nejvyšší hodnoty magnetické indukce pohybují v čase $t=0,5s$ okolo 2,240T. Tyto maximální hodnoty jsou v místě nejslabší části materiálu v oblasti drážky.



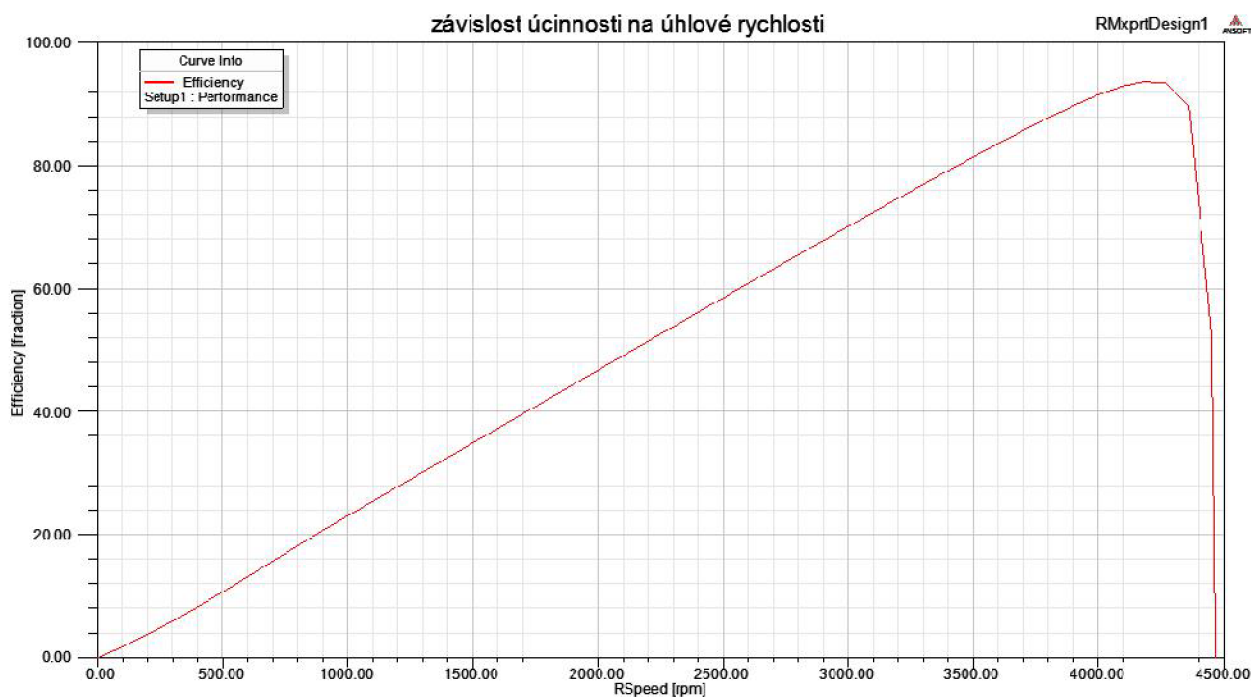
Obrázek 45 – Velikost a směr indukčních čar v čase $t=0,5s$



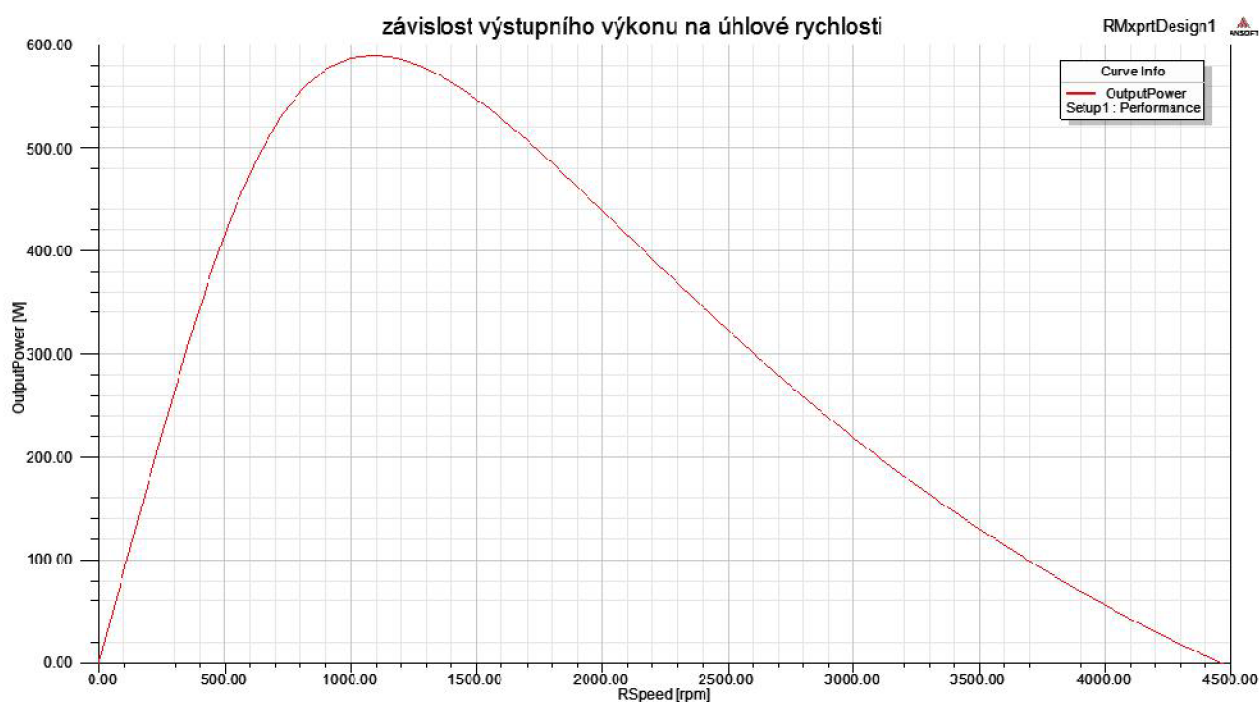
Obrázek 46 – Magnetická indukce ve vzduchové mezeře v čase $t=0,5s$

Magnetická indukce na zvolené čáře ve vzduchové mezeře u tohoto typu drážky má své minimum někde okolo 90mT při délce přibližně 19mm. Maximální hodnota zde je okolo 725mT při délce 7mm.

10.3.2 Grafické závislosti vypočtené programem Ansoft Rmxprt



Obrázek 47 – Závislost účinnosti na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt



Obrázek 48 – Závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti pomocí Rmxprt

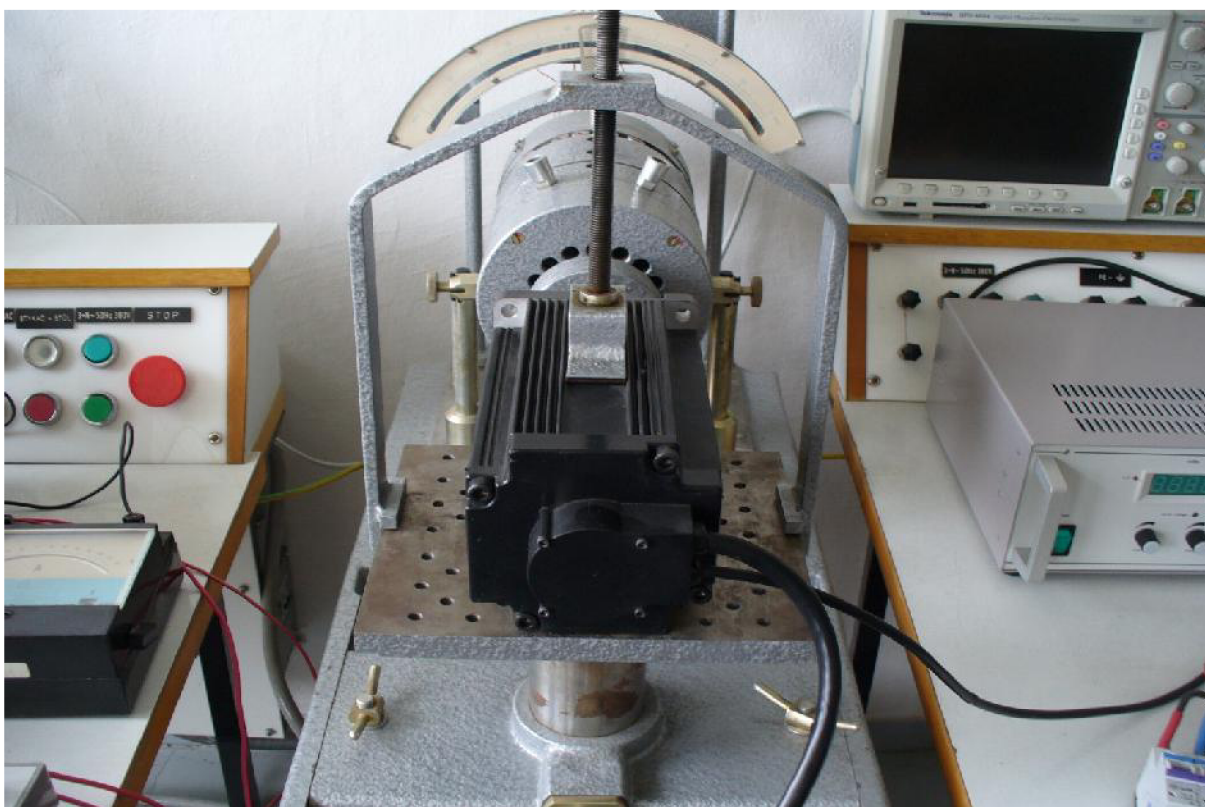
Pomocí programu Rmxprt Design byla zobrazena závislost výstupního výkonu na úhlové rychlosti a účinnosti na úhlové rychlosti. Z těchto grafických závislostí je patrné, že účinnost zde lineárně roste s rostoucí úhlovou rychlostí a svého maxima dosáhne v oblasti okolo 4300ot/min. Tato hodnota účinnosti je 93%.

Výstupní výkon v závislosti na úhlové rychlosti má takřka lineární nárůst a svého maxima dosáhne při 1100ot/min a hodnota tohoto výkonu je 590W. Poté začne exponenciálně klesat.

11 Měření na EC motoru BOYANG BY92BL48-4000-2200

11.1 Základní parametry EC motoru

- Jmenovité napětí: 48V
- Jmenovitý výkon: 2200W
- Jmenovité otáčky: 4000min⁻¹
- Materiál statoru: ocel
- Materiál rotoru: ocel
- Materiál vinutí: měď

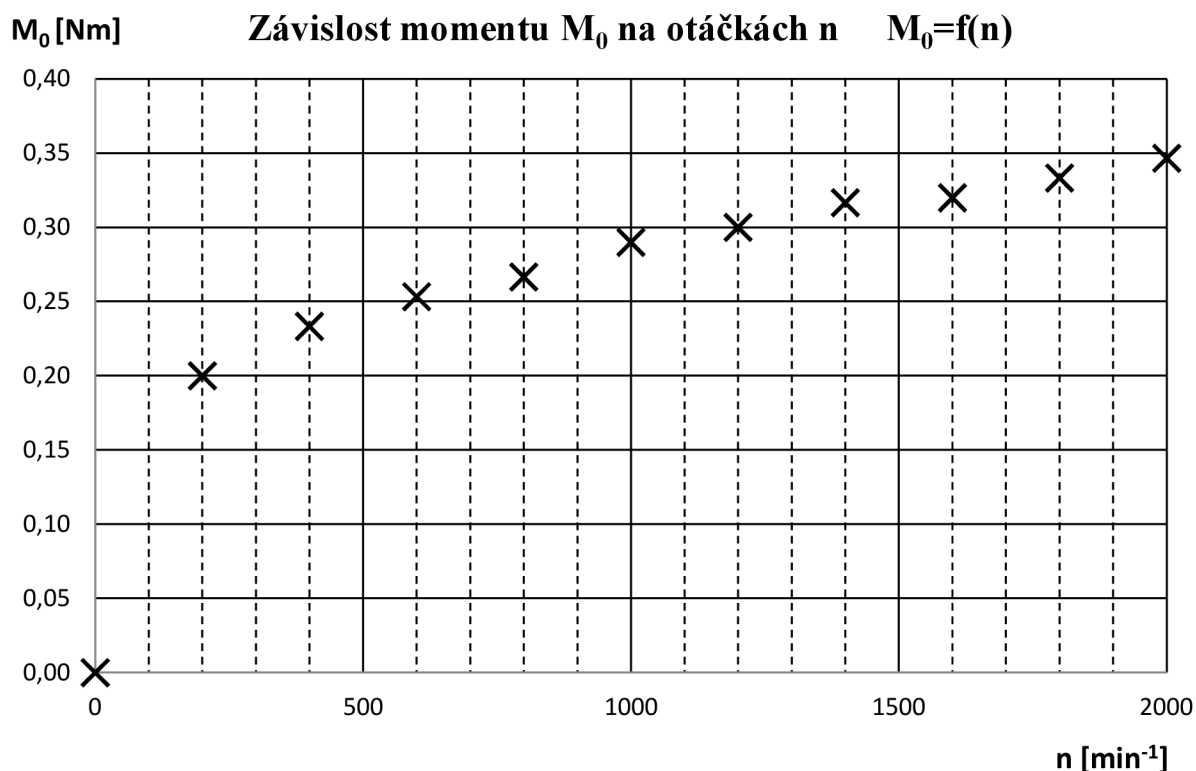


Obrázek 49 – Měřený EC motor BOYANG

11.2 Měření naprázdno

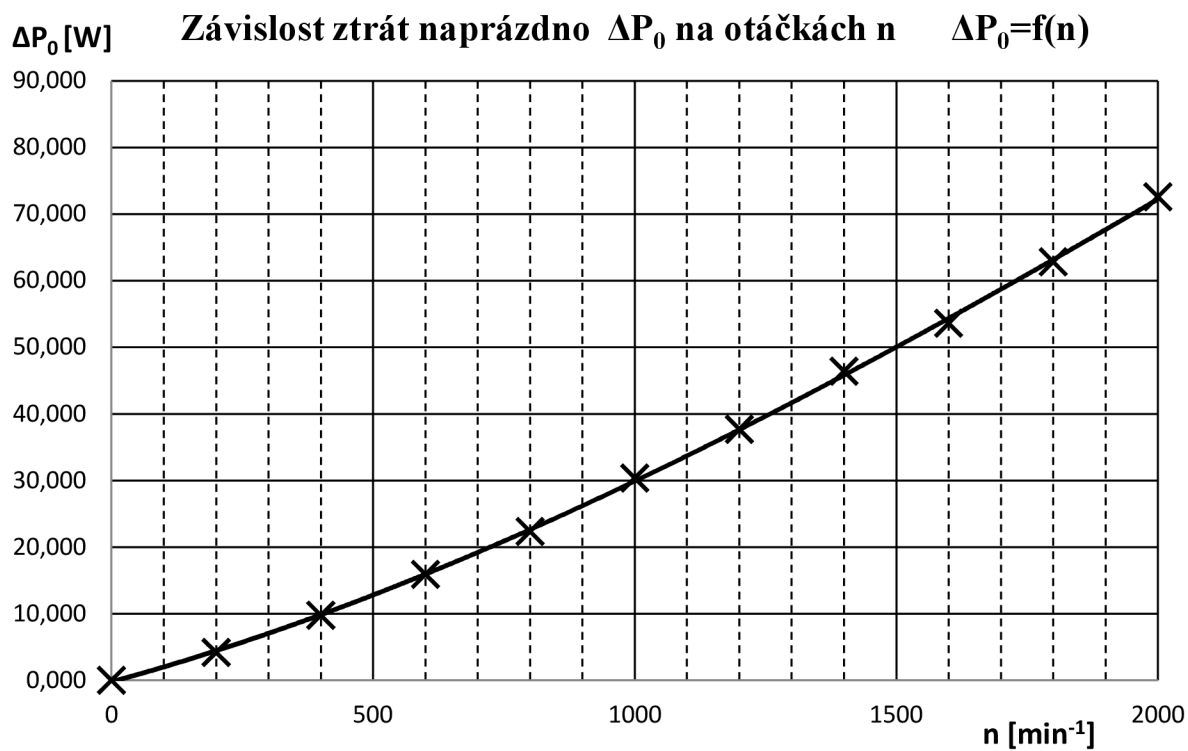
Měření naprázdno bylo uskutečněno tak, že na hřídeli EC motoru nebyla připojena žádná zátěž a napájecí napětí bylo regulováno. Jednotlivé kroky napětí byly nastavovány od 0V až do 24V. Pro každou hodnotu napětí byla odečtena velikost otáček a velikost momentu naprázdno. Z naměřených hodnot byla následně spočtena úhlová rychlost ω , ztráty naprázdno.

Z naměřených hodnot momentu naprázdno je vidět, že v závislosti na otáčkách má téměř exponenciální průběh. Hodnoty momentu se pohybují od 0Nm až 0,347Nm.



Obrázek 50 – Graf závislost momentu M_0 na otáčkách stroje n při měření naprázdno

Z hodnot měření naprázdno byly vypočteny ztráty naprázdno ΔP_0 a pomocí těchto hodnot byla zobrazena závislost ztrát naprázdno na otáčkách stroje. Z tohoto průběhu je patrné, že ztráty naprázdno nám rostou takřka lineárně s otáčkami. Tato charakteristika se pohybuje od nulových hodnot až do ztrát 72,61W při otáčkách 2000min^{-1} .

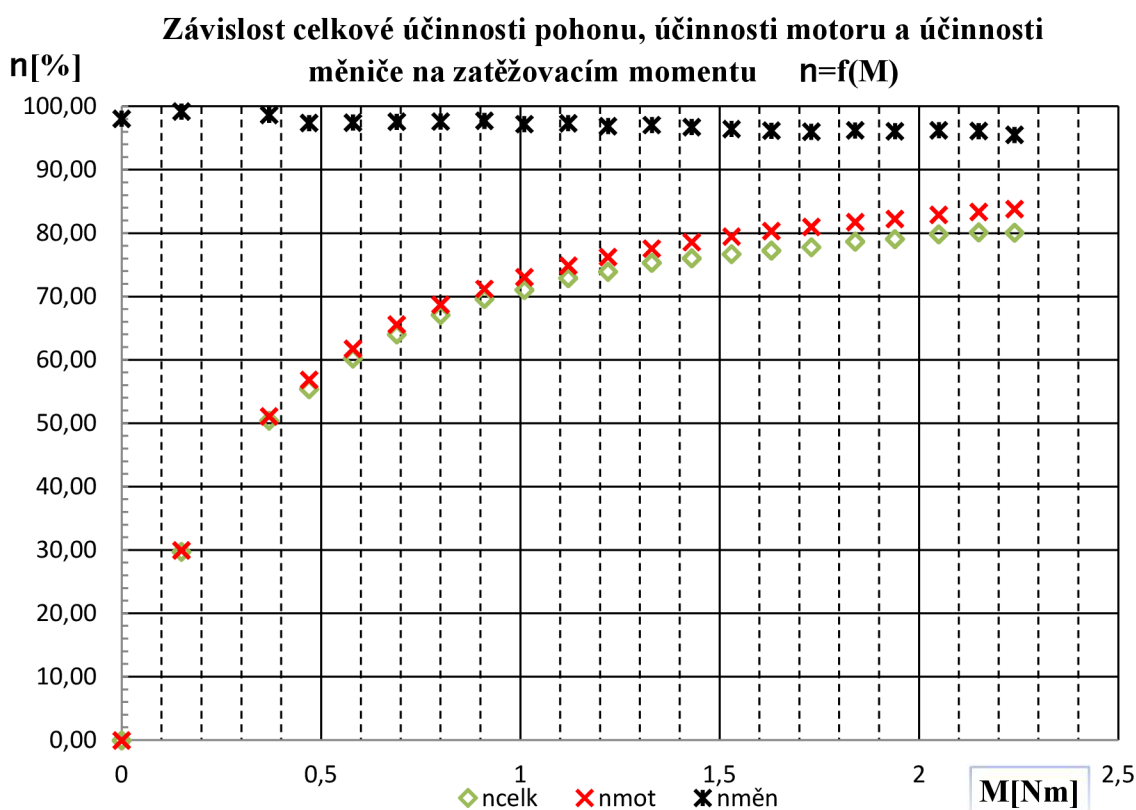


Obrázek 51 – Graf závislost ztrát naprázdno ΔP_0 na otáčkách stroje n při měření naprázdno

11.3 Měření zatěžovací charakteristiky

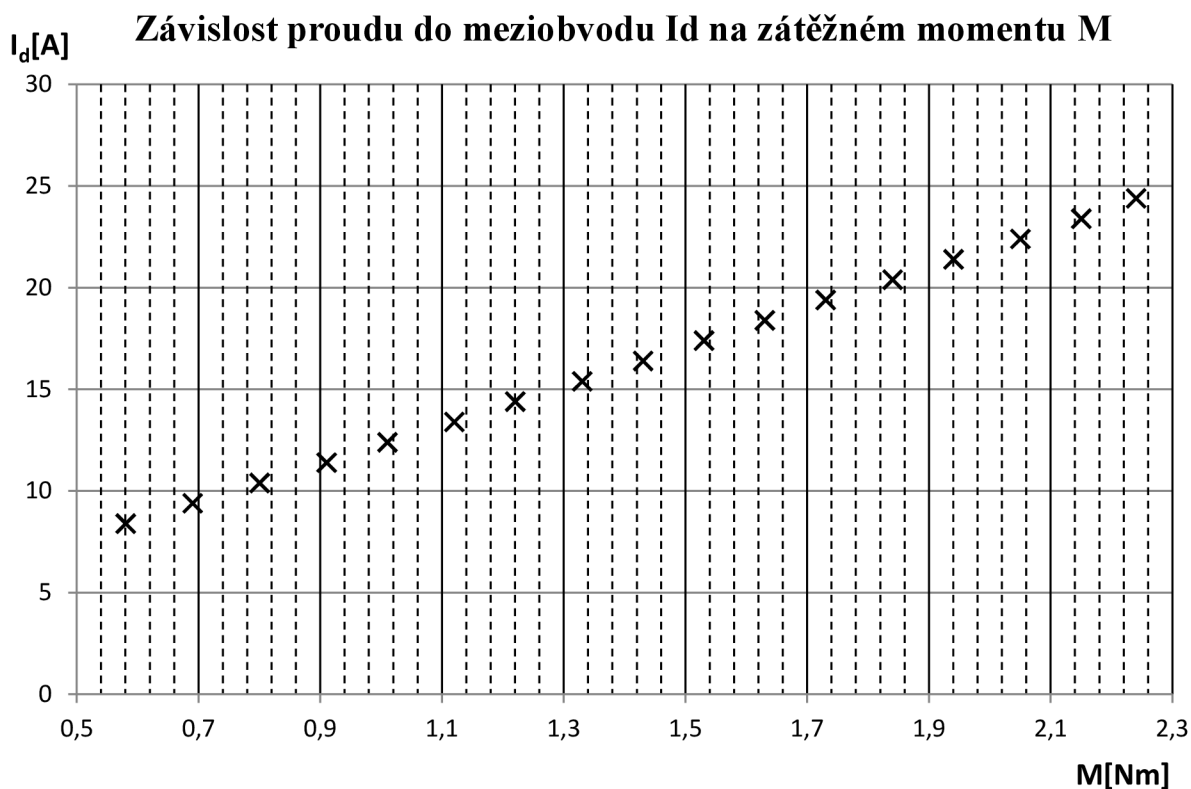
Měření zatěžovací charakteristiky bylo provedeno tak, že na EC motor byl připojen dynamometr. Dynamometr byl přestaven na rozsah 3Nm pomocí závaží 2,71kg. Pomocí brzdného odporu byl nastavován na dynamometru moment při konstantním napětí $U_d=24V$ a konstantních otáčkách 2000min^{-1} , kdy byla měněna hodnota proudu I_d do meziobvodu a pomocí proudové sondy zjištěna efektivní hodnota proudu motorem I_{rms} . Případná odchylka vstupního napětí při měření byla vyrovnána.

Ze závislosti účinnosti motoru, účinnosti měniče a účinnosti celkové v závislosti na zatěžovacím momentu je patrné, že celková účinnost s rostoucím zatížením lineárně klesá. Oproti tomu účinnost měniče a účinnost motoru exponenciálně narůstají.

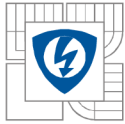


Obrázek 52 – Graf závislost účinnosti motoru, účinnosti měniče, účinnosti celkové na zatěžovacím momentu

Závislost zatěžovacího momentu M na proudu meziobvodem I_d ukazuje, že proud meziobvodem s rostoucím zběžným momentem lineárně narůstá. Při maximálním proudu 24,4A je hodnota momentu 2,24Nm.



Obrázek 53 – Graf závislost proudu meziobvodem I_d na zatěžovacím momentu M



11.4 Určení důležitých parametrů z naměřených hodnot

Výpočty z měření naprázdno:

Naměřené hodnoty:

$$n=2000\text{min}^{-1}, U=40\text{V}, M_0=0,347\text{Nm}$$

Úhlová rychlost ω :

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2000}{60}$$

$$\omega = 209,44\text{rad/s}$$

Ztráty naprázdno ΔP_0 :

$$\Delta P_0 = M_0 \cdot \omega$$

$$\Delta P_0 = 0,347 \cdot 209,44$$

$$\Delta P_0 = 72,61\text{W}$$

Výpočty z měření při zatížení:

Naměřené hodnoty:

$$n=2000\text{min}^{-1}, U_d=24\text{V}, M=2,24\text{Nm}, I_{\text{rms}}=22\text{A}, I_d=24,4\text{A}$$

Joulové ztráty ve vinutí stroje ΔP_{Cu} :

$$R_a=12,25\text{m}\Omega$$

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot R_a \cdot I_{\text{rms}}^2$$

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot 12,25 \cdot 10^{-3} \cdot 22^2$$

$$\Delta P_{Cu} = 17,79\text{W}$$

Příkon motoru P_1 :

$$P_1 = U_D \cdot I_D$$

$$P_1 = 24 \cdot 24,4$$

$$P_1 = 585,6\text{W}$$

Výkon motoru P_2 :

$$P_2 = M \cdot \omega$$

$$P_2 = 2,24 \cdot 209,44$$

$$P_2 = 469,14\text{W}$$

Ztráty na měniči $\Delta P_{\text{měn}}$:

$$P_{\text{měn}} = P_1 - \Delta P_{Cu} - \Delta P_0 - P_2$$

$$P_{\text{měn}} = 585,6 - 17,79 - 72,61 - 469,14$$

$$P_{\text{měn}} = 26,06\text{W}$$

Celková účinnost pohonu η_{celk} :

$$\eta_{\text{celk}} = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

$$\eta_{\text{celk}} = \frac{469,14}{585,6} \cdot 100$$

$$\eta_{\text{celk}} = 80,11\%$$

Účinnost motoru η_{mot} :

$$\eta_{\text{mot}} = \frac{P_2}{\Delta P_{Cu} + \Delta P_0 + P_2} \cdot 100$$

$$\eta_{\text{mot}} = \frac{469,14}{17,79 + 72,61 + 469,14} \cdot 100$$

$$\eta_{\text{mot}} = 83,8\%$$

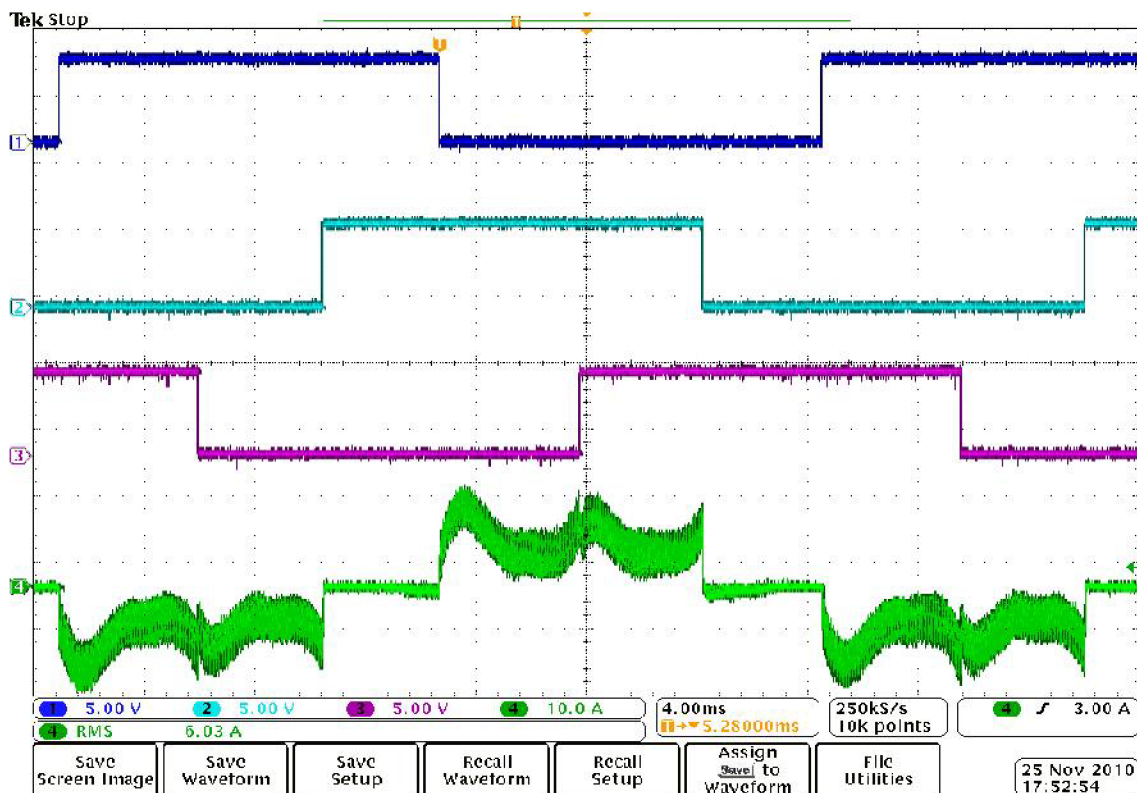
Účinnost měniče $\eta_{\text{měn}}$:

$$\eta_{\text{měn}} = \frac{\Delta P_{Cu} + \Delta P_0 + P_2}{P_1} \cdot 100$$

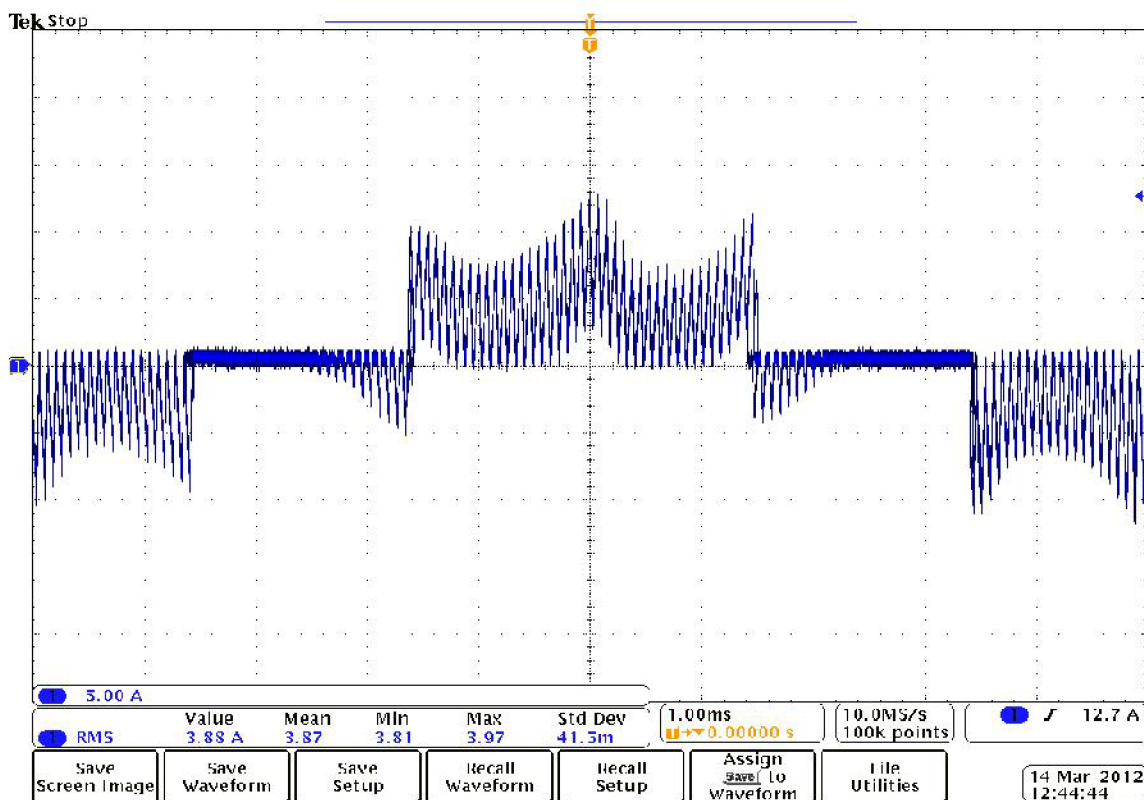
$$\eta_{\text{měn}} = \frac{17,79 + 72,61 + 469,14}{585,6} \cdot 100$$

$$\eta_{\text{měn}} = 95,55\%$$

11.5 Výstupní hodnoty z osciloskopu při měření EC motoru



Obrázek 54 – Přepínání jednotlivých fází EC motoru



Obrázek 55 – Průběh fázového proudu (PWM) při měření na EC motoru

12 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na problematiku stejnosměrných strojů a EC motorů. V práci jsem se seznámil s konstrukčním uspořádáním a činností EC motoru. Cílem bylo řešení rozložení magnetického pole v EC motoru s permanentními magnety pomocí programu Ansoft Maxwell. Tato simulace byla provedena pro tři druhy tvaru drážek statoru. Na těchto třech typech drážek je patrné, jak je závislá magnetická indukce na tvaru drážky.

První část je věnována stejnosměrným strojům. Dozvíte se zde, že stejnosměrné motory patří mezi nejstarší motory vůbec. Také je zde zmíněno, jak vlastně stejnosměrné stroje pracují, jaké mají konstrukční uspořádání. Dále zde je rozdělení stejnosměrných strojů, pokud je budící vinutí na hlavních pólech. Z tohoto rozdělení jsou zde nejdůležitější stroje s permanentními magnety, protože tento projekt je zaměřen na stejnosměrné stroje a EC motory s permanentními magnety.

Druhá část byla věnována problematice EC motorů. Je zde zpracováno konstrukční uspořádání těchto motorů. Elektricky komutovaný motor je prakticky obrácený stejnosměrný motor, kde na rotoru jsou umístěny permanentní magnety a stator se podobá statoru třífázového asynchronního nebo synchronního stroje. V lištěném statoru je umístěno třífázové vinutí. Dále se zde dozvíte o principu činnosti EC motoru.

Třetí část je zaměřena na problematiku permanentních magnetů. Jsou zde vypsány nejpoužívanější permanentní magnety, které se užívají v elektrických strojích a jsou uvedeny jejich vlastnosti. Poukazují na magneticky tvrdé Ferity. Dozvíte se, co si můžeme představit pod pojmem anizotropní a izotropní magnet. Je zde vysvětleno, jakou teplotu můžeme nazvat Curierovou teplotou. Také jsou tu zmíněny magnety ze vzácných zemin. V neposlední řadě Vám zde popisují vlastnosti permanentních magnetů Alnico a zobrazují demagnetizační křivky pro různé magnety. V závěru této části nastíním, jak vytvořit přednostní osu orientace a jak dělit permanentní magnety dle osy orientace.

Cílem další části je seznámit se s programem Ansoft Maxwell. Poukazují na to, že Ansoft pracuje na metodě konečných prvků. Dozvíte se zde, pro jaké analýzy je tento program nejvhodnější. Seznámíte se s prostředím Maxwell RMXprt Design, který je součástí programu Ansoft Maxwell.

V páté části Vám v jednotlivých krocích ukazují, jak postupovat při vytváření modelu elektricky komutovaného stroje s permanentními magnety. V neposlední řadě ukazují, co je nutné nastavit v prostředí RMXprt před převedením do prostředí Maxwell 3D Design.

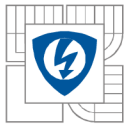
V šesté části přistupuji k provedení nastavení analýzy v prostředí Maxwell 3D Design. Po převedení modelu do tohoto prostředí musím provést ještě řadu kroků proto, aby analýza mohla být zdárně provedena. V tomto prostředí si zadám, jakou analýzu chci provádět. V mém případě je to transientní analýza. Po dokončení nezbytných nastavení si zadám, jaké veličiny na tomto motoru chci analyzovat. Zobrazuji zde rozložení magnetické indukce na tomto EC motoru a vektorové rozložení indukčních čar. Musím si tyto veličiny zadat, aby program mohl provést analýzu.

V následující části popisuji možnost simulace spínání elektricky komutovaného motoru pomocí prostředí Ansoft Simplorer, které je součástí. Je zde ukázáno, jak vytvořím měnič a z jakých prvků se bude měnič skládat. Poukazuji, jak vytvořit obvod, který nám spíná jednotlivé tranzistory měniče. V neposlední řadě uvádím, jak propojit 2D Maxwell s prostředím Simplorer.

V osmé části přistupuji k analýze magnetického pole elektricky komutovaného motoru Atas Náhod pomocí programu Ansoft Maxwell 3D. Jedná se o čtyřpólový stroj. Jmenovité napětí je 24V a jmenovité otáčky 3600min^{-1} . Zobrazuji zde rozložení magnetické indukce a vektorové rozložení magnetické indukce po dobu analýzy 1s. Z vypočtených hodnot je patrné, že maximální hodnota magnetické indukce, která se zde objeví, je 2.0098T. Toto je maximální hodnota, která je v oblasti nejtenčí části zubů statoru. V těchto zubech se objevuje největší indukce, protože indukční tok se uzavírá nejkratší cestou, tudíž v oblasti zubů je největší hustota plnění indukčního toku a tudíž největší hodnoty magnetické indukce. Také zde ukazují grafické závislosti, které vypočetl Ansoft Rmxprt. Je zde zobrazena magnetická indukce ve vzduchové mezeře a výsledky spínání elektricky komutovaného motoru pomocí měniče v prostředí Ansoft Simplorer.

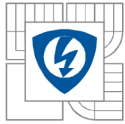
V další části přistupuji k porovnání tří typů drážek statoru elektricky komutovaného motoru Atas Náhod. Ze třech analyzovaných typů drážek je patrné, že nejvýhodnější typ statorové drážky je první typ. U tohoto typu drážky je vidět, že maximální hodnota, která se zde objevuje, je 1,8596T. Tato maximální hodnota je v oblasti nejtenčí části statorových zubů. To je zapříčiněno největší hustotou indukčních čar v této oblasti. U druhého typu drážek je tato maximální hodnota až nad hodnotou 2,189T. Nejhorší varianta byl typ drážky tři, kdy hodnoty maximální indukce jsou 2,2240T. Pro jednotlivé typy drážek byla zobrazena magnetická indukce ve vzduchové mezeře a výsledky pomocí Ansoft Rmxprt. Z těchto měření je patrné, že pro velikost a rozložení magnetické indukce není rozhodující jen typ a velikost magnetu, ale také typ použité drážky statoru.

V desáté části bylo provedeno měření EC motoru BOYANG. Na tomto motoru bylo provedeno měření naprázdno a měření zatěžovací charakteristiky. Tento motor dosahuje



největších ztrát naprázdno 72,1W při otáčkách 2000min^{-1} . Z naměřených hodnot byly vypočteny další parametry tohoto EC motoru jako výkon motoru, výkon měniče, příkon motoru a další. Tento motor dosahuje účinnosti 83,84%. Největší účinnost pohonu byla 80,11%.

Pomocí programu Ansoft Maxwell lze řešit různé elektromagnetické děje. Tento program velmi usnadňuje práci při konstrukci motorů. Problém si můžeme nejdříve nasimulovat v tomto programu a teprve potom ho řešit prakticky.



Seznam symbolů a zkratk

B	magnetická indukce	[T]
n	otáčky	[min ⁻¹]
l	délka	[m]
v	rychlost	[m/s]
U_{ind.}	indukované napětí	[V]
I_a	proud kotvy	[A]
F	síla	[N]
Al	hliník	
Ni	nikl	
Co	kobalt	
Fe	železo	
Sm	samarium	
Nd	neodym	
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
t	čas	[s]
M₀	moment naprázdno	[Nm]
ΔP₀	ztráty naprázdno	[W]
I_d	proud meziobvodu	[A]
I_{rms}	efektivní hodnota proudu	[A]
η	účinnost	[%]
M	zatěžovací moment	[Nm]
U_d	napětí meziobvodu	[V]
ΔP_{Cu}	ztráty ve vinutí	[W]
P₁	příkon motoru	[W]
P₁	výkon motoru	[W]
ΔP_{měn.}	ztráty na měniči	[W]
η_{celk}	celková účinnost	[%]
η_{mot.}	účinnost motoru	[%]



Seznam literatury

- [1][Http://fei1.vsb.cz](http://fei1.vsb.cz) [online]. 2005 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap22.pdf>>.
- [2][Http://www.emotor.cz](http://www.emotor.cz) [online]. 2008 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.emotor.cz/stejnsmerny-elektromotor.htm>>.
- [3][Http://fei1.vsb.cz](http://fei1.vsb.cz) [online]. 2005 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap22.pdf>>.
- [4][Http://elektrika.cz](http://elektrika.cz) [online]. 2008 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <http://elektrika.cz/obr/08_elektr_hl_druhy_01v.jpg>.
- [5][Http://cs.wikipedia.org](http://cs.wikipedia.org) [online]. 2011 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnet>>.
- [6][Http://www.supermagnety.cz](http://www.supermagnety.cz) [online]. 2008 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.supermagnety.cz/cz/64/magneticky-tvrde-ferity/>>.
- [7][Http://cs.wikipedia.org](http://cs.wikipedia.org) [online]. 2004 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Electric_motor_cycle_1.png>.
- [8][Http://fyzmatik.pise.cz](http://fyzmatik.pise.cz) [online]. 2009 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://fyzmatik.pise.cz/107301-curieho-teplota-aneb-jak-zrusit-magnet.html>>.
- [9][Http://avaxhome.ws](http://avaxhome.ws) [online]. 2009 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <http://avaxhome.ws/software/Ansoft_Maxwell_12_1.html>.
- [10][Http://www.magnetndfeb.com](http://www.magnetndfeb.com) [online]. 2005 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.magnetndfeb.com/Czech/about-magnet-neodymium-permanent-rare.asp>>.
- [11][Http://www.supermagnety.cz](http://www.supermagnety.cz) [online]. 2008 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.supermagnety.cz/cz/64/mozne-zpusoby-magnetovani/>>.
- [12][Http://www.vaeprosys.cz](http://www.vaeprosys.cz) [online]. 2008 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.vaeprosys.cz/product.asp?p=124&k=16&mk=10&ms=16>>.

Ostatní materiály:

- [13]F.GIEARS , Jacket; WING, Mitchell. *Permanent magnet motor technology*. Switzerland : 2002. 590 s.
- [14]SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony*. Brno, 2007 [cit. 2012-04-27]. Skripta. VUT BRNO.

Přílohy

Magnetické vlastnosti NdFeB:

Stupně	Br mT (kGs)	H _{cb} kA/m (kOe)	H _{cj} kA/m (kOe)	(BH) _{max} kJ/m ³ (MGOe)	(T _w)
N27	1030-1080 (10.3-10.8)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 955 (≥ 12)	199-231 (25-29)	80 °C
N30	1080-1130 (10.8-11.3)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 955 (≥ 12)	223-247 (28-31)	80 °C
N33	1130-1170 (11.3-11.7)	≥ 836 (≥ 10.5)	≥ 955 (≥ 12)	247-271 (31-34)	80 °C
N35	1170-1220 (11.7-12.2)	≥ 868 (≥ 10.9)	≥ 955 (≥ 12)	263-287 (33-36)	80 °C
N38	1220-1250 (12.2-12.5)	≥ 899 (≥ 11.3)	≥ 955 (≥ 12)	287-310 (36-39)	80 °C
N40	1250-1280 (12.5-12.8)	≥ 907 (≥ 11.4)	≥ 955 (≥ 12)	302-326 (38-41)	80 °C
N42	1280-1320 (12.8-13.2)	≥ 915 (≥ 11.5)	≥ 955 (≥ 12)	318-342 (40-43)	80 °C
N45	1320-1380 (13.2-13.8)	≥ 923 (≥ 11.6)	≥ 955 (≥ 12)	342-366 (43-46)	80 °C
N48	1380-1420 (13.8-14.2)	≥ 923 (≥ 11.6)	≥ 876 (≥ 12)	366-390 (46-49)	80 °C
N50	1400-1450 (14.0-14.5)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 876 (≥ 11)	382-406 (48-51)	60 °C
N52	1430-1480 (14.3-14.8)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 876 (≥ 11)	398-422 (50-53)	60 °C
30M	1080-1130 (10.8-11.3)	≥ 796 (≥ 10.0)	≥ 1114 (≥ 14)	223-247 (28-31)	100 °C
33M	1130-1170 (11.3-11.7)	≥ 836 (≥ 10.5)	≥ 1114 (≥ 14)	247-263 (31-33)	100 °C
35M	1170-1220 (11.7-12.2)	≥ 868 (≥ 10.9)	≥ 1114 (≥ 14)	263-287 (33-36)	100 °C
38M	1220-1250 (12.2-12.5)	≥ 899 (≥ 11.3)	≥ 1114 (≥ 14)	287-310 (36-39)	100 °C
40M	1250-1280 (12.5-12.8)	≥ 923 (≥ 11.6)	≥ 1114 (≥ 14)	302-326 (38-41)	100 °C
42M	1280-1320 (12.8-13.2)	≥ 955 (≥ 12.0)	≥ 1114 (≥ 14)	318-342 (40-43)	100 °C

Tabulka 1 - Magnetické a fyzikální vlastnosti některých sliovaných NdFeB magnetů [10]

Magnetické vlastnosti SmCo:

Stupně	Br	HcB	HcJ	(BH)max	Curie Temp.	Temp.Coe	pracovních T.	LEGOVANÉ Series
	[mT] [Gs]	[kA/m] [Oe]	[kA/m] [Oe]	[kJ/m ³] [MGOe]	[°C]	[%/°C]	[°C]	
SmCo18	800 8000	640 8000	1430 18000	144 18.0	750	0.04	250	1:5
SmCo20	850 8500	640 8000	1590 20000	160 20.0	750	0.04	250	
SmCo22	900 9000	650 8200	1430 18000	176 22.0	750	0.04	250	
SmCo24	980 9800	676 8500	1430 18000	192 24.0	800	0.04	300	2:17
SmCo26L	1050 10500	410 5150	432 5430	208 26.0	800	0.04	300	
SmCo26	1000 10000	716 9000	1194 15000	208 26.0	800	0.04	300	
SmCo26M	1000 10000	716 9000	1590 20000	208 26.0	800	0.04	300	
SmCo28	1030 10300	760 9500	1430 18000	224 28.0	800	0.04	300	
SmCo28H	1030 10300	760 9500	1590 20000	224 28.0	800	0.04	300	
SmCo30H	1100 11000	480 6000	560 7000	240 30.0	800	0.04	300	

Tabulka 2 - Typické magnetické výkonnosti slinovaných SmCo magnetů [10]

Magnetické vlastnosti ALNICO:

Stupně	Br	Hc	(BH)max	Curie Temp.	Temp.Coe	US norma	IEC norma
	[mT] [Gs]	[kA/m] [Oe]	[kJ/m ³] [MGOe]	[°C]	[%/°C]	MMPA Ekvivalentní	IEC Ekvivalentní
LN10	650 6500	42 530	10.0 1.20	810	0.030	Alnico 3	Alnico 9/3
LNG11	720 7200	37 480	11.2 1.40	810	0.030	Alnico 1	Alnico 8/4
LNG13	700 7000	50 620	13.0 1.60	810	0.030	Alnico 2	Alnico 12/6
LNGT18	580 5800	90 1130	18.0	860	0.025	[Alnico 8]	Alnico 17/9
LNG16	800 8000	53 660	16.0 2.00	850	0.025	[Alnico 4]	/
LNG34	1180 11800	44 550	35.0 4.30	860	0.020	[Alnico 5C]	/
LNG37	1180 11800	48 600	37.0 4.65	860	0.020		Alnico 5
LNG40	1220 12200	48 600	40.0 5.00	860	0.020	Alnico 5	/
LNG44	1220 12200	52 650	44.0 5.50	860	0.020		Alnico 5 DG
LNG52	1250 12500	55 690	52.0 6.50	860	0.020	Alnico 5 DG	Alnico 52/6

Tabulka 3 - Typické magnetické výkonnosti ALNICO magnetů [10]

	n	U	M ₀	ω	ΔP ₀
	[min ⁻¹]	[V]	[Nm]	[rad*s ⁻¹]	[W]
1	0	0,000	0,000	0,00	0,000
2	200	4	0,2	20,94	4,19
3	400	8	0,233	41,89	9,77
4	600	12	0,253	62,83	15,92
5	800	16	0,267	83,78	22,34
6	1000	20	0,290	104,72	30,37
7	1200	24	0,3	125,66	37,70
8	1400	28	0,317	146,61	46,43
9	1600	32	0,32	167,55	53,62
10	1800	36	0,33	188,50	62,83
11	2000	40	0,3467	209,44	72,61

Tabulka 4 – Měření na EC motoru naprázdno

	U _d	I _d	I _{rms}	n	M	P ₁	P ₂	ΔP _{cu}	ΔP _{mě}	η _{celk}	η _{mot}	η _{mě}
	[V]	[A]	[A]	[min ⁻¹]	[Nm]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]
1	24	3,1	3,2	2000	0	74,40	0,00	0,38	1,41	0,00	0,00	98,10
2	24	4,4	4,6	2000	0,15	105,60	31,42	0,78	0,80	29,75	29,98	99,25
3	24	6,4	6,4	2000	0,37	153,60	77,49	1,51	1,99	50,45	51,11	98,70
4	24	7,4	7,3	2000	0,47	177,60	98,44	1,96	4,60	55,43	56,90	97,41
5	24	8,4	8,2	2000	0,58	201,60	121,47	2,47	5,04	60,26	61,80	97,50
6	24	9,4	9,2	2000	0,69	225,60	144,51	3,11	5,37	64,06	65,62	97,62
7	24	10,4	9,9	2000	0,8	249,60	167,55	3,60	5,84	67,13	68,74	97,66
8	24	11,4	10,8	2000	0,91	273,60	190,59	4,29	6,11	69,66	71,25	97,77
9	24	12,4	12	2000	1,01	297,60	211,53	5,29	8,16	71,08	73,08	97,26
10	24	13,4	12,8	2000	1,12	321,60	234,57	6,02	8,40	72,94	74,89	97,39
11	24	14,4	13,7	2000	1,22	345,60	255,52	6,90	10,58	73,93	76,27	96,94
12	24	15,4	14,5	2000	1,33	369,60	278,55	7,73	10,71	75,37	77,62	97,10
13	24	16,4	15,5	2000	1,43	393,60	299,50	8,83	12,66	76,09	78,62	96,78
14	24	17,4	16,4	2000	1,53	417,60	320,44	9,88	14,66	76,73	79,53	96,49
15	24	18,4	17,2	2000	1,63	441,60	341,39	10,87	16,73	77,31	80,35	96,21
16	24	19,4	18,3	2000	1,73	465,60	362,33	12,31	18,35	77,82	81,01	96,06
17	24	20,4	19	2000	1,84	489,60	385,37	13,27	18,35	78,71	81,78	96,25
18	24	21,4	20,1	2000	1,94	513,60	406,31	14,85	19,83	79,11	82,29	96,14
19	24	22,4	20,6	2000	2,05	537,60	429,35	15,60	20,04	79,86	82,96	96,27
20	24	23,4	21,6	2000	2,15	561,60	450,29	17,15	21,55	80,18	83,38	96,16
21	24	24,4	22	2000	2,24	585,60	469,14	17,79	26,06	80,11	83,84	95,55

Tabulka 5 – Měření na EC motoru při zatížení (n=2000 min⁻¹)