

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony



**Aplikace vývojového prostředí Ansys pro návrh
reluktančního synchronního motoru 15 kW**

Design of 15 kW Reluctance Synchronous Drive in ANSYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Jan Pavluk

Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.

Rok: 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavluk** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **406222**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aplikace vývojového prostředí ANSYS pro návrh reluktančního synchronního motoru 15 kW

Název diplomové práce anglicky: *

Design of 15kW Reluctance Synchronous Drive in ANSYS

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s vývojovým prostředím ANSYS Electronic ver. 17.0 ? campus licence CVUT
- 2) Vypracujte rešerši state of art v oboru konstrukce RSM strojů
- 3) Proveďte elektromagnetický návrh stroje, využijte modul Ansys - RMXprt
- 4) Proveďte simulace funkce stroje v ANSYS Maxwell 3D.
- 5) Analyzujte vypočtená data.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcová V.; Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons 2014
- [2] Hrabovcová V., Janoušek L., Rafajdus P., Ličko M., Moderné elektrické stroje, Žilina, 2001
- [3] Hrabovcová V., Ličko M., Reluktančný synchronný motor, TÚ Žilina 2001
- [4] Kotal M., Novotný P., Voženilek p., Příklady výpočtu elektrických strojů točivých ČVUT Fel, 1974
- [5] Manuály ANSYS RMXprt, Maxwell 3D, Techsoft-engineering 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Buhr CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.06.2017**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Jan Pavluk

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za odborný dohled, znalosti z praxe a vedení. Dále své rodině za veškerou podporu.

Klíčová slova

Reluktanční synchronní motor, RSM, Ansys Electronics, Maxwell, RMxprt

Key words

SynRM, Reluctance Synchronous Machine, Ansys Electronics, Maxwell, RMxprt

Abstrakt

Cílem této práce je seznámení se s vývojovým prostředím Ansys Electronics ve verzi 17.0., které má výpočetní centrum ČVUT nově zakoupené v tzv. student free Campus licenci. Dále analýza základních principů návrhu reluktančních synchronních motorů a následné ověření aplikace vývojového prostředí pro návrh reluktančního synchronního motoru 15kW a simulace jeho funkce v programu Maxwell3D.

Abstract

The aim of this thesis is to get acquainted with the development environment of Ansys Electronics in version 17.0, which has our university newly purchased under the student free Campus license. Further elaboration of basic principles of design of reluctance synchronous motors, subsequent verification of application of the development environment for design of the reluctance synchronous motor 15kW and verification of its functionality in Maxwell 3D program.

Obsah:

Úvod.....	- 1 -
1 Vývojové prostředí Ansys Electronics	- 2 -
1.1 Grafické prostředí.....	- 4 -
1.2 Možnosti postupu návrhu elektrického stroje.....	- 6 -
1.2.1 Postup tvorby návrhu pomocí RMxpert	- 6 -
1.2.1.1 Spuštění simulace v RMxpert	- 8 -
1.2.1.2 Přenos modelu z RMxpert do ostatních řešičů.....	- 8 -
1.2.2 Způsob výpočtu simulací Maxwell 2D/3D.....	- 9 -
1.2.2.1 Postup tvorby návrhu pomocí „Used Defined Primitive“ (UDP).....	- 9 -
1.2.2.2 Nastavení modelu	- 10 -
1.2.2.3 Zobrazení výsledků	- 11 -
2 Reluktanční synchronní motor.....	- 13 -
2.1 Synchronní stroje.....	- 13 -
2.1.1 Princip působení.....	- 13 -
2.1.2 Princip reluktance.....	- 14 -
2.1.3 Synchronní a reluktanční moment.....	- 15 -
2.1.4 Vytváření hladkého momentu	- 17 -
2.2 Typy reluktančních motorů	- 18 -
2.3 Reluktanční synchronní motor (RSM)	- 18 -
2.3.1 Princip RSM.....	- 18 -
2.3.2 Moment RSM.....	- 18 -
2.3.3 Rotor RSM	- 19 -
2.3.4 Základní typy rotorů.....	- 20 -
2.3.4.1 Základní typy axiálních a radiálních rotorů.....	- 20 -
2.3.4.2 Axiálně vrstvený rotor.....	- 22 -
2.3.4.3 Radiálně vrstvený rotor	- 26 -
2.4 Porovnání RSM s ASM.....	- 29 -
2.4.1 Třídy účinnosti [19].....	- 29 -
2.4.2 Porovnání motorů.....	- 30 -
3 Návrh reluktančního synchronního motoru	- 32 -
3.1 Návrh RSM motoru v Maxwell 3D pomocí „User Defined Primitive“	- 32 -
3.1.1 Návrh statoru	- 32 -
3.1.2 Návrh rotoru	- 35 -
3.1.3 Návrh vinutí.....	- 37 -

3.2	Návrh RSM pomocí RMxpert	- 39 -
4	Simulace funkce motoru	- 41 -
4.1	Nastavení simulace pro Magnetostatic	- 42 -
4.1.1	Nastavení hranice výpočtu	- 42 -
4.1.2	Nastavení buzení	- 42 -
4.1.3	Nastavení pro výpočet indukčností	- 44 -
4.2	Nastavení pro transientní simulaci	- 46 -
4.2.1	Nastavení buzení	- 46 -
4.2.2	Nastavení časových podmínek simulace	- 47 -
4.2.3	Nastavení pohybu rotoru	- 48 -
4.2.4	Nastavení výpočtu magnetické indukce ve vzduchové mezeře.....	- 49 -
4.3	Zobrazení výsledků simulace	- 49 -
5	Analýza vypočtených dat.....	- 51 -
5.1	Výsledky magnetostatické simulace.....	- 51 -
5.1.1	Natočení rotoru do podélné a příčné polohy	- 51 -
5.1.2	Magnetická indukce a pole statorového vinutí	- 51 -
5.1.3	Indukčnost motoru.....	- 55 -
5.2	Výsledky transientní simulace.....	- 56 -
5.2.1	Proudy, moment a magnetická indukce ve vzduchové mezeře	- 56 -
5.2.2	Určení účinníku	- 60 -
5.2.3	Ztráty	- 61 -
5.2.3.1	Návrh asynchronního motoru	- 62 -
5.3	Rotor s „Cut-Off“ strukturou.....	- 64 -
5.3.1	Průběhy proudů a momentu.....	- 65 -
5.4	Snížení pulzace momentu zvětšením vzduchové mezery.....	- 67 -
6	Závěr.....	- 69 -
7	Literatura	- 71 -
8	Přílohy	- 73 -
8.1	Třídy účinnosti dle výkonu a počtu pólů stroje [19]	- 73 -
8.2	Nastavení „Machine“ a vinutí v RMxpert.....	- 74 -
8.3	Propojení statorových cívek dle RMxpert.....	- 74 -
8.4	Zobrazení silokřivek magnetického toku pro různé polohy rotoru	- 75 -
8.5	Mapy pole pro rotor s „Cut-Off“ strukturou v příčné ose	- 76 -
8.5.1	Mapa pole magnetické indukce	- 76 -
8.5.2	Silokřivky magnetického toku statoru.....	- 76 -
8.6	Tvary rotorů RSM	- 77 -

Seznam obrázků a tabulek:

Obr. 1 - Grafické prostředí Workbench.....	- 3 -
Obr. 2 - Grafické prostředí Electronics 18.0	- 4 -
Obr. 3 - Jednotlivá návrhová prostředí a řešiče	- 5 -
Obr. 4 - Základní geometrické útvary	- 6 -
Obr. 5 - Typy motorů v RMXprt.....	- 6 -
Obr. 6 - "Strom" projektu	- 7 -
Obr. 7 - Grafické výsledky simulace v RMXprt	- 7 -
Obr. 8 - Validace projektu.....	- 8 -
Obr. 9 - Základní nastavení modelu stroje	- 8 -
Obr. 10 - Tvorba 2D/3D modelu	- 9 -
Obr. 11 - a) objekty UDP; b) možnosti importu geometrie.....	- 10 -
Obr. 12 - Stromový diagram návrhu Obr. 13 - Nastavení „Boundaries“	- 11 -
Obr. 14 - Tvorba výsledných grafů	- 12 -
Obr. 15 - Princip synchronního stroje	- 13 -
Obr. 16 – Objekt a) s anizotropní geometrií, b) s izotropní geometrií v magnetickém poli ψ - princip tvorby momentu [7].....	- 14 -
Obr. 17 – Průběh momentu synchronního stroje s vyniklými póly [6]	- 15 -
Obr. 18 - Synchronní stroje s vyjádřenými póly a) na rotoru, b) na rotoru i statoru [8]	- 16 -
Obr. 19 - Radiálně vrstvený rotor RSM	- 19 -
Obr. 20 - Možné typy rotorů RSM a) vystouplé póly, b) axiálně vrstvený rotor c) radiálně vrstvený rotor [10]	- 20 -
Obr. 21 – Hlavní typy konstrukcí rotoru RSM [8]	- 21 -
Obr. 22 - Axiálně vrstvený rotor	- 23 -
Obr. 23 – Optimální poměr tloušťky plechu a magnetické bariéry.....	- 24 -
Obr. 24 - Radiálně vrstvené rotory RSM [16].....	- 26 -
Obr. 25 - a) rotor s "Cut-Off" strukturou, b) rotor s uzavřenou poslední bariérou.....	- 27 -
Obr. 26 - Parametry optimalizace tvaru magnetických bariér [18]	- 28 -
Obr. 27 - Omezení toku do rotoru [7]	- 28 -
Obr. 28 - Omezení pulzace momentu [18]	- 29 -
Obr. 29 - Třídy účinnosti v závislosti na výstupním výkonu [19].....	- 29 -
Obr. 30 – Porovnání ASM motoru a RSM a) ztráty; b) velikosti motorů stejného výkonu [2]	- 30 -
Obr. 31 - Porovnání účinnosti asynchronního motoru a RSM při napájení z měniče [2]	- 31 -
Obr. 32 - Základní nastavení vloženého objektu.....	- 32 -
Obr. 33 - Materiálové parametry	- 33 -

Obr. 34 - Zadání rozměrů statoru	- 34 -
Obr. 35 - Typy statorových drážek.....	- 34 -
Obr. 36 - Zadání parametrů rotoru	- 35 -
Obr. 37 - Silokřivky magnetického pole statoru v pevném materiálu.....	- 36 -
Obr. 38 - Rozměry rotoru [21]	- 36 -
Obr. 39 - Vymodelovaný stator a rotor RSM ve 3D	- 37 -
Obr. 40 - Zadání parametrů statorového vinutí	- 37 -
Obr. 41 - Duplikace statorových cívek.....	- 38 -
Obr. 42 - Stator s kompletním vinutím.....	- 38 -
Obr. 43 - Vytvoření RSM motoru v RMxpřt.....	- 39 -
Obr. 44 - Vygenerované rozložení vinutí	- 40 -
Obr. 45 - Model RSM v RMxpřt.....	- 40 -
Obr. 46 - Nastavení rozměrů bariér.....	- 40 -
Obr. 47 - Tvorba 2D modelu řezem	- 41 -
Obr. 48 - Řez motoru.....	- 41 -
Obr. 49 - Nastavení regionu výpočtu	- 42 -
Obr. 50 - Postup rozdělení jednotlivých cívek na samostatné objekty	- 42 -
Obr. 51 - a) označení cívek fáze A pozitivní; b) nastavení proudového buzení jedné cívky fáze A	- 43 -
Obr. 52 - Validace projektu v Maxwell.....	- 44 -
Obr. 53 - Nastavení "Matrix"	- 45 -
Obr. 54 - Nastavení parametrické analýzy	- 45 -
Obr. 55 - a) Nastavení "Coil"; b) Nastavení vinutí "Winding" jednotlivých fází	- 46 -
Obr. 56 - a) Nastavení konečného času a kroku výpočtu; b) Nastavení ukládání obrázků polí	- 47 -
Obr. 57 - Nastavení "Motion Setup"	- 48 -
Obr. 58 - Nastavení "Mechanical".....	- 48 -
Obr. 59 - Nastavení zobrazení magnetické indukce na křivce	- 49 -
Obr. 60 - a) Cesta k zobrazení polí; b) Nastavení zobrazení obrázku pole.....	- 50 -
Obr. 61 - Natočení rotoru do podélné polohy.....	- 51 -
Obr. 62 - Mapa pole magnetické indukce v podélné ose.....	- 52 -
Obr. 63 - Mapa pole magnetické indukce v příčné ose	- 52 -
Obr. 64 - Silokřivky magnetického toku statoru v podélné ose	- 53 -
Obr. 65 - Silokřivky magnetického toku statoru v příčné ose.....	- 54 -
Obr. 66 - BH křivka materiálu DW_310_35.....	- 54 -
Obr. 67 - Výpočetní síť	- 55 -
Obr. 68 - Průběh indukčnosti v závislosti na úhlu natočení rotoru $L_d/L_q=4$	- 55 -
Obr. 69 - Průběh proudu pro zátěžný úhel 0°	- 56 -

Obr. 70 - Průběh momentu pro zátěžný úhel 0°	- 57 -
Obr. 71 - Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro zátěžný úhel 0°	- 58 -
Obr. 72 - Průběh proudu pro zátěžný úhel 10 deg.....	- 58 -
Obr. 73 - Průběh momentu pro zátěžný úhel $\delta=10$ deg.....	- 59 -
Obr. 74 - Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro zátěžný úhel 10 deg	- 59 -
Obr. 75 - Mapa pole magnetické indukce pro jmenovité zatížení (zátěžný úhel 10 deg)	- 60 -
Obr. 76 - Průběh napájecího napětí a proudu fáze A	- 60 -
Obr. 77 – Ztráty RSM motoru pro jmenovité zatížení	- 61 -
Obr. 78 - 2D řez asynchronním motorem.....	- 62 -
Obr. 79 - Průběh proudů asynchronního motoru.....	- 63 -
Obr. 80 – Ztráty asynchronního motoru	- 63 -
Obr. 81 - Pole magnetické indukce rotoru s „Cut-Off“ strukturou pro podélnou polohu	- 64 -
Obr. 82 - Siločivky magnetického toku statoru v podélné ose s „Cut-Off“ rotorem.....	- 65 -
Obr. 83 – Průběh proudů motoru s „Cut-Off“ strukturou pro zátěžný úhel 10 deg	- 65 -
Obr. 84 – Průběh momentu motoru s „Cut-Off“ strukturou pro zátěžný úhel 10 deg.....	- 66 -
Obr. 85 - Ztráty RSM motoru s „Cut-Off“ rotorem pro zátěžný úhel 10 deg	- 66 -
Obr. 86 - Průběh proudů pro motor se zvětšenou vzduchovou mezerou	- 67 -
Obr. 87 - Průběh momentu pro motor se zvětšenou vzduchovou mezerou.....	- 67 -
Obr. 88 - Průběh ztrát pro motor se zvětšenou vzduchovou mezerou.....	- 68 -

Seznam použitých symbolů

Značka	Veličina	Jednotky
f	frekvence	[Hz]
p	počet pólpárů	[-]
n	otáčky	[-]
δ	zátěžný úhel	[°], [deg]
m	počet fází	[-]
U	napětí	[V]
U_{if}	indukované napětí	[V]
X_d	reaktance v podélné ose	[Ω]
X_q	reaktance v příčné ose	[Ω]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
P	výkon	[W]
M	moment	[Nm]
L	indukčnost	[H]
L_d	indukčnost v podélné ose	[H]
L_q	indukčnost v příčné ose	[H]
i	proud	[A]
ξ	poměr reaktancí	[-]
a_i	magnetický izolační poměr	[-]
w_i	tloušťka magnetické bariéry	[mm]
w_{pl}	tloušťka plechu	[mm]
r	poloměr rotoru	[mm]
N_{pl}	počet vrstev (plech+bariéra) na pól	[-]
$L_{\mu d}, L_{\mu q}$	magnetizační indukčnosti	[H]
τ_p	pólová rozteč	[mm]
δ_{vz}	vzduchová mezera	[mm]
R_m	magnetický odpor	[H ⁻¹]
Λ_d	magnetická vodivost, permeance	[H]
μ_r	relativní permeabilita	[H/m]
τ_d	drážkový rozestup	[mm]
n_s	počet statorových drážek na pólpár	[-]
q	počet statorových drážek na pól a fázi	[-]
n_r	počet rotorových drážek na pólpár	[-]
c	šířka žebra rotoru	[mm]

α	úhel bariérového „hrotu“	[°]
b	šířka bariéry	[mm]
k_h	ztrátový činitel	[-]
k_c	ztrátový činitel	[-]
t	čas	[s]
φ	fázový posun	[°], [deg]
R	odpor	[Ω]
τ	časová konstanta	[s]
B	magnetická indukce	[T]
A	vektorový potenciál	[Wb/m]
H	intenzita magnetického pole	[A/m]

Úvod

Zvyšování účinnosti elektrických motorů je jedno z neaktuálnějších témat, protože elektrické motory spotřebují v průmyslu více než 64 % [1] elektrické energie. Díky pokroku v polovodičových součástkách výrobci směřují k rozvoji motorů založených na principu změny reluktance, speciálně reluktančních synchronních motorů.

Proto se stal jedním z nejdiskutovanějších motorů posledních desetiletí právě reluktanční synchronní motor. Ten na sebe strhnul pozornost především díky minimalizaci ztrát a výraznému zvýšení celkové účinnosti. Koncepce tohoto motoru eliminuje ztráty v rotorové části a tím snižuje celkové ztráty až o 10 % oproti nejpoužívanějšímu střídavému asynchronnímu motoru [2].

Reluktanční synchronní motor (RSM) má totožný stator jako typický asynchronní stroj. Má třífázové střídavé vinutí umístěné v drážkách po obvodu statoru. Rotor stroje je však odlišný. Nenachází se na něm žádné vinutí, což je důvod, proč v rotoru nevznikají ztráty jako u asynchronního stroje. Magnetický obvod rotoru RSM je obdobně jako u asynchronního složen z lisovaných plechů, které mají speciální konstrukci. Tato konstrukce nejvíce ovlivňuje vlastnosti stroje. Jedná se o vhodný geometrický tvar magnetických bariér, které jsou do rotorových plechů vyřezány. Tyto bariéry mají za úkol bránit průchodu magnetického toku v příčné ose a umožnit mu volný průchod v ose podélné. Tím se dosahuje značného rozdílu reluktance v podélné a příčné ose, což způsobuje otáčení rotoru v točivém poli vybuzeném statorovým vinutím, kdy se rotor snaží zaujmout pozici s co nejmenším odporem.

Motor musí být rozbíhán za pomoci změny frekvence, je tedy nezbytné k jeho rozběhu použít frekvenční měnič. Z toho plyne nejideálnější aplikace v oblasti, kdy je potřeba přesně řídit rychlost otáčení. Díky použití měniče frekvence se dosahuje dalšího zvýšení efektivity, a to snížením množství odebírané elektrické energie.

Tento typ motoru je tedy schopný při menších rozměrech dodat stejný výkon jako asynchronní motor, z čehož je jasné, že dosahuje značně vyšší účinnosti. Běžné RSM motory dosahují třídy účinnosti IE5, přičemž společnost ABB letos představila motor s účinností dokonce IE6 [3].

Cílem této práce je aplikace vývojového prostředí Ansys pro návrh reluktančního synchronního motoru. Vzhledem ke složitosti a rozsáhlosti programu je nejprve nutné se s ním podrobně seznámit. Před vlastním návrhem stroje je nutné si osvojit práci s návrhovým prostředím, kompletním nastavením parametrů simulace, práci s řešiči a v neposlední řadě možnostmi zobrazení výsledků. Pro návrh funkčního modelu je nutné znát aspoň základní problematiku konstrukce tohoto typu stroje. Jedná se především o optimalizaci geometrie, která je předmětem bádání mnoha vědeckých týmů. Po zvládnutí výše uvedených bodů bude proveden návrh samotného motoru a následně ověření jeho funkce v podprogramu Maxwell. Po úspěšné simulaci budou dosažené výsledky zhodnoceny.

1 Vývojové prostředí Ansys Electronics

V této práci bude probíhat návrh a následné simulace s využitím programu od společnosti Ansys.

Firma Ansys nabízí obrovské množství programů pro většinu oborů techniky. K dispozici jsou například programy pro mechaniku (pevnost, pružnost, únavu a životnost těles z různých materiálů), analýzu proudění tekutin a plynů (přenos tepla, proudění částic, simulace namrzání/zamrzání) a další multifyzikální výpočty, simulace a v neposlední řadě také programy pro elektrotechniku. Balík programů pro polovodičovou techniku, který navrhuje komplexně integrované obvody, nabízí svými nástroji modelování s předepsanou přesností a výkonem, ale zároveň se zachováním napěťové integrity a spolehlivosti, neboť bere v úvahu různé aspekty od elektrostatických výbojů až po tepelné jevy a elektromigraci. [4][5]

V této práci bude využíván program Ansys Electronics, který má naše univerzita nově zakoupený v Campus licenci volně stažitelné pro řádné studenty a akademické pracovníky.

V době zadání diplomové práce byl nejnovější program Electronics ve verzi 17.0, během práce byla vydána nová verze pod označením Electronics 18.0. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsme se shodli na přechodu na nejnovější programovou verzi, která není revoluční změnou oproti předešlé verzi, ale pouze další malou evolucí. Nabízí však určitá vylepšení (bude popsáno později) a přidává možnosti, které jsou v této práci využitelné, proto budu popisovat vývojové prostředí nejnovější verze.

Program Electronics je nástupcem starších verzí programu Maxwell 3D, který existoval pod tímto názvem do verze 16.0. Program Electronics 18.0 je tedy druhou verzí po inovaci, která implementuje několik programů do jednoho celku. Tyto programy jsou určeny pro elektronické, elektromechanické a elektromagnetické simulace. Software umožňuje prvotní simulaci multifyzikálních úloh a následnou optimalizaci od jednoduchých komponent až po velmi složité funkční celky. Umožňuje analýzu zařízení jako jsou například elektrické motory, transformátory, senzory, aktuátory, magnety atd. Umožňuje řešení elektromagnetického a elektrického pole stacionárně, v tzv. frekvenční oblasti, nebo nestacionární časové oblasti na 2D nebo 3D geometrii.

Program Electronics se tedy skládá z několika podprogramů, které jsou určeny k řešení vysokofrekvenčních simulací (Slwawe, HFSS, Savant, Q3D Extractor), nízkofrekvenčních simulací (Maxwell, RMXprt, PExprt) a systémového řešiče Simplorer. Stručně si popíšeme, k čemu jednotlivé programy slouží. Slwawe je určený k analýze plošných spojů a integrovaných obvodů, u kterých umožňuje identifikovat problémy signálové a napájecí integrity. HFSS slouží k simulacím vysokofrekvenčních elektromagnetických polí, simulací antén, radarů, mikrovlnných prvků atd. Program Savant zkoumá vyzařování antén u velkých objektů, čehož se dá využít například u armádní techniky jako jsou letadla a velké lodě. Q3D Extractor je specializovaný na extrakci

elektromagnetických parametrů sběrnic, kabelových svazků, pouzder elektrických součástek i dotykových displejů. [4][5]

Nyní se dostávám k programům, které budou v této práci využívány. Maxwell simuluje nízkofrekvenční elektromagnetická pole pomocí metody konečných prvků. RMXprt slouží k rychlému návrhu a optimalizaci elektrických točivých strojů. PExprt umožňuje návrh magnetických obvodů. Simplorer je základním programem, který úzce spolupracuje se simulačními programy Maxwell, RMXprt a PExprt, zahrnuje elektrické obvody, stavové modely a automaty, bloková schémata a algebraické i diferenciální rovnice.

Výhody programů Ansys [4]:

- Spolupráce s ostatními programy, jako je možnost importu geometrií v CAD formátech, nebo souborů ze Simulinku z Matlabu.
- Přítomnost generátoru výpočetní sítě, který funguje v autoadaptivním procesu (na libovolné geometrii je vygenerována kvalitní síť s možností lokálního zjemnění).
- Rozsáhlá databáze materiálů, u kterých lze upravovat parametry nebo vytvořit vlastní.
- Možnost zahrnutí nelinearity materiálů – např. BH křivka, hysterezní smyčka, skin efekt atd.

S licenci pro Ansys Mechanical je možné simulace rozšířit o teplotní a napětově-deformační analýzy. Toto propojení je asi největší důvod, proč z nepřeberného množství simulačních programů zvolit právě řešení od Ansys. Jedná se o program Workbench, který do jednoho uživatelského prostředí implementuje všechny programy od této společnosti. Na pracovní plochu (Obr. 1) se přidávají jednotlivé programy jako bloky, které se pak propojují s ostatními programy.

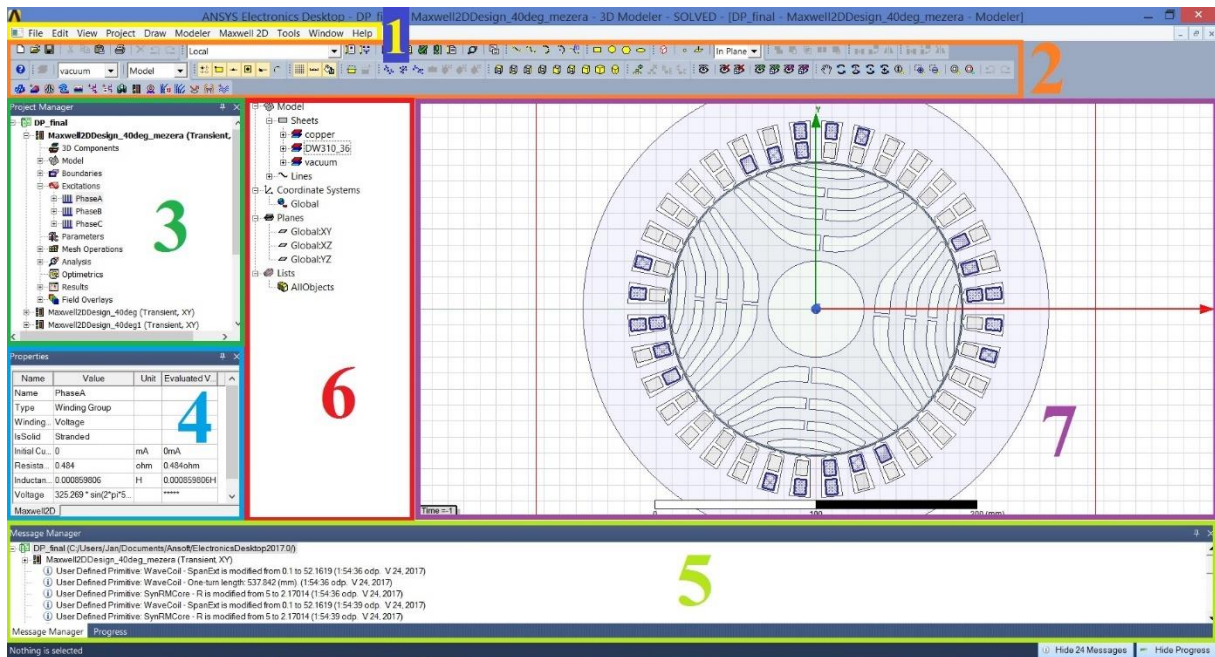


Obr. 1 - Grafické prostředí Workbench

Tímto spojením je možné docílit například komplexního návrhu elektrického stroje včetně napájení, výpočtu oteplení a návržení ideálního chlazení, analyzovat únavu materiálu a deformace při mechanickém namáhání a provést mnoho dalších analýz a simulací. Důkazem velké komplexnosti programu může být to, že byl využit i k návrhu nejnovějšího amerického stíhacího letounu F-35. [22]

1.1 Grafické prostředí

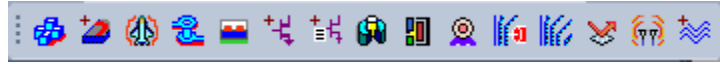
S programy od Ansys pracuji od verze 16 a od té doby prochází grafické prostředí malými změnami, které zlepšují přehlednost a zpříjemňují práci, ať už se jedná třeba jen o volbu lepších barev, grafickou texturu ikonek nebo vhodné oddělení jednotlivých pracovních oken. Nyní budu popisovat grafické prostředí verze Electronics 18.0, které oproti verzi 17.0 dostalo v základním nastavení pouze nepatrnou úpravu v zobrazování systémových zpráv a průběhu simulace. Uživatelské prostředí je vidět na (Obr. 2), dále budou popsány jednotlivé sekce programu.



Obr. 2 - Grafické prostředí Electronics 18.0

1 – Kontextové menu – Obsahuje volby pro základní ovládání programu, jak je zvykem u všech běžných počítačových programů. Jsou zde umístěny možnosti pro základní operace s projekty (nový, uložit, exit...). Menu „View“ nabízí možnosti vlastní úpravy nástrojů. „Project menu“ slouží ke zvolení programového prostředí, na výběr jsou návrhová prostředí programů, jež byly popsány v předešlé kapitole (RMxpvt, Maxwell 2D/3D...). „Draw“ slouží ke kreslení objektů od základních 2D objektů až po složité 3D tvary, které se vybírají ze sekce předdefinovaných uživatelských primitiv. „Modeler“ slouží k importu a exportu dodatečných souborů a k měření veličin modelovaných objektů. Maxwell 2D/3D již obsahuje možnosti nastavení proměnných samotného projektu, umožňuje změnu programového řešiče, kontroluje nastavení všech potřebných nastavení a spouští samotnou simulaci. Toto menu také obsahuje potřebnou nápovědu, bez které se nelze obejít. K naší smůle je pouze v anglickém jazyce.

2 – Panel nástrojů – Obsahuje palety základních ovládacích nástrojů, které jsou potřeba pro práci se simulovaným objektem. Ty jsou přednastavené a podle zvoleného řešiče se upravují. Samozřejmě je možná i jejich úprava uživatelem. Obsažené nástroje slouží k urychlení práce, kdy se není potřeba složitě dostávat k jednotlivým možnostem v kontextovém menu. Je možné odtud přidat nové návrhové prostředí do otevřeného projektu. Každé prostředí je reprezentováno svou ikonkou.



Obr. 3 - Jednotlivá návrhová prostředí a řešiče

3 – Project Manager – V tomto okně se nachází rozpracované projekty, které jsou strukturované do jednotlivých „stromů“. Po rozkliknutí projektu se zobrazí všechna návrhová prostředí, která jsou v projektu použita. O další krok dále se již nachází samotná nastavení jednotlivých parametrů, jako je například buzení, možnosti řešení – krok, start a stop čas, výsledné obrázky simulací, grafů atd.

4 – Properties – Toto okno slouží k zobrazování základních parametrů aktuálně zvoleného objektu, zobrazuje zadané rozměry (rotoru, statoru...), nebo číselné nastavení parametrů simulace, jako je například hodnota zvoleného buzení. Díky tomuto oknu je možné rychleji měnit nebo kontrolovat zadané hodnoty. Je ovšem zapotřebí dát si pozor, jelikož se zde nezobrazují veškeré možnosti. Pro kompletní zadání všech hodnot je nutné otevřít jednotlivé komponenty, kde se zobrazí všechny možnosti nastavení.

5 – Message Manager a Progress – Zde se nachází zmiňovaná drobná změna v uživatelském prostředí, kdy ve verzi 17.0 byla okna „Message Manager“ a „Progress“ samostatná a zobrazena vedle sebe, každé na půlku obrazovky. Nyní se jejich obsah zobrazuje na celou šířku a volí se mezi nimi v levém dolním rohu. „Message Manager“ je takový komunikační prostředek mezi uživatelem a programem. Program zde píše informační hlášky a upozorňuje na případné nedostatky a také „error“, kvůli kterým nebylo možné danou operaci provést. „Progress“ znázorňuje časový průběh simulace.

6 – Okno návrhu – Obsahuje všechny objekty, které byly v projektu vytvořeny. Praktické je dělení komponent ze stejného materiálu pod sebe a opět zvolená stromová struktura. Zde se dá otevřít kompletní nastavení jednotlivých částí, nebo dohledat a označit malý objekt, který by bylo obtížné hledat v pracovním okně. Výhodou je také možnost označení jednotlivých rovin „Planes“ jako XY, XZ a YZ, což značně usnadní práci.

7 – Pracovní okno – Okno, ve kterém probíhá samotný návrh a následná úprava vytvořeného stroje.

1.2 Možnosti postupu návrhu elektrického stroje

Pro vytvoření modelu elektrického stroje existuje více možností. V práci bude návrh elektrického motoru tvořen pomocí modulu RMXprt a pomocí předdefinovaných uživatelských primitiv („User Defined Primitive“ – UDP). Pro kreslení základních geometrických útvarů slouží sada objektů v panelu nástrojů (Obr. 4).

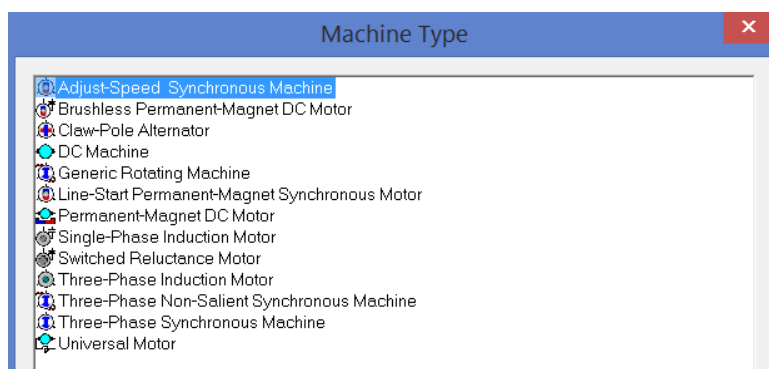


Obr. 4 - Základní geometrické útvary

Obdobně pak volba „Draw“ a výběr příslušného objektu. Tyto základní geometrické útvary se pro tvorbu tak složitého stroje, jako je elektrický motor, nepoužívají. Slouží například k nakreslení regionu výpočtu, nebo křivky, na které se má počítat nějaká veličina, neboť při vytváření grafu se dá zvolit jako parametr určitá geometrie, na které má probíhat simulace daného průběhu.

1.2.1 Postup tvorby návrhu pomocí RMXprt

Jak plyne ze samotného názvu tohoto návrhového prostředí (RotatingMachineExpert), slouží tento modul k rychlému návrhu točivých elektrických strojů. Na výběr jsou všechny základní typy motorů.

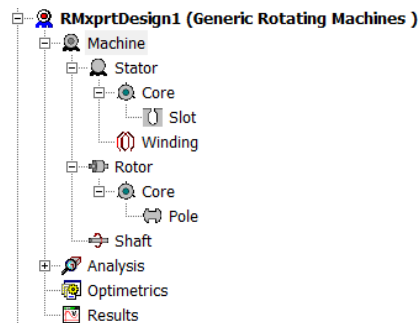


Obr. 5 - Typy motorů v RMXprt

Po vložení RMXprt designu se otevře okno s výběrem elektrických strojů, které jsou k dispozici (Obr. 5). Nechybí zde žádný základní typ, jako je stejnosměrný motor v několika provedeních, stejně tak i asynchronní a synchronní, dále i několik obecných typů motorů jako „Universal Motor“ a „Generic Rotating Machine“. Zde se nachází asi nejdůležitější vylepšení verze 18.0 oproti 17.0, kvůli kterému bylo vhodné na nejnovější verzi přejít. Ve verzi 17.0 totiž RMXprt neumožňoval návrh reluktančního synchronního motoru (RSM), který je tématem této diplomové práce. V nejnovější verzi byla pod typ „Generic Rotating Machine“ přidána možnost tvorby právě RSM motorů. Návrhu samotného modelu RSM bude věnována podrobně další kapitola. U tohoto typu motoru lze vytvořit i motor s vnějším rotorem.

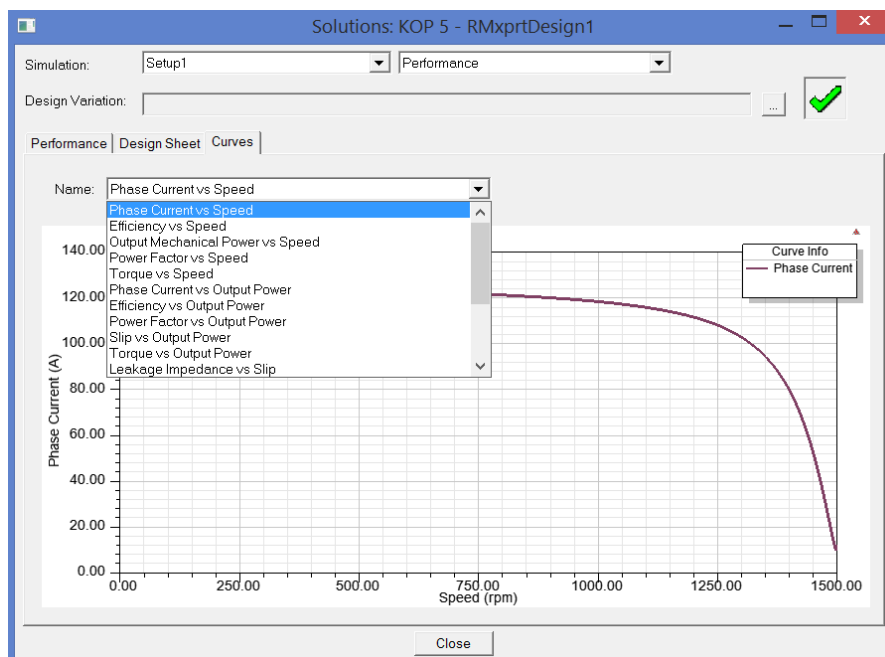
Grafika uživatelského prostředí se po zvolení modulu RMxprt změní tak, že se sníží a změní počet možností v panelu nástrojů a v kontextovém menu se změní volba Maxwell 2D na RMxprt a místo „Draw“ přibude možnost „Machine“.

Po zvolení žádaného typu motoru se do okna „Project Manager“ vloží složka s RMxprt designem, ve které se dle typu stroje nachází jednotlivé komponenty stroje s možností zadání rozměrů (Obr. 6). Dále se postupu návrhu nebudu věnovat, protože podrobný postup bude uveden v dalších kapitolách.



Obr. 6 - "Strom" projektu

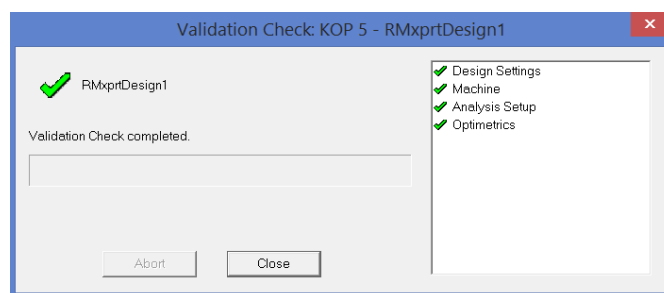
RMxprt tvoří modely strojů pouze ve 2D a v drátovém modelu. Po nastavení všech potřebných parametrů a provedení validace projektu je možné simulaci spočítat. Poté je možné celý model přenést do prostředí ostatních modulů jako je Maxwell 3D, kde se vytvoří plnohodnotný 3D model stroje, nebo 2D řez. Výstupem simulace v RMxprt je mnoho dat, základní grafy (Obr. 7) a „Datasheet“ (pod názvem „Design Sheet“) stroje s kompletními daty o motoru (rozměry, výkony, napájení, jmenovité hodnoty atd.). Nachází se zde i velké množství vypočítaných dat, jako je například účinnost, ztráty v jednotlivých elementech atd.



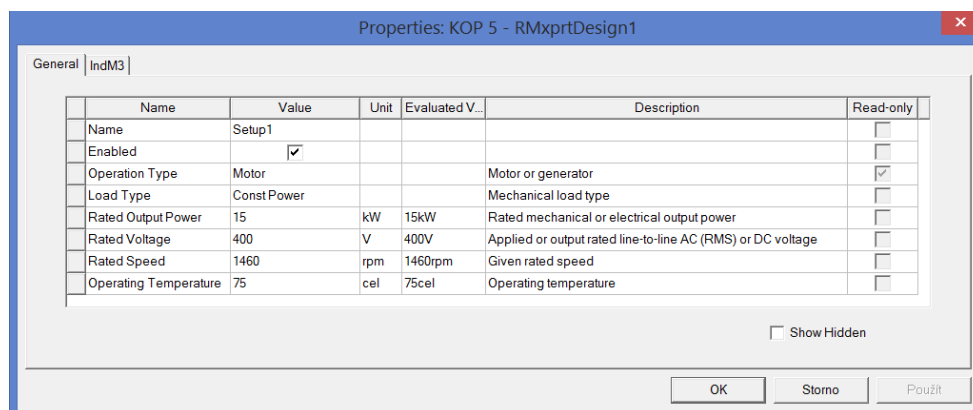
Obr. 7 - Grafické výsledky simulace v RMxprt

1.2.1.1 Spuštění simulace v RMXprt

Před samotným spuštěním je potřeba provést validaci projektu, což ověří, zda jsou zadány všechny potřebné parametry. Validace se vyvolá tlačítkem v panelu nástrojů. Poté se otevře okno, kde jsou vidět jednotlivé požadavky a jejich vyhovující stav (Obr. 8). Kontrolováno je nastavení designu, pod kterým se skrývají veškeré proměnné. Další položkou je „Machine“, kde se kontroluje, zda jsou zadány správně rozměry všech komponent. V „Analysis Setup“ jsou nastaveny základní parametry motoru, jako výkon stroje, jmenovité napětí, otáčky a provozní teplota (Obr. 9). V další záložce „IndM3“ se nastaví napájecí frekvence a zapojení vinutí (Obr. 9). V „Optimetrics“ se nastavuje pohyb rotoru, výchozí a konečná poloha a s jakým krokem se bude rotor otáčet.



Obr. 8 - Validace projektu



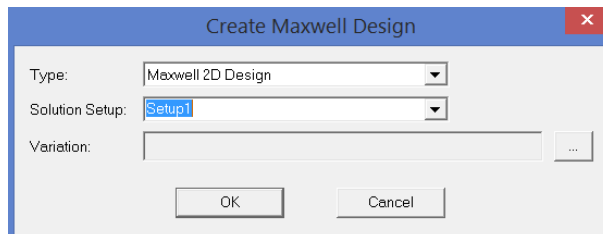
Obr. 9 - Základní nastavení modelu stroje

Po úspěšném proběhnutí validace je možné celou simulaci spustit. To se provede tlačítkem v panelu nástrojů nebo v záložce **RMXprt** → **Analyze all**. Po úspěšném výpočtu je pak možné zobrazit výsledky (Obr. 7).

1.2.1.2 Přenos modelu z RMXprt do ostatních řešičů

Po základní simulaci v RMXprt je možné model „zhmotnit“ v programu Maxwell 3D, kde se vytvoří reálný a kompletní 3D model celého stroje. Nebo je možné vytvořit jen 2D řez. Pro simulace je 2D řez dostačující, neboť výrazně zkrátí dobu výpočtu. Ve 3D se zpravidla nepočítá model větší, než je čtvrtinový, nebo osminový řez, protože výpočet by trval neúnosně dlouho. Nebo je potřeba vlastnit výkonnou výpočetní stanici.

Přenos modelu se udělá jednoduše v možnosti RMXprt v kontextové liště, kde se zvolí **Analysis Setup** → **Create Maxwell Design**, kde se v následujícím okně (Obr. 10) v poli „Type“ zadá 2D, nebo 3D Design, který se vytvoří podle již spočítaného „Setup 1“, který byl nastaven v „Analysis Setup“.



Obr. 10 - Tvorba 2D/3D modelu

Poté se vytvoří kompletní model v návrhovém prostředí Maxwell 2D/3D.

1.2.2 Způsob výpočtu simulací Maxwell 2D/3D

Pokud je model přenesený do prostředí Maxwell, je potřeba si rozmyslet, co vlastně budeme chtít analyzovat, zda statickou úlohu nebo přechodný děj. Maxwell disponuje dvěma základními nástroji pro řešení. Pro přechodné děje se volí řešič Transient a pro statické řešič Magnetostatic.

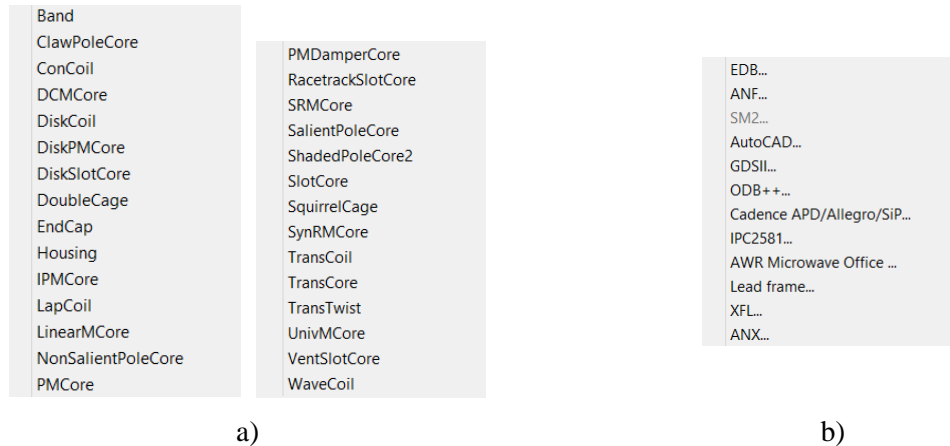
Maxwell ve 2D nebo ve 3D používá k výpočtu metodu konečných prvků (MKP). To znamená, že se Maxwellovy rovnice diskretizují na algebraické rovnice a řeší se jejich soustavy pro malé prvky. Malé prvky nám vytvoří právě již zmíněná autoadaptivní síť, neboli anglicky „Mesh“. Pomocí této sítě je počítaný objekt diskretizován a autoadaptivní se jí říká proto, že po výpočtu dochází ke kontrole, zda je výsledek dostatečně přesný. To se ověří pomocí zpětné rekonstrukce počítaného objektu. Pokud program usoudí, že výsledek postrádá onu žádanou přesnost, tak je síť v kritických místech zhuštěna a výpočet je opakován. Na druhou stranu, pokud je výsledek dost přesný, výpočet se ukončí. Programu je nutné ještě zadat okrajové podmínky, aby věděl, jakou oblast má analyzovat. To se provádí vytvořením regionu kolem zkoumaného objektu. Ve 3D je to pochopitelně například nějaký kvádr nebo koule. V Maxwell 2D se poté jedná o plošné objekty, u točivých strojů je to nejčastěji čtverec. Region se volí s určitým přesahem za hranice zkoumaného objektu a jeho velikost je na preferenci uživatele, pokud ji ovšem nezvolí tak nevhodně, že ji program nepřijme.

1.2.2.1 Postup tvorby návrhu pomocí „Used Defined Primitive“ (UDP)

Předdefinovaná uživatelská primitiva obsahují různé části točivých elektrických strojů, které lze v návrhovém prostředí Maxwell 3D použít. UDP se nachází pod volbou „Draw“ v kontextovém menu, zde se zvolí **UDP** → **RMXprt** a následně se rozvine lišta s předdefinovanými objekty (Obr. 11 a).

Jsou zde základní části elektrických strojů, jako je rotor a stator stejnosměrného motoru, asynchronního motoru i s rotorovou klecí, různé druhy vinutí („WaveCoil“ – vlnové, diskové, ...), pod možností „Housing“ se skrývá geometrie celého vnějšího obalu motoru a spousty dalších objektů. Zajímavé jsou zde předdefinované součásti reluktančních motorů, a to jádro spínaného reluktančního

motoru (SRM) a pro mou práci důležitého „SynRMCore“, což je bariérový radiálně vrstvený rotor reluktančního synchronního motoru (RSM), který bude předmětem návrhu v dalších částech práce. V dřívějších verzích byla právě tato možnost jediná, jak RSM motor vytvořit.



a)

b)

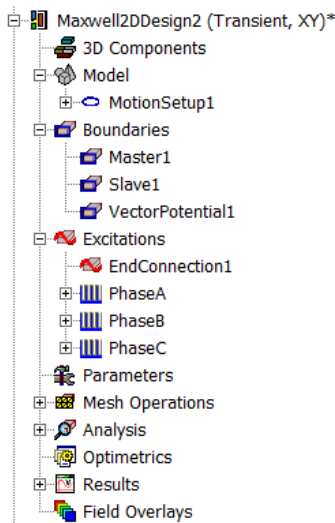
Obr. 11 - a) objekty UDP; b) možnosti importu geometrie

Pokud by nestačila ani jedna z možností vytvoření návrhu elektrického stroje, je možné využít importu geometrie z jiných programů. K možnosti importu se lze dostat přes cestu **File** → **Import**, kde se otevře možnost výběru daného souboru (Obr. 11 b).

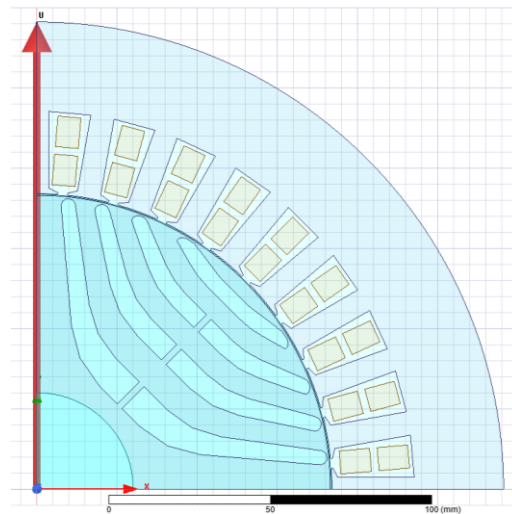
1.2.2.2 Nastavení modelu

Model má v prostředí Maxwell přístupné další položky nastavení (Obr. 12). V „Model“ se nastavuje „Motion Setup“, kde se volí typ pohybu (rotační, translační), volí se, kolem které osy se má model otáčet a zadávají se mu počáteční otáčky. Pokud chce uživatel analyzovat rozběh, nastaví výchozí otáčky na nulu, pokud chce řešit ustálený stav, zvolí jmenovité otáčky. Dále se zde volí například zátěžný moment, moment setrvačnosti a tlumení. „Boundaries“ vymezuje hranici výpočtu. Skládá se ze dvou vektorů „Master1“ a „Slave1“, které směřují například u čtvrtinového řezu ze společného počátku (Obr. 13) a svírají spolu pravý úhel (na obrázku pouze vertikální vektor). „VektorPotencial“ je poté spojnicí jejich koncových bodů, která by vznikla otáčením jednoho vektoru k druhému. U čtvrtinového řezu tedy vznikne čtvrtkruh. U celého modelu motoru může být jako „VektorPotencial“ zvolený výše zmíněný region ve tvaru čtverce. V záložce „Excitation“ se nastavuje buzení do vinutí. To může být zadáno pomocí proudové hustoty, konstantním proudem, napětím nebo může být nastaveno celým vnějším obvodem. Externí obvod může být například nějaký typ měniče. U nějakých strojů je RMXprt při exportu modelu do Maxwell schopný vnější napájecí obvod sám vytvořit. Nastavení „Analysis“ se zde liší od RMXprt. V případě přechodných dějů slouží k zadání počátečních podmínek výpočtu. To se provede nastavením počátečního a konečného času spolu s krokem, který určuje přesnost výpočtu. Čím jemnější krok, tím přesnější výsledky. Samozřejmě potom je, že s přesnějším krokem se úměrně zvyšuje doba výpočtu. Je zde možnost zadat automatickou volbu nastavení časového kroku pod možnostmi

„Adaptive Time Step“, kde se pouze zadá dolní a horní hranice, kterou jsme schopni akceptovat. Ze zkušenosti práce s programem, je však lepší nastavit pevný krok. To ovšem vyžaduje určité zkušenosti a zamyšlení se nad řešeným problémem, aby byl krok zadán vhodně. Protože jak může vést k nesprávným výsledkům příliš hrubý krok, tak příliš jemný také není zárukou lepšího výsledku i s ohledem na prodloužení doby simulace. Při zvolení řešiče Transient, pro přechodné děje, je v „Analysis“ dále možno nastavit ukládání simulací polí. Zde se také nastaví počáteční a konečný čas a krok, po kterém se mají obrázky ukládat. Pro analýzu simulace je to velmi užitečné, ale ukládání velkého počtu dat zase prodlužuje celkovou dobu simulace.



Obr. 12 - Stromový diagram návrhu



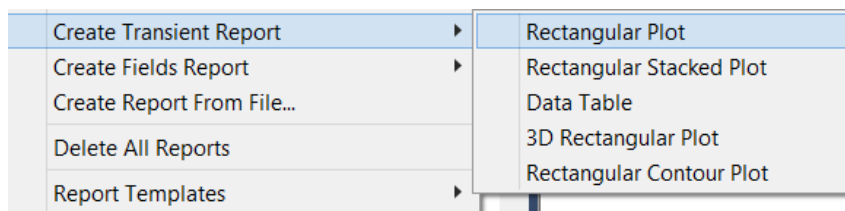
Obr. 13 - Nastavení „Boundaries“

1.2.2.3 Zobrazení výsledků

Po úspěšném dokončení simulace, která může trvat opravdu dlouho, je čas na zobrazení výsledků. Základními výsledky u točivých elektrických strojů jsou mapy pole. Je možno zobrazit magnetickou indukci, vektory proudu, magnetický tok, intenzitu pole atd. Výsledky jsou zobrazeny buď pomocí vektorů, nebo siločar, hustota je zobrazena pomocí barevné škály. Tyto výsledky prozradí prvotní informaci o správnosti návrhu. Případně je možné parametry vinutí a buzení upravit a nechat přepočítat. Výhodou transientního řešiče je, že je možné vybrat čas, ve kterém se má daná veličina zobrazit. Magnetostatic zobrazí vždy jen jeden obrázek. Další výhodou Transientu je, že ze všech nashromážděných obrázků jde sestavit animace, která vytvoří asi nejlepší obrázek například o šíření točivého střídavého pole, vytvořeného statorovým vinutím. Obrázky pole se ukládají do záložky „Field Overlays“.

Další možností zobrazení výsledků jsou grafy. Ty se nacházejí ve stromové struktuře pod záložkou „Results“. Nový graf se vytvoří pravým kliknutím a zvolením možnosti „Create Transient Report“ (případně „Magnetostatic Report“) (Obr. 14) a zde je na výběr buď „Rectangular Plot“, kdy se vytvoří jeden graf se zvolenou veličinou, nebo možnost „Rectangular Stacked Plot“, kdy je možno

umístit více grafů různých proměnných nad sebe. Tato možnost je výhodná, pokud je potřeba nějaké veličiny porovnat.



Obr. 14 - Tvorba výsledných grafů

Po zvolení typu grafu se vybírá zobrazovaná veličina. Tlačítkem „Add Trace“ se přidává do jednoho grafu více křivek. Což je způsob, jak zobrazit najednou například třífázový průběh. S vytvořenými grafy lze dále pracovat a upravovat je. Lze omezit počátky a konce os a k dispozici jsou i základní analytické nástroje, jako je výpočet střední hodnoty křivky v grafu, měření maximální a minimální hodnoty atd.

V grafech se dají zobrazit všechny důležité veličiny, jako napájecí napětí, indukované napětí, proudy, moment atd. K dalším možnostem výsledků a nastavení se dostanu v kapitole návrhu samotného motoru.

2 Reluktanční synchronní motor

2.1 Synchronní stroje

Synchronní stroj je jeden ze základních typů elektrických točivých strojů a nejvýznamnějším strojem pro výrobu elektrické energie. V tomto případě pracuje jako třífázový generátor, kterému se říká alternátor. Alternátory jsou vůbec největší vyráběné stroje dosahující výkonů přes 1000 MW. Výhodou takto velkých strojů je vysoká účinnost a menší investiční a provozní náklady vztahované na jednotku výkonu. Alternátory se dělí na 2 základní typy:

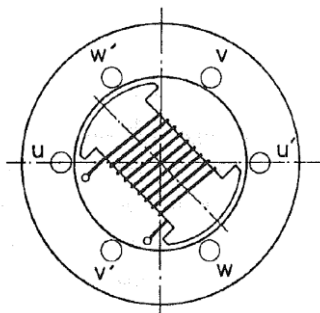
- 1) Turboalternátory – jsou alternátory nejčastěji poháněné parními, méně často plynovými turbínami na rychlost 3000 ot./min
- 2) Hydroalternátory – jsou pomaluběžné generátory poháněné vodní turbínou

Hlavní výhodou synchronních strojů je schopnost vyrábět a dodávat jak činnou, tak i jalovou energii.

Synchronní stroje se používají také jako motory, nejčastěji v průmyslových zařízeních vyžadujících velké výkony. Mezi nevýhody synchronních motorů patří obtížné spouštění, řízení rychlosti a potřeba zvláštního zdroje pro buzení. Existuje velká řada synchronních motorů např.: reaktanční, krokové, hysterezní a v neposlední řadě také reluktanční, kterým se bude věnovat tato diplomová práce. [6]

2.1.1 Princip působení

Princip synchronního stroje se dá vysvětlit podle obrázku (Obr. 15). Statorové vinutí je znázorněno pomocí trojice cívek, kde každá cívka představuje jednu fázi (cívky mají plný krok). Vzájemně jsou pootočený o 120° elektrických. Reálný stroj má vinutí totožné jako asynchronní motor.



Obr. 15 - Princip synchronního stroje

Protože synchronní stroje mívají velké výkony a vysoké napětí, pro které jsou vhodné pevné vývody, nachází se kotva na statoru. Na rotoru se nachází stejnosměrné vinutí, které je nejčastěji napájeno přes sběrací kroužky ze sítě, nebo z vlastního budiče.

Pokud stroj funguje jako generátor, tak se při otáčení rotoru indukují ve statorovém vinutí střídavá napětí, která jsou při sinusovém průběhu magnetického pole sinusová a časově posunuta o příslušných 120° .

Indukovaná napětí mají frekvenci úměrnou rychlosti rotoru a počtu pólů (pólparů) dle vztahu:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (1)$$

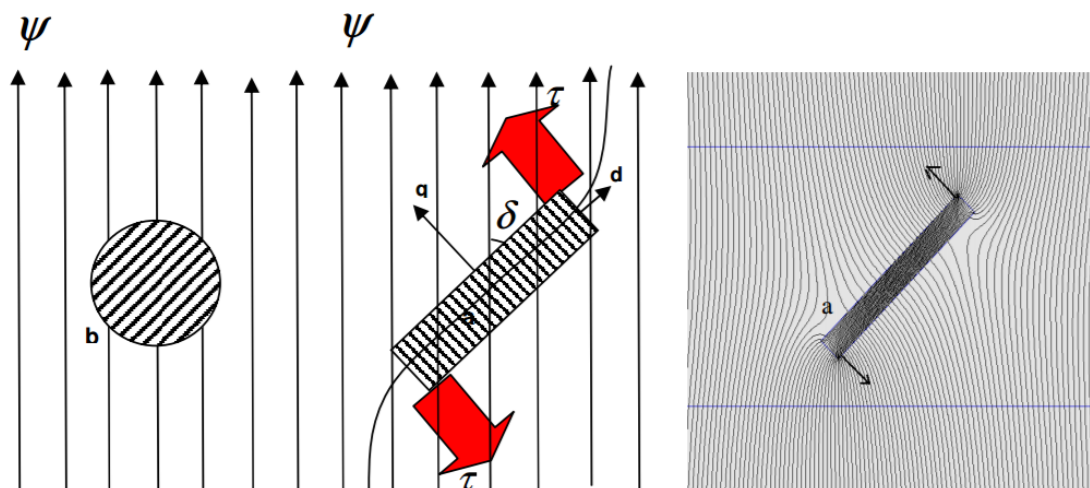
Magnetické pole, které je tvořeno statorovými proudy má stejnou rychlost jako rotor – rotor se otáčí synchronně a jeho poloha vůči poli je stálá.

Ten samý stroj může sloužit i jako motor. K tomu je zapotřebí, aby byly statorové cívky napájené trojfázovým proudem a vytvořily točivé magnetické pole. Rotor, který je buzen stejnosměrným vinutím je polem unášen a otáčí se na principu elektromagnetu. Rotor se opět otáčí synchronně.

Pokud se změní zatížení, rotor se za polem statoru bude opožďovat o konstantní zátěžný úhel δ , který se zatížením roste. Zátěžný úhel však nesmí překročit určitou hodnotu. Pak by stroj tzv. vypadl ze synchronismu a přestal se synchronně otáčet. Maximální hodnota zátěžného úhlu je 90° elektrických, při kterých je hodnota momentu maximální. Jestliže je stroj používán jako generátor, tak rotor o zátěžný úhel předbíhá pole statoru. [6]

2.1.2 Princip reluktance

Princip reluktance může být popsán z obrázku (Obr. 16). Na tomto obrázku má objekt (a) z magnetického anizotropního materiálu odlišnou reluktanci (geometrii) v ose d, než v ose q, zatímco objekt (b) z izotropního (látka jejíž vlastnosti jsou ve všech směrech stejné) magnetického materiálu má stejnou reluktanci ve všech směrech.



Obr. 16 – Objekt a) s anizotropní geometrií, b) s izotropní geometrií v magnetickém poli Ψ - princip tvorby momentu [7]

Magnetické pole Ψ , ve kterém se nachází anizotropní magnetický objekt (a), vytváří točivý moment v případě, že je úhlový rozdíl mezi osou d a polem ($\delta \neq 0$). Je zřejmé, že v případě, kdy osa d

objektu (a) není ve směru silokřivek magnetického pole, bude toto natočení způsobovat deformaci pole. Hlavní směr této deformace pole je ve směru osy q příslušného objektu.

V této situaci bude vždy existovat točivý moment, který se bude snažit snížit potencionální energii celého systému tím, že zmenší deformaci pole v ose q ($\delta \rightarrow 0$). Pokud se zátěžný úhel δ udržuje konstantní, například kontrolou zátěžného momentu, pak se elektromagnetická energie neustále převádí na energii mechanickou. [7]

2.1.3 Synchronní a reluktanční moment

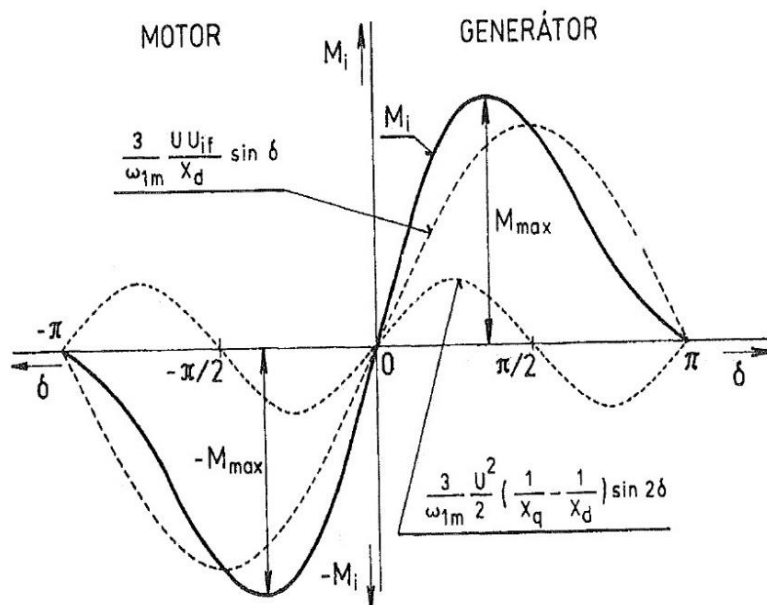
Dle [6] je výkon m-fázového motoru napájeného střídavým proudem pro statorové fázové veličiny napětí U a proud I:

$$P = m \cdot \frac{U \cdot U_{if}}{X_d} \cdot \sin \delta + m \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta \quad (2)$$

Moment stroje je pak dán vztahem:

$$M = \frac{m}{\omega_{1m}} \cdot \frac{U \cdot U_{if}}{X_d} \sin \delta + \frac{m}{\omega_{1m}} \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta \quad (3)$$

Z těchto dvou rovnic (2) a (3) vyplývá, že moment synchronního stroje s vyniklými póly má dvě složky, které jsou závislé na zátěžném úhlu δ .



Obr. 17 – Průběh momentu synchronního stroje s vyniklými póly [6]

První složka závislá na $\sin\delta$ je úměrná indukovanému napětí U_{if} , dané budícím proudem a je nepřímo úměrná podélné synchronní reaktanci X_d (resp. magnetické vodivosti v podélné ose). První člen rovnice (3) se nazývá synchronní moment.

$$M_{syn} = \frac{m}{\omega_{1m}} \cdot \frac{U \cdot U_{if}}{X_d} \sin\delta \quad (4)$$

Druhá složka, která je závislá na $\sin 2\delta$, je úměrná výrazu $\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)$ – rozdílu magnetických odporů (reluktancí) v podélné a příčné ose. Tato druhá složka rovnice (3) je tzv. reluktanční moment.

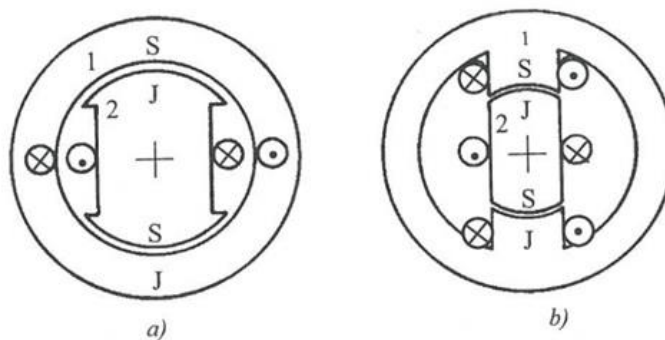
$$M_{rel} = \frac{m}{\omega_{1m}} \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cdot \sin 2\delta \quad (5)$$

Reluktanční moment není závislý na budícím proudu (neboť chybí složka U_{if}). Motory, které nemají budící vinutí a jejich moment je dán pouze reluktančním, se nazývají reluktanční motory.

Momentovou rovnicí pro synchronní stroje (3) lze zapsat obdobně pomocí indukčností jednotlivých vinutí, jak je vysvětleno v literatuře [8], ze které budu čerpat v dalším popisu. Pak je momentová rovnice následující:

$$M = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\delta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\delta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\delta} = M_{rel} + M_{syn} \quad (6)$$

Uvažujeme stroj, který má jedno vinutí na statoru a jedno na rotoru. Vlastní indukčnost statoru se označí L_1 , rotoru L_2 a vzájemnou indukčnost mezi nimi L_{12} . Úhel polohy rotoru vzhledem k poloze vztažné soustavy je δ . Potom je celkový vyvíjený elektromagnetický moment vyjádřen rovnicí (6).



Obr. 18 - Synchronní stroje s vyjádřenými póly a) na rotoru, b) na rotoru i statoru [8]

Nejprve uvažujeme stroj z obrázku (Obr. 18 a). Pokud je buzeno jen vinutí 1, rotor se bude snažit zaujmout polohu, která minimalizuje reluktanci (magnetický odpor) magnetického obvodu a maximalizuje magnetickou vodivost.

Rotor se zmagnetuje elektromagnetickou indukcí a póly jeho vybuzeného magnetického pole se snaží zaujmout polohu, kterou by se srovnaly souhlasně se statorovými póly opačné polarity. Tato snaha o souhlasné seřazení se statorovými póly je podstatou tvorby reluktančního momentu o velikosti:

$$M_{rel1} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\delta} \quad (7)$$

V tomto případě je synchronní moment nulový. Pokud bude buzeno jen vinutí 2, nevznikne žádný reluktanční moment, protože stator je hladký. A nevznikne ani moment synchronní. Aby vznikl i moment synchronní, musela by být buzena obě vinutí, neboť synchronní moment je způsobený snahou buzených rotorových pólů zaujmout souhlasnou polohu s buzenými statorovými póly.

Na obrázku (Obr. 18 b) se reluktanční moment vytvoří jen tehdy, pokud je buzeno jen vinutí 2. Protože má stroj vyjádřené póly jak na rotoru, tak na statoru, mohou vzniknout obě složky reluktančního momentu M_{rel1} i M_{rel2} .

$$M_{rel2} = \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\delta} \quad (8)$$

Stroje typu (Obr. 18 b) se dočkaly svého rozvoje až s pokrokem polovodičové techniky. Jedná se o krokové a spínané reluktanční motory.

U motorů, u kterých je napájeno pouze jedno vinutí, musí celý magnetizační proud dodat právě toto jedno vinutí. Toto vinutí tedy vede celý elektrický výkon stroje. Tím vzniká v reluktančních typech strojů (stroje, které pracují na principu reluktančního momentu) určitý rozpor mezi požadavky co největšího momentu a co nejmenšího (budícího) magnetizačního napětí, resp. proudu.

Tyto střídavé stroje pracují s nízkým účínkem, což způsobuje snížení účinnosti. Požadavky určitého magnetizačního proudu se přenáší na dimenzování napájecího měniče.

2.1.4 Vytváření hladkého momentu

Obě složky momentu mohou být ve stroji přítomny současně, ale nesmí být libovolně kombinované. Hlavní omezení vyplývá z toho, že stroj by měl vytvářet hladký moment bez zvlnění.

U stroje typu (Obr. 18 a) je tvorba hladkého momentu možná jen tehdy, pokud je vinutí 1 vícefázové se sinusovými proudy, napájené tak, že vytváří rotující magnetické pole s odpovídajícími vybuzenými póly tak, že rotují synchronní rychlostí. Rotor s vyjádřenými póly zaujme takovou polohu, že osy jeho pólů se srovnají souhlasně s osami statorových pólů, rotor tedy rotuje také synchronní rychlostí. Což je případ reluktančního synchronního motoru neboli RSM. [8]

2.2 Typy reluktančních motorů

Jak vyplývá z předešlé kapitoly, strojů, které využívají ke svému chodu princip změny reluktance (magnetického odporu) magnetického obvodu motoru, existuje několik typů.

- a) reluktanční synchronní motor (RSM)
- b) spínaný reluktanční motor (SRM)
- c) krokový reluktanční motor

2.3 Reluktanční synchronní motor (RSM)

Myšlenka synchronního reluktančního motoru je známa již dlouhou dobu. Počátky této technologie se dají vystopovat do roku 1923, kdy J. K. Kostko ve svém článku „Polyphase Reaction Synchronous Motors“ [9] poukazuje na vliv konstrukce rotoru, kde prezentuje své koncepty, u kterých vyzdvihuje výkon a celkový potenciál reluktančních synchronních motorů. V minulosti byl však tento typ motoru nepoužitelný z důvodu nedokonalostí frekvenčních měničů. To vše se změnilo pokrokem a zlevněním výroby polovodičových součástek.

2.3.1 Princip RSM

RSM je třífázový synchronní stroj bez permanentních magnetů. Motor pracuje bez buzení a rotor je zkonstruovaný tak, aby využil princip reluktančního momentu na přeměnu elektrické energie na mechanickou. Rotor má rozdílný magnetický odpor (reluktanci) v podélné a příčné ose a nenachází se na něm žádné vinutí. Stator je hladký (válcový) a totožný jako u asynchronních nebo synchronních strojů. RSM tak mají řadu výhod spínaných reluktančních motorů, zatímco eliminují řadu jejich nevýhod. Jako například problémy s hlukem a pulzační momentu u SRM motorů jsou odstraněny typem statoru, který neustále vytváří rotující magnetické pole. Rotor se otáčí synchronně s polem statoru, natačí se po směru elektromagnetického pole tak, aby osa d byla ve směru pole statoru. A stejně jako u synchronních strojů nesmí dojít k překročení zátěžného úhlu. Podobnost s klasickým synchronním motorem je i v možnosti uložení rozběhové klece po obvodu rotoru, kdy je potom možné stroj rozbíhat asynchronně.

2.3.2 Moment RSM

RSM využívá konceptu reluktance a točivé magnetomotorické síly, která může být buzena státorem klasických indukčních nebo synchronních třífázových strojů. Statorový proud je zodpovědný jak za magnetizaci (buzení hlavního pole), tak i za tvorbu točivého momentu, který se neustále snaží snížit deformaci pole (Obr. 16).

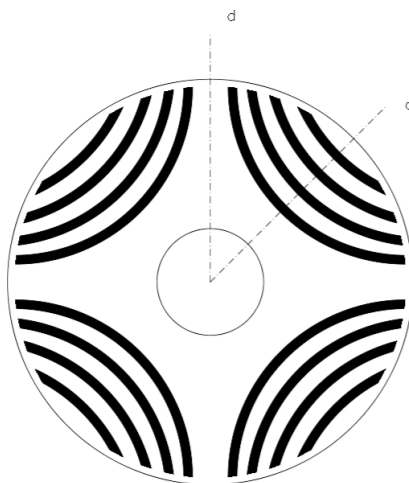
Tvorba momentu je založena na rozdílu indukčností v podélné ose L_d a příčné ose L_q . Moment motoru je dán vztahem:

$$M = \frac{3U_s^2}{2\omega_s} \left(\frac{1 - \frac{L_q}{L_d}}{\frac{L_q}{L_d}} \right) \sin 2\delta \quad (9)$$

Z rovnice je zřejmé že čím menší je indukčnost v příčné ose L_q a čím větší je indukčnost v ose podélné L_d , tím vyšší je výsledný moment. [10]

2.3.3 Rotor RSM

Kvalitativní ukazatele motoru RSM nejvíce záleží na geometrii rotoru. Jednou z možností, jak dosáhnout rotoru s rozdílnou reluktancí v jednotlivých osách, je radiálně vrstvený rotor (Obr. 19).



Obr. 19 - Radiálně vrstvený rotor RSM

Na obrázku jsou černou barvou označeny magnetické bariéry, které způsobují velkou magnetickou vodivost ve směru osy d a malou magnetickou vodivost ve směru osy q . Všechny důležité parametry RSM motorů závisí na poměru synchronních reaktancí v podélném a příčném směru. Čím je tento poměr reaktancí větší, tím motor vykazuje lepší vlastnosti.

$$\xi = \frac{X_d}{X_q} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (11)$$

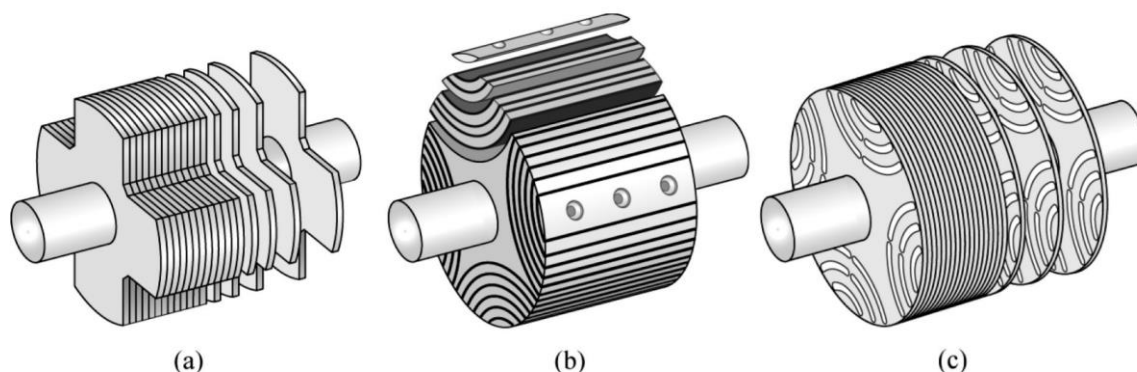
Cílem je dosáhnout vysoké L_d tím, že se vytvoří dobře vodivé cesty pro magnetický tok v ose d (snaha o co největší magnetickou vodivost v ose d) a nízké L_q tím, že se v ose q vytvoří magnetické bariéry (snaha o co nejnižší vodivost v ose q).

Dalším důležitým parametrem ovlivňujícím vlastnosti motoru je šířka vzduchové mezery. S větší vzduchovou mezerou je menší zvlnění momentu a klesá akustický hluk, zároveň se ale sníží výkon a motor bude mít horší účinnost. Možné vylepšení se skrývá v umístění permanentních magnetů do rotoru. Tímto krokem se stane ze stroje klasický synchronní stroj. [11]

2.3.4 Základní typy rotorů

Existují 3 hlavní typy rotorů reluktančních synchronních strojů. Jejich stručný historický popis je uveden v literatuře [12].

Prvním typem je rotor s vystouplými póly (Obr. 20 a), avšak tento druh rotorů má natolik špatné vlastnosti, že není schopen konkurovat alternativním uspořádáním.



Obr. 20 - Možné typy rotorů RSM a) vystouplé póly, b) axiálně vrstvený rotor c) radiálně vrstvený rotor [10]

Druhý typ, axiálně vrstvený rotor je tvořen plechy, které po seskládání vytvoří jednotlivé póly, jak je naznačeno na obrázku (Obr. 20 b). Jednotlivé plechy jsou od sebe izolovány vhodným izolačním materiálem. Celý tento segment je následně připevněn k vnitřní části rotoru, která je připevněna k hřídeli. Problém této geometrie rotoru je technologická složitost výroby. Axiálně vrstvený rotor bude podrobněji popsán v další kapitole, neboť se jedná o důležitý typ rotoru a v literatuře [8] mu je věnována značná část.

Posledním z hlavních typů je radiálně vrstvený rotor (Obr. 20 c). Magnetické bariéry vyřezány do rotorových plechů obsahují „můstky“ (anglicky „Bridge“), které přispívají k mechanické pevnosti. Dalším způsobem zpevnění rotoru je vyplnění vzduchových magnetických bariér epoxidovým materiálem. Tento typ konstrukce je popsán v literatuře: [7] [13] [14] [15]. Tato konstrukce má značnou výhodu ve výrobním procesu, kde se velmi podobá technologii výroby plechů pro asynchronní motory, kdy mohou být plechy vylisovány najednou. Na tento druh rotoru se také podíváme podrobněji.

2.3.4.1 Základní typy axiálních a radiálních rotorů

Základní typy konstrukce rotorů reluktančních synchronních strojů [8] jsou na obrázku (Obr. 21).

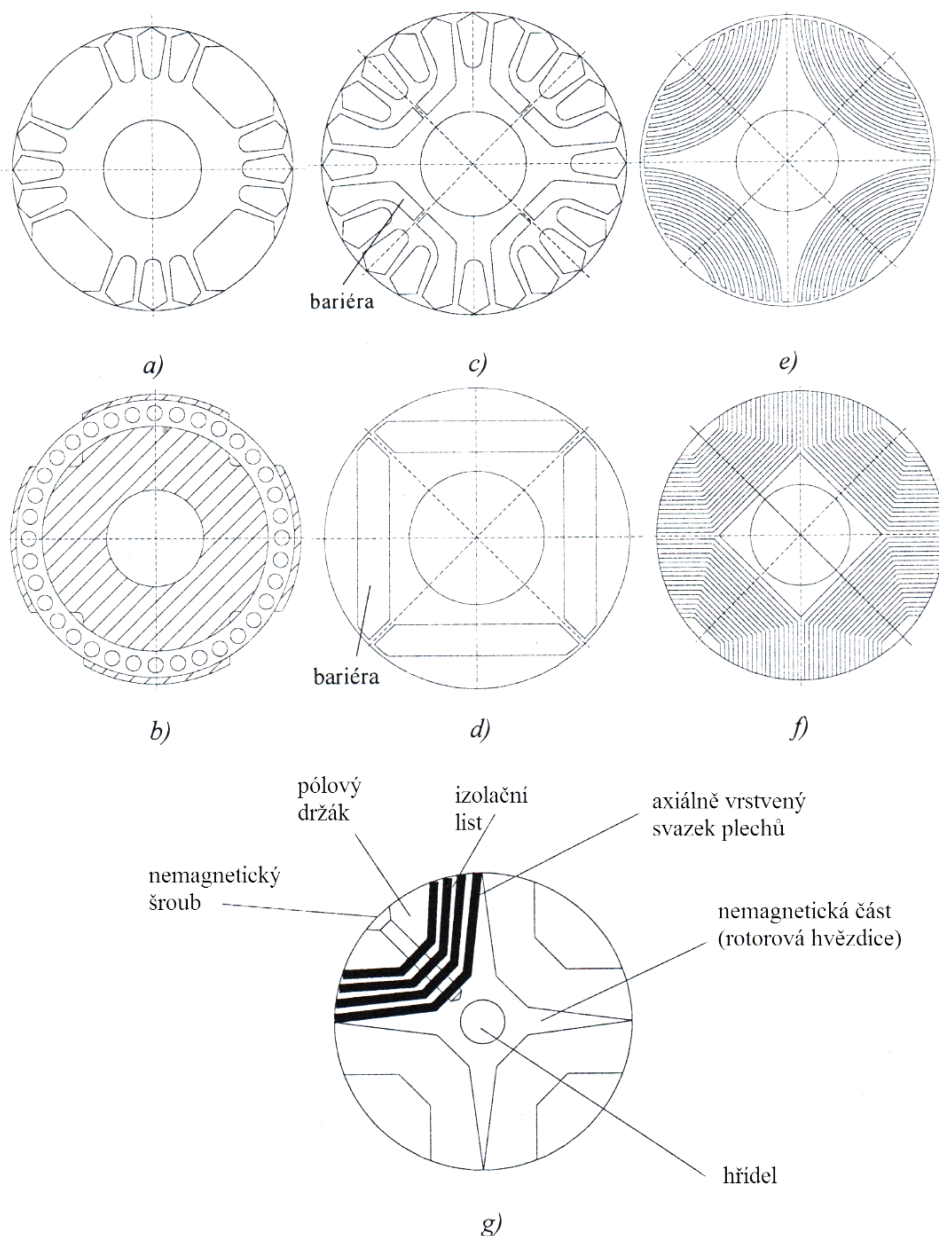
Dělí se podle:

Způsobu skládání plechů:

- a) radiálně vrstvené – Obr. 21: a, b, c, d, e
- b) axiálně vrstvené – Obr. 21: f

Přítomnosti klece v rotoru:

- a) klecové – Obr. 21: a, b, c
 b) bezklecové – Obr. 21: d, e, f



Obr. 21 – Hlavní typy konstrukcí rotoru RSM [8]

Klecové RSM jsou určeny především pro provoz na sítích s konstantním napětím a frekvencí. Bezklecové konstrukce se hodí pro vektorově řízené pohony.

Na (Obr. 21: a, b) jsou konstrukce s vyjádřenými póly, na (Obr. 21: c, d) konstrukce s jednou magnetickou bariérou a na (Obr. 21: e, f) konstrukce s vícenásobnými magnetickými bariérami.

Rotor z obrázku (Obr. 21 a) se získává z rotoru běžného asynchronního motoru rýhováním po odlití klece nebo drážkováním. Konstrukce těchto rotorů je jednoduchá, ale poměr ξ je příliš malý, aby

byly tyto motory srovnatelné s ostatními střídavými motory. Mají především malou účinnost. Proto mají RSM motory s tímto druhem rotoru větší rozměry než asynchronní motory o stejném výkonu.

Na obrázku (Obr. 21 b) je vidět rotor s vyjádřenými póly, jehož konstrukce je totožná s rotory běžných synchronních motorů, je zde pouze odstraněno budící vinutí. Kvalitativní parametry tohoto rotoru jsou také nízké.

Důležité jsou limitující faktory rotorů s vyniklými póly. Při rozšíření prostoru mezi póly se sníží vodivost v ose q a tím i synchronní indukčnost L_q , tím se zúží pólový oblouk, což vede ke snížení vodivosti v ose d a indukčnosti L_d . Z toho vyplývá, že je nejvýhodnější konstrukce s vícenásobnými bariérami, anebo vícesegmentové uspořádání. Účinek rozptylového drážkového toku (který pokud je reprezentován rozptylovou drážkovou indukčností, je obsažený v obou indukčnostech L_q a L_d) je možné snížit použitím velkého množství počtu tenkých bariér (Obr. 21: e, f), např. při použití jen 4 bariér je poměr ξ podstatně vyšší než při rotoru s vyjádřenými póly.

Radiálně vrstvený rotor s vícenásobnými bariérami (Obr. 21 e), kde jsou v plechách výrazné bariéry ve tvaru oblouku, dosahuje nasycený poměr synchronních indukčností ξ zhruba dvakrát větší hodnoty ($8\div 9$) oproti jednobariérovému rotoru ($\xi = 4,7$). To výrazně zlepšuje kvalitativní vlastnosti, avšak výroba je komplikovaná, a proto je praktičtější konstrukce s axiálně skládanými plechy (Obr. 21 f).

Axiálně vrstvená konstrukce se přibližuje tzv. ideálnímu rotoru RSM (ideální rotor je takový, který je nekonečně vodivý podél magnetických siločar a úplně nevodivý napříč magnetickými siločarami). Rotor na obrázku (Obr. 21 f) má plechy tvarované tak, aby sledovaly tok v ose d a magnetické bariéry, které brání přechodu toku v ose q .

Hodnotu poměru ξ ideálního rotoru nelze dosáhnout, protože zhruba 50 % rotoru musí tvořit ocel, aby se maximalizovalo L_d . To ale redukuje tloušťku bariér zhruba na polovinu vůči nemagnetickému rotoru a vede ke zdvojnásobení L_q . Dosažené poměry synchronních indukčností ξ při axiálně vrstvené konstrukci rotoru jsou okolo $10\div 12$. [8]

2.3.4.2 Axiálně vrstvený rotor

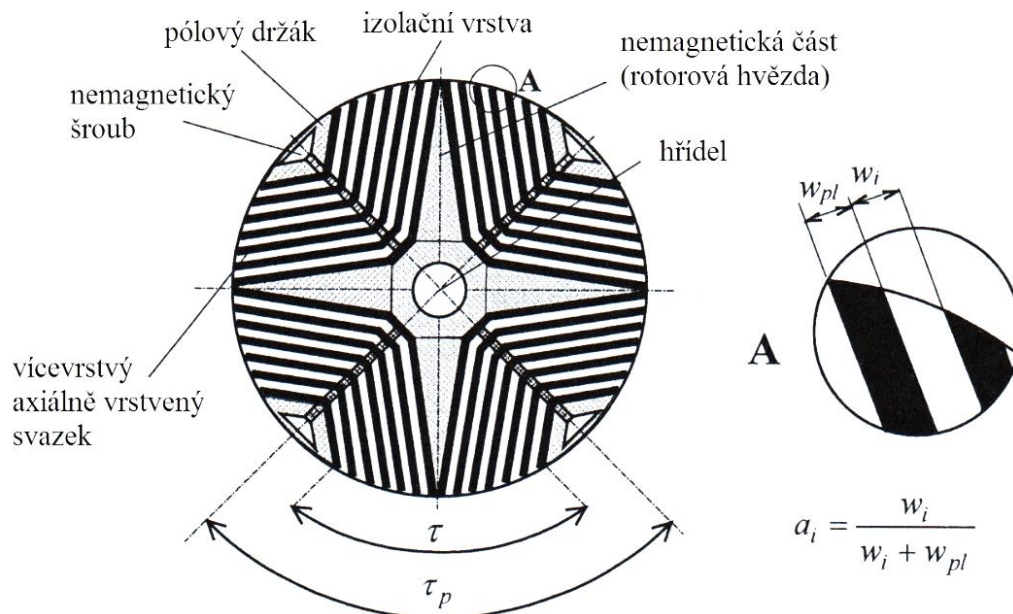
2.3.4.2.1 Základní aspekty návrhu axiálně vrstvených rotorů

Návrh většinou probíhá tak, že se z asynchronního motoru (ASM) vyndá rotor a vloží se do něj nový rotor pro RSM. To umožňuje nejlepší následné porovnání vlastností původního asynchronního motoru s novým RSM. [8]

Při návrhu RSM je cílem získat robustní a jednoduchou konstrukci, která by disponovala vysokým momentem, účinností a účínkem. Proto je snaha o maximalizování poměru indukčnosti v ose d k indukčnosti v ose q , tedy poměru ξ . Následující popis návrhu dle [8].

2.3.4.2.2 Teoretické omezení poměru ξ

Ideální rotor má nekonečnou vodivost podél magnetických siločar a je úplně nevodivý napříč magnetickými siločarami. To by vyžadovalo hypotetický anizotropní materiál, u kterého by vodivost nebyla jen jednosměrná, ale která by dodržovala model odpovídající přirozenému tvaru magnetických siločar. Těmto požadavkům se axiálně vrstvený rotor přibližuje (Obr. 22).



Obr. 22 - Axiálně vrstvený rotor

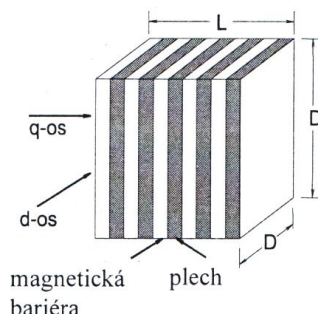
Rotor má plechy tvarované tak, aby sledovaly magnetický tok v ose d a magnetické bariéry, které brání přechodu magnetického toku v ose q.

Maximální hodnota L_d , je pro případ válcového rotoru se stejným statorem a vzduchovou mezerou omezená synchronní indukčností. Minimální hodnota L_q je omezená satorovou rozptylovou indukčností stroje. Dosažitelný poměr synchronních indukčností je omezený čtyřmi faktory:

- 1) vodivost v ose q nemůže být nula
- 2) plechy v ose d podléhají nasycení
- 3) pokud jsou plechy příliš silné, mohou magneticky zkratovat otevření satorových drážek
- 4) rozptylové indukčnosti čel a další rozptylové indukčnosti, které přispívají k L_d a L_q

2.3.4.2.3 Jednoduchý odhad poměru ξ

Uvažujeme, že plechy a magnetické bariéry jsou všude velmi tenké a a_i je průměrný poměr mezi tloušťkou magnetické bariéry a společnou tloušťkou magnetické bariéry a plechu (Obr. 22).



Obr. 23 – Optimální poměr tloušťky plechu a magnetické bariéry

Pro maximální hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře 0,8T a magnetickou indukcí nasycení okolo 1,7 T musí být a_i omezené na hodnotu přibližně 0,5. Synchronní reaktance X_d je nepřímo úměrná šířce vzduchové mezery δ_{vz} a je možné dokázat, že X_q je nepřímo úměrné součtu δ_{vz} a společné tloušťky magnetických bariér, která je $a_i \cdot r$, kde r je poloměr rotoru. Poměr ξ je tedy daný vztahem:

$$\xi = \frac{X_d}{X_q} = \frac{(a_i \cdot r + \delta_{vz})}{\delta_{vz}} = \frac{a_i \cdot r}{\delta_{vz}} + 1 \quad (12)$$

Hlavní parametry ovlivňující poměr ξ jsou počet pólových dvojic, radiální šířka vzduchové mezery δ , počet vrstev (plech + bariéra) na pól N_{pl} a magnetický izolační poměr:

$$a_i = \frac{w_i}{(w_i + w_{pl})} \quad (13)$$

kde w_i je tloušťka magnetické bariéry
 w_{pl} je tloušťka plechu (Obr. 22)

2.3.4.2.4 Počet pólových párů

Většina návrhů je čtyřpólových, ale byly vytvořeny i dvojpólové a šestipólové. Dvojpólové rotory mají největší hodnoty poměru ξ , ale je potřebné vyřešit problém upevnění hřídele, protože bariéry v takovém případě procházejí skrz hřídel.

2.3.4.2.5 Radiální šířka vzduchové mezery

Poměr magnetizačních indukčností $L_{\mu d}/L_{\mu q}$ se zvyšuje s poměrem τ_p/δ (τ_p – pólový rozestup) (Obr. 22). Pro malé pólové rozestupy ($\tau_p \approx 0,02$ m), pokud je vzduchová mezera malá ($\delta_{vz} \approx 0,15$ mm), je možné dosáhnout poměru $L_{\mu d}/L_{\mu q} \approx 10$. K omezení pulzačních ztrát a kvůli obvyklým mechanickým důvodům může být vzduchová mezera realizována podobně jako u asynchronního motoru stejné velikosti.

2.3.4.2.6 Magnetický izolační poměr a_i

Uvažujeme kostku složenou z plechů (Obr. 23). Na základě obrázku je magnetický odpor podél osy q daný:

$$R_m = \frac{L \cdot a_i}{\mu_0 \cdot D^2} \quad (14)$$

Magnetický odpor napříč ocelovými plechy je zanedbatelný. Podobně magnetická vodivost podél osy d je:

$$\Lambda_d = \frac{\mu_r \mu_0 L (1 - a_i) D}{D} = \mu_r \mu_0 L (1 - a_i) \quad (15)$$

kde μ_r je relativní permeabilita oceli

Vodivost podél bariér se zanedbává. Maximální poměr indukčností se získá maximalizací součinu $\Lambda_d \cdot R_{mq}$, z čehož vyplývá $a_i = 0,5$, resp. rovnost tloušťky bariér a tloušťky plechů. Avšak tato jednoduchá úvaha byla provedena při zanedbání nasycení. Pokud se vezme v úvahu nasycení, tak se dojde k výsledku, že a_i by mělo být v rozmezí 0,3 – 0,4. Běžně je však možné zvolit tloušťku plechu w_{pl} rovnou tloušťce bariéry (izolace) w_i .

2.3.4.2.7 Počet vrstev (plech + bariéra) na pól N_{pl}

Volba N_{pl} přímo souvisí s počtem drážek a s velikostí otevření statorové drážky. Napříč každým otevřením statorové drážky by měla být aspoň jedna bariéra, čímž se zabrání vytváření zkratových magnetických obvodů pro tok v ose q pro různé polohy rotoru. N_{pl} má malý vliv na L_d , ale L_q se podstatně snižuje, pokud se N_{pl} zvýší, a tím se zvyšuje účinek magnetických bariér. Poměr L_d/L_q je v podstatě konstantní, pokud je N_{pl} větší než 10. Žádoucí je ovšem použít N_{pl} větší (alespoň dvojnásobek tohoto čísla), aby došlo ke snížení momentového zvlnění a také ke snížení přídavných ztrát zapříčiněných pulzací toku.

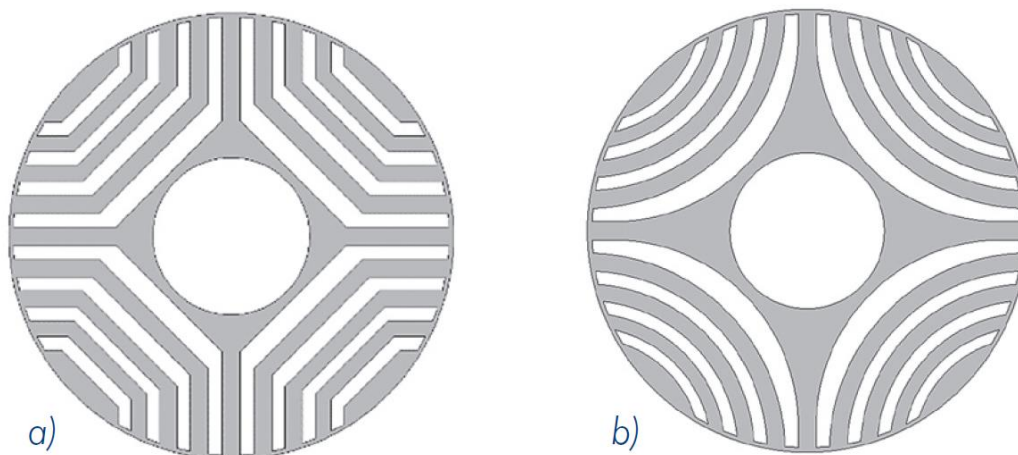
Plechů mohou být vyrobeny z orientovaných transformátorových plechů [8], anebo mohou být totožné jako v běžných průmyslových strojích [8], čímž se dosáhne snížení nákladů.

Jako izolační materiál mohou být použity vrstvy ze skelných vláken, plastické lamináty nebo epoxidový materiál. Poměr τ_d/τ_p (Obr. 22) by měl být okolo 2/3.

Nevýhodou axiálně vrstvených rotorů je problém s jejich sériovou výrobou, protože technologický postup není tak dokonale zpracovaný, jako například pro indukční motory. Proto se vývoj ubírá stále dvěma směry, jak axiálně, tak i radiálně vrstvených rotorů.

2.3.4.3 Radiálně vrstvený rotor

Možný geometrický tvar magnetických bariér radiálně vrstvených rotorů je zobrazen na obrázku (Obr. 24).



Obr. 24 - Radiálně vrstvené rotory RSM [16]

2.3.4.3.1 Stanovení počtu bariér

Při návrhu radiálně vrstveného rotoru záleží nejvíce na geometrickém tvaru a počtu magnetických bariér na pól, protože existuje spojitost mezi jejich počtem a počtem statorových drážek. Tuto souvislost lze definovat pomocí vztahu [16]:

$$N_s = n_s \cdot p = 6 \cdot q \cdot p \quad (16)$$

kde n_s počet statorových drážek na pólpár
 p počet pólpárů
 q počet statorových drážek na pól a fázi

Předpokládají se otevřené statorové drážky. Rotorové můstky, které spojují jednotlivé bariéry, jsou magneticky nasyceny a považují se za magneticky otevřené. Toto statorové a rotorové „drážkování“ způsobuje určitou interakci. Analýza tohoto problému je velmi náročná. Dosavadní studie ukazují, že počet statorových drážek by měl respektovat následující vztah [16]:

$$n_s - n_r \neq 0, +2, -2; n_r > 6 \quad (17)$$

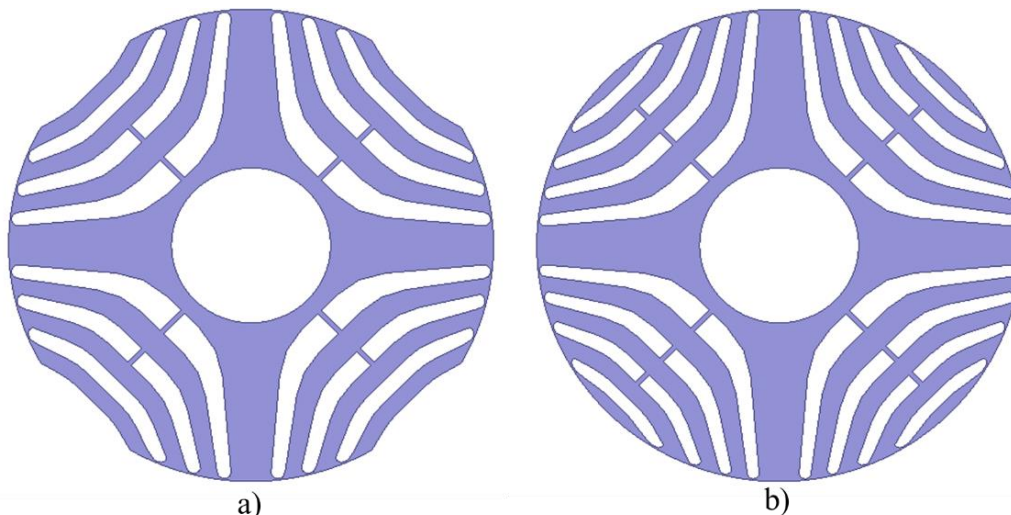
$$n_s - n_r = \mp 4 \quad (18)$$

kde n_r počet rotorových drážek na pólpár

Pro dosažení minimální pulzace momentu se doporučuje [17], aby měly rotorové bariéry, pokud možno, konstantní permeanci. To znamená, aby byl poměr mezi délkou a šířkou každé bariéry téměř stejný, čímž se předejde vytváření harmonických, které by byly schopny interakce se statorovými harmonickými. V praxi to znamená, že pokud máme například stator s 36 drážkami, rotor by pak měl

mít 22 nebo 14 drážek (viz rovnice (18)). Jinak řečeno, rotor 18/14 (18 statorových drážek na pól pár/14 rotorových drážek na pól pár) by měl mít 3 bariéry a rotor 18/22 by měl mít bariéry čtyři.

Bariéry mohou být buď dle obrázku (Obr. 24), nebo poslední bariéra u vnějšího obvodu rotoru nemusí být uzavřena, tím vznikne tzv. „Cut-Off“ struktura (Obr. 25 a) z původního rotoru s uzavřenou poslední bariérou (Obr. 25 b). Tato struktura by měla vést ke snížení indukčnosti v příčné ose q . Jak ale zmiňuje J. K. Kostko ve svém článku [17], tato struktura vede i k nechtěnému omezení indukčnosti v ose d .



Obr. 25 - a) rotor s "Cut-Off" strukturou, b) rotor s uzavřenou poslední bariérou

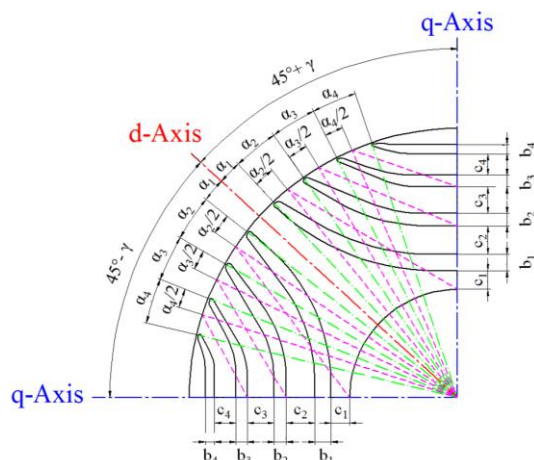
2.3.4.3.2 Optimalizace tvaru bariér

U stanovení počtu bariér na pól návrh radiálního rotoru RSM nekončí, ale naopak teprve začíná. Protože optimalizace tvaru magnetických bariér je asi největší problém a má zásadní vliv na výsledné vlastnosti, ne-li dokonce funkčnost celého motoru.

Většina autorů se ve svých člancích zabývá optimalizací tvaru bariér dle obrázku (Obr. 24). Výchozím geometrickým tvarem je rotor (Obr. 24 a), který je podroben optimalizací pomocí řady parametrických analýz pro značné množství proměnných, což způsobuje velkou časovou i výpočetní náročnost. Výsledkem analýz je obvykle obdobný rotor jako rotor na obrázku (Obr. 24 b). Podobné postupy jsou uvedeny například v literatuře [10] [16] [18].

Nejdůležitějšími parametry, na kterých závisí vlastnosti a funkčnost RSM jsou dobře vidět na náčrtu optimalizace dle [18] (Obr. 26). Tvar bariér je definován pomocí dvou parametrů. Úhlem bariérového hrotu α a šířkou žeber, kterými bude procházet tok od statorového vinutí (c_1 až c_4). Důležitá je také výška magnetických bariér (parametry b_1 až b_4). Zde je důležité, aby bariéry začínaly co nejbližší k hřídeli c_1 , zároveň ale musí poskytovat dostatečnou mechanickou pevnost. Proto je hodnota c_1 menší, než hodnota c_2 , která je nejvyšší. Směrem od středu se hodnoty (c_3 a c_4) snižují. Obdobně je na tom

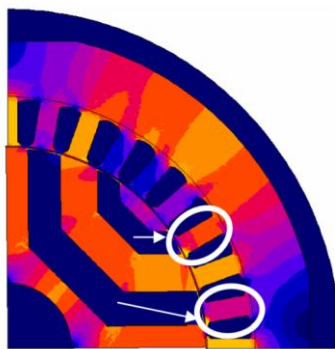
hrotový úhel α , kdy α_1 je nejmenší a definuje šířku hlavní cesty magnetického toku v podélné ose. Další parametr α_2 je největší a parametry (α_3 a α_4) se snižují.



Obr. 26 - Parametry optimalizace tvaru magnetických bariér [18]

Například v optimalizaci dle [16] je řešen tvar bariér zvolením 6 až 8 základních bodů na bariérách, které jsou spojeny přímkami a oblouky, jež vytvoří výsledný tvar bariéry. Je tedy zřejmé, že sestavení a vytvoření parametrické analýzy pro takový počet proměnných je velmi náročné.

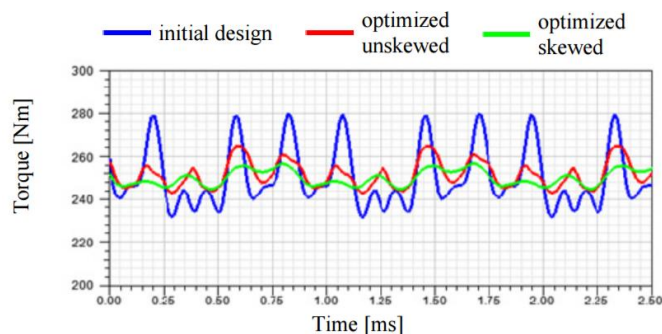
Velmi důležité je zakončení magnetických bariér neboli „tvar hrotů“. Důležitá je také šířka bariéry u vnějšího obvodu rotoru. Protože pokud je bariéra natolik široká, že překryje celý statorový zub, dochází k zamezení přechodu toku ze zubu do rotoru, a tedy snížení jeho hustoty procházející do rotoru a přesycení daného statorového zubu (Obr. 27) [7]. Proto je nutné vytvarovat konce bariér do tvaru hrotu.



Obr. 27 - Omezení toku do rotoru [7]

Tvar bariér je optimalizován především z důvodu omezení pulzace momentu. Pulzace momentu je všeobecnou nevýhodou reluktančních motorů. Například oproti spínanému reluktančnímu motoru (SRM) je pulzace u RSM velmi snížena, což je dáno typem statoru, který nemá vyniklé póly a je hladký. K určité pulzaci ale přeci jen dochází. Optimalizací tvaru bariér nemůže být pulzace zcela odstraněna, ale může být alespoň maximálně omezena. Jako je například uvedeno v literatuře [18], kde optimalizací dvou hlavních parametrů (úhlu α a šířkou žebér c) byla pulzace momentu omezena z modrého průběhu na červený (Obr. 28).

Další vyhlazení momentu může být provedeno tzv. „skewingem“ [18], kdy se jednotlivé rotorové plechy vůči sobě pootočí o určitý úhel, jak se praktikuje i u asynchronních motorů.



Obr. 28 - Omezení pulzace momentu [18]

Více se problému optimalizace geometrie nebudu věnovat, neboť to není tématem této diplomové práce a zmiňuji literaturu, kde je problém konstrukce rotoru podrobně popsán.

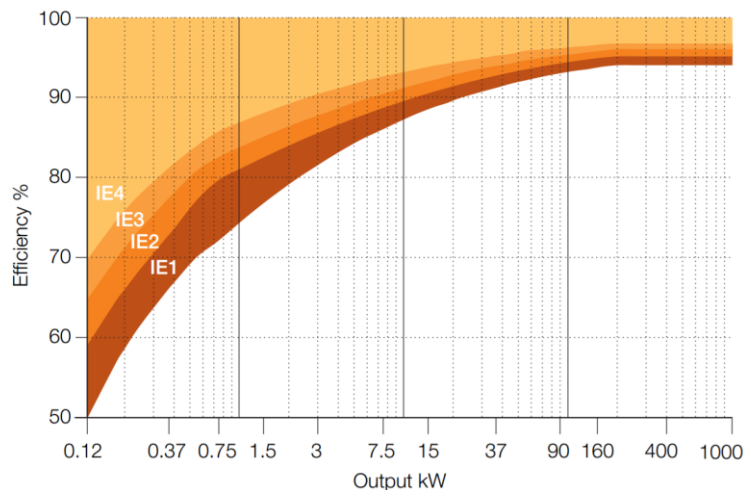
2.4 Porovnání RSM s ASM

2.4.1 Třídy účinnosti [19]

Norma IEC 60034-30-1, která vešla v platnost 6. března 2014 byla publikována Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC) a zabývá se harmonizací tříd energetické účinnosti elektromotorů na střídavý proud. Standard definuje čtyři IE „International Efficiency“ třídy účinnosti pro jednotlivé rychlosti elektromotorů (Tab. 1) a jejich závislost na výkonu stroje (Obr. 29).

Super-Premium efficiency	IE4
Premium efficiency	IE3
High efficiency	IE2
Standard efficiency	IE1

Tab. 1 - Třídy účinnosti



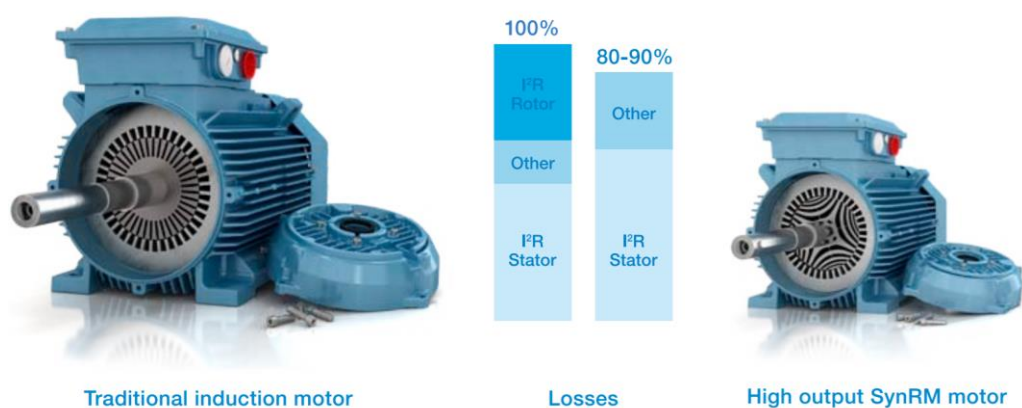
Obr. 29 - Třídy účinnosti v závislosti na výstupním výkonu [19]

Třída IE5 je chystána pro příští revizi, kdy se požaduje další snížení ztrát o 20 % oproti IE4. Přesné hodnoty účinnosti pro motory dle výkonu a počtu pólů jsou uvedeny v příloze (příloha 8.1).

2.4.2 Porovnání motorů

Mezi největší průkopníky v inovaci a produkci reluktančních synchronních motorů patří společnost ABB. Proto budu pro tuto kapitolu čerpat z prospektů této společnosti.

Jak již bylo uvedeno, díky konstrukci rotoru RSM se dosahuje značného snížení ztrát, díky absenci rotorového vinutí. Společnost ABB udává snížení ztrát oproti klasickému asynchronnímu motoru až o 10 % [2].



a)

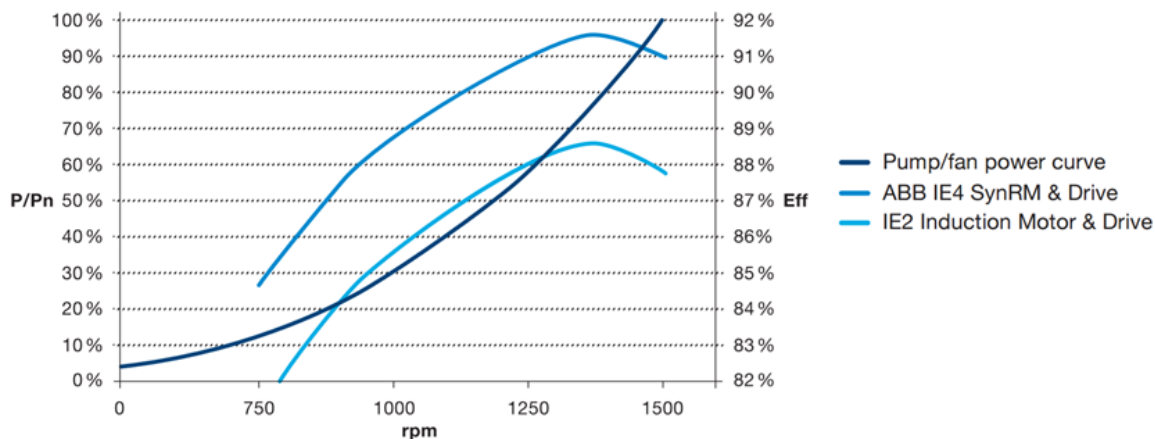


b)

Obr. 30 – Porovnání ASM motoru a RSM a) ztráty; b) velikosti motorů stejného výkonu [2]

Asynchronní motor dosahuje třídy účinnosti IE2 a RSM motor je o celé 2 třídy účinnosti lepší, a to při zachování stejných rozměrů (Obr. 30 a), dalším rozdílem je velikost, při stejném generovaném výkonu (Obr. 30 b) (menší stroj je RSM).

Vzhledem k tomu, že IE třídy účinnosti se udávají pro neregulované stroje napájené sinusově a pracující ve jmenovitých podmínkách, což není případ RSM, neboť RSM je napájen z měniče frekvence. Proto je potřeba do celkové účinnosti započítat nejen účinnost samotného motoru, ale také měniče.



Obr. 31 - Porovnání účinnosti asynchronního motoru a RSM při napájení z měniče [2]

Na obrázku (Obr. 31) je do grafu vynesena účinnost ASM motoru napájeného měničem frekvence (světle modrá) a křivka účinnosti RSM s frekvenčním měničem. Jedná se o pohon čerpadla/ventilátoru pro jmenovité otáčky 1500 a výkon motoru 15 kW, což jsou parametry motoru navrhovaného v této práci

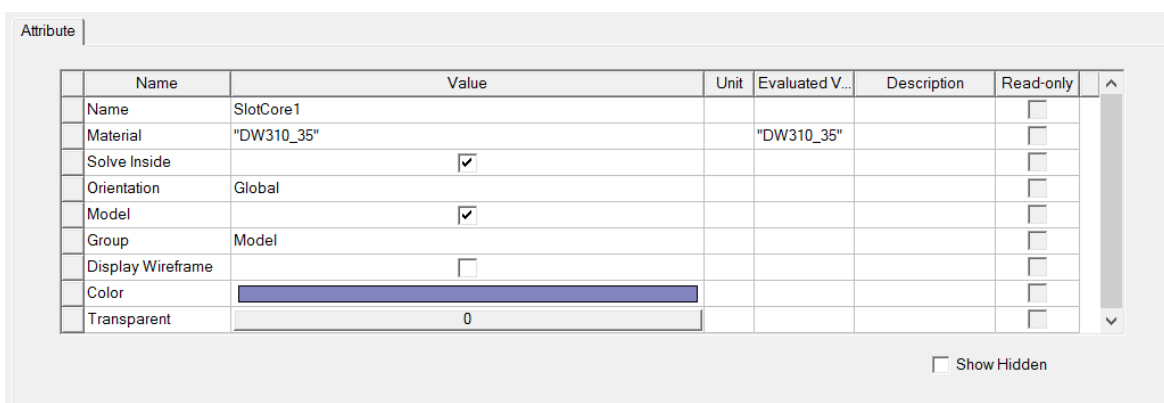
3 Návrh reluktančního synchronního motoru

Nyní se budu věnovat návrhu samotného modelu reluktančního synchronního motoru. Nejprve byl model navrhován v programu Electronics 17.0. Zde byla jediná možnost, jak motor vytvořit, a to přes předdefinovaná uživatelská primitiva. Nejčastější návrhy RSM motorů (viz kapitola 2.3.4.2) probíhají tak, že se běžnému asynchronnímu motoru vyjme rotor a vloží se do něj nový rotor pro RSM. Tato metoda umožňuje co nejpřesnější porovnání vlastností obou motorů. Proto budu postupovat při návrhu stejně a jako podklady pro tvorbu RSM motoru budu používat rozměry a data dle [20], kde je návrh asynchronních motorů podrobně popsán.

3.1 Návrh RSM motoru v Maxwell 3D pomocí „User Defined Primitive“

3.1.1 Návrh statoru

V panelu nástrojů si zvolím ikonku příslušnou návrhovému prostředí Maxwell 3D. Zde dle postupu z první kapitoly otevřu paletu objektů UDP. V této záložce jsou všechny komponenty, které jsou pro návrh potřeba. Pro vytvoření statoru jako má asynchronní motor zvolím možnost „SlotCore“. Vybraný objekt se do pracovní plochy vloží v základních rozměrech a v provedení jako rotor s drážkami po vnějším obvodu a hned se otevře okno s možností zadat jednotlivé rozměry. Nyní je třeba okno s parametry jen potvrdit tlačítkem OK a nic neměnit, jinak se program zasekne a ukončí, jedná se zřejmě o nějakou vnitřní programovou závadu. V okně návrhu (viz kapitola 1) se nachází základní nastavení zvoleného objektu (Obr. 32). Zde se dá objekt přejmenovat, zvolit materiál, barva a průhlednost.



Obr. 32 - Základní nastavení vloženého objektu

Materiálová databáze obsahuje velké množství různých materiálů. Pokud by pro nějaké potřeby nebyla dostatečná, je možné si u jednotlivých materiálů upravit jejich parametry a vytvořit si materiál dle svých představ, nebo importovat vlastní materiálovou databázi. Pro účely mého návrhu je databáze dostačující. Materiály jsou zde členěny do několika sekcí: RMXprt, obecně „Materials“ a dále podle výrobců: HitachiMetals, ArnoldMagnetics, ChinaSteel a další. Materiálová databáze jednotlivých výrobců je další novinkou verze Electronics 18.0. Pro svůj návrh jsem vybral materiál z knihovny

RMxprt a sice materiál pod označením DW310_35, jedná se o běžnou elektrotechnickou ocel. V nastavení jednotlivých materiálů se nachází široká škála parametrů, které lze libovolně upravovat (Obr. 33).

Material Name: DW310_35
Material Coordinate System Type: Cartesian

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	0	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Electric Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
- X Component	Unit Vector	1	
- Y Component	Unit Vector	0	
- Z Component	Unit Vector	0	
Magnetic Saturation	Simple	0	tesla
Lande G Factor	Simple	2	
Delta H	Simple	0	A_per_meter
- Measured Frequency	Simple	9.4e+009	Hz
Core Loss Model		Electrical Steel	w/m^3
- Kh	Simple	179	
- Kc	Simple	0.403	
- Ke	Simple	0	
- Kdc	Simple	0	
Mass Density	Simple	7650	kg/m^3
Composition		Lamination	
- Stacking Factor	Simple	0	
- Stacking Direction		V(3)	
Magnetostriction	Custom	Edit...	

View/Edit Material for:
 Active Design
 Active Project
 All Properties
 Physics:
 Electromagnetic
 Thermal
 Structural

View/Edit Modifier for:
 Thermal Modifier

Validate Material

Calculate Properties for: [Dropdown]
 Reset OK Cancel

Obr. 33 - Materiálové parametry

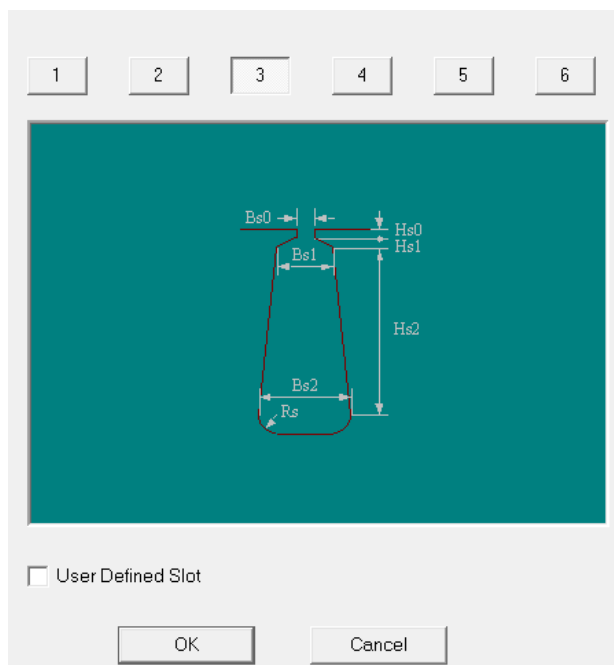
Jsou zde uvedeny například vodivosti, ztrátové koeficienty, je možné se podívat na BH křivku a případně upravit její parametry. Tento materiál jsem zvolil z důvodu přítomnosti mnoha koeficientů potřebných pro výpočty. Provedl jsem úpravu, kdy jsem „Solid“ změnil na „Lamination“, což znamená, že objekt je skládán z plechů a bude respektován směr válcování. Proto bylo nutné změnit směr válcování, protože vytvořený 3D model bude následně rozříznut podle os **XY** na 2D model. A osám **XY** odpovídá směr válcování V(3), jinak by Maxwell došel k velmi nepřesným výsledkům. Poslední úpravou bylo určení typu materiálu jako elektrotechnická ocel, kdy se pro výpočet ztrát berou v úvahu ztrátové činitele k_h a k_c .

Po nastavení materiálu se v okně návrhu dostanu stromovou strukturou k možnostem zadání jednotlivých rozměrů vloženého objektu – statoru (Obr. 34).

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description
Command	CreateUserDefinedPart			
Coordinate System	Global			
Name	RMxprt/SlotCore			
Location	syslib			
Version	12.1			
DiaGap	184	mm	184mm	Core diameter on gap side, DiaGap<DiaYoke for outer cores
DiaYoke	291	mm	291mm	Core diameter on yoke side, DiaYoke<DiaGap for inner cores
Length	123	mm	123mm	Core length
Skew	0	deg	0deg	Skew angle in core length range
Slots	36		36	Number of slots
SlotType	3		3	Slot type: 1 to 6
Hs0	0.6	mm	0.6mm	Slot opening height
Hs01	0	mm	0mm	Slot closed bridge height
Hs1	1.08	mm	1.08mm	Slot wedge height
Hs2	23.82	mm	23.82mm	Slot body height
Bs0	3.1	mm	3.1mm	Slot opening width
Bs1	9	mm	9mm	Slot wedge maximum width
Bs2	13.15	mm	13.15mm	Slot body bottom width, 0 for parallel teeth
Rs	0	mm	0mm	Slot body bottom fillet
FilletType	0		0	0: a quarter circle; 1: tangent connection; 2&3: arc bottom.
HalfSlot	0		0	0 for symmetric slot, 1 for half slot
SegAngle	30	deg	30deg	Deviation angle for slot arches (10~30, <10 for true surface).
LenRegion	200	mm	200mm	Region length
InfoCore	0		0	0: core; 100: region.

Obr. 34 - Zadání rozměrů statoru

Ze základně nastaveného rotoru se udělá stator jednoduše prohozením vnějších a vnitřních průměrů („DiaGap“ a „DiaYoke“). Protože se jedná o 3D model, zadám statoru i délku. Dále zadám počet drážek a v další řádce její typ. Na výběr je celkem ze 6 různých typů.



Obr. 35 - Typy statorových drážek

Obrázek (Obr. 35) popisuje jednotlivé rozměry drážky, které se následně zadají do okna rozměrů (Obr. 34). Tyto parametry byly zvoleny dle skript pro návrh asynchronních motorů [20].

3.1.2 Návrh rotoru

Dále je potřeba vytvořit rotor. Opět využiji UDP a dle kapitoly 1 zvolím možnost „SynRMCore“, což znamená rotor pro RSM motor. Budu postupovat stejně jako při návrhu statoru a zvolím si základní parametry a materiál, který je shodný jako pro stator. Opět otevřu okno s jednotlivými parametry (Obr. 36).

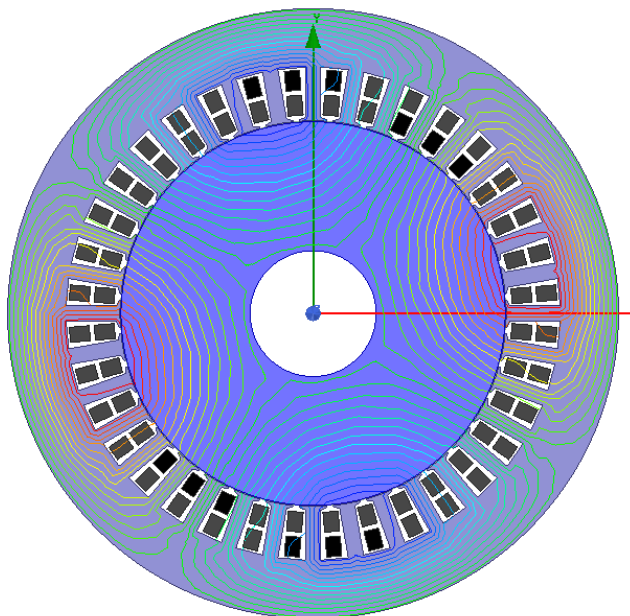
Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description
Command	CreateUserDefinedPart			
Coordinate System	Global			
Name	RMxprt/SynRMCore			
Location	syslib			
Version	12.0			
DiaGap	183	mm	183mm	Core diameter on gap side, or outer diameter
DiaYoke	60	mm	60mm	Core diameter on yoke side, or inner diameter
Length	123	mm	123mm	Core length
Poles	4		4	Number of poles
PoleType	4		4	1: ALA; 2: arc; 3: hyperbolic; 4: hyperbolic line.
Barriers	4		4	Barriers per Pole, for Pole Type 2, 3 & 4 only
H	0.5	mm	0.5mm	Bridge thickness, for Pole Type 2, 3 & 4 only
W	2	mm	2mm	Rib width, for Pole Type 2, 3 & 4 only
R	5	mm	5mm	Barrier fillet radius, for Pole Type 2, 3 & 4 only
R0	30	mm	30mm	Radius of the bottom barrier arch, for Pole Type 2 only.
Rb	36.5	mm	36.5mm	Barrier bottom minimum radius
Y0	10	mm	10mm	Yoke bottom thickness
B0	9.5	mm	9.5mm	Barrier bottom thickness, for Pole Type of 2, 3 & 4 only.
LenRegion	250	mm	250mm	Region length
InfoCore	0		0	0: core; 1: one barrier; 100: region.

Obr. 36 - Zadání parametrů rotoru

Zde navolím základní rozměry. Zvolením většího průměru „DiaGap“ o milimetr menší, než vnitřní průměr statoru vytvořím vzduchovou mezeru půl milimetru a zvolením vnitřního průměru „DiaYoke“ určím průměr hřídele. Délku rotoru zvolím totožnou s délkou statoru.

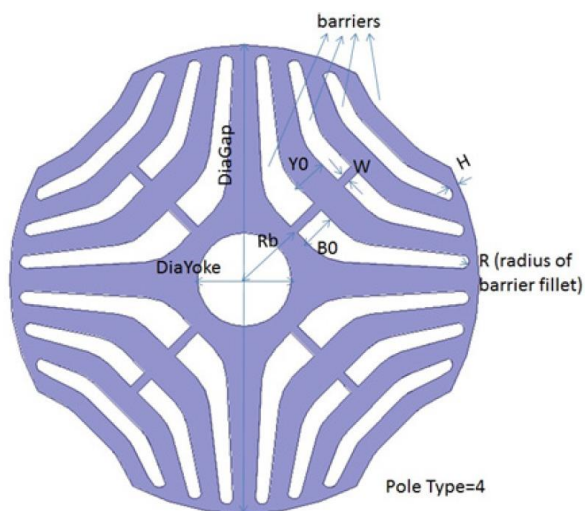
Vlastnosti RSM motorů převážně závisí na typu rotoru a tvaru magnetických bariér (viz kapitola 2), které způsobují požadovaný maximální rozdíl indukčností v podélné a příčné ose, proto se nyní dostávám k samotnému „Know-How“ návrhu RSM motorů. Nejprve zadám, že chci čtyřpólový stroj. Dále je přede mnou volba typu pólů. Zde mám možnost volby čtyř základních tvarů magnetických bariér („ALA, arc, hyperbolic“ a „hyperbolic line“). Obrázky jednotlivých typů bariér jsou přiloženy v příloze (příloha 8.6).

Já jsem pro svůj návrh zvolil tvar bariér „hyperbolic line“, neboť tento tvar bariér nejlépe odpovídá tvaru silokřivek magnetického pole statoru v plném materiálu (Obr. 37) a nejvíce se přibližuje optimalizované geometrii dle kapitoly 2.3.4.3.



Obr. 37 - Silokřivky magnetického pole statoru v pevném materiálu

Další volitelné parametry určují počet magnetických bariér a jejich rozměry. Co které rozměry znamenají je znázorněno na obrázku (Obr. 38).

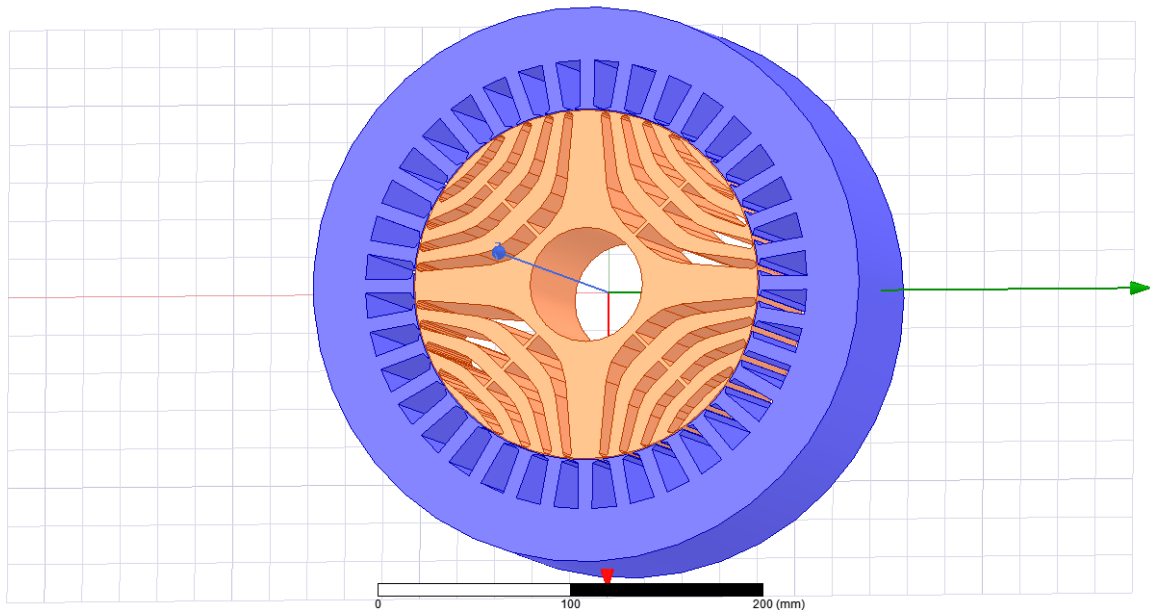


Obr. 38 - Rozměry rotoru [21]

Nejprve jsem zvolil 4 bariéry na pól, jak je uvedeno v kapitole 2, pro daný poměr statorových a rotorových drážek. Při vložení objektu rotoru a zadání základních rozměrů se vytvoří základní tvar bariér. Po následných simulacích motor nevykazoval dobré vlastnosti (zvlnění momentu, průběhy proudů atd.). Proto jsem dle dostupné literatury o optimalizaci geometrie (viz kapitola 2) upravil

rozměry bariér (Obr. 36). Dále jsem upravoval rozměry bariér spíše postupem „pokus, omyl“, neboť vytvoření parametrické analýzy by bylo sice v programu Electronics možné, ale v rámci diplomové práce časově neuvěřitelné. Zároveň tématem této práce je ověření aplikace vývojového prostředí Ansys pro návrh RSM, nikoliv samotná optimalizace geometrie. Přesto jsem se snažil dosáhnout co nejlepších vlastností a co nejmenšího zvlnění momentu, kterého jsem dosáhl právě pro zadané rozměry (Obr. 36). Výsledky simulací budou uvedeny v příštích kapitolách.

Na (Obr. 39) je vidět vymodelovaný stator a rotor RSM ve 3D. Na stroji zatím chybí statorové vinutí, které navrhnu v dalším bodu návrhu.



Obr. 39 - Vymodelovaný stator a rotor RSM ve 3D

3.1.3 Návrh vinutí

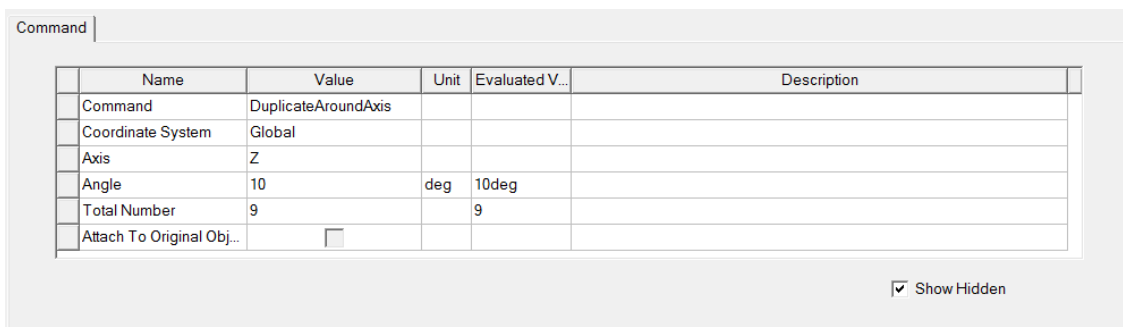
Nyní k úplnosti modelu schází vinutí statoru, které, jak bylo dříve řečeno, odpovídá vinutí běžného asynchronního motoru. Bylo tedy zvoleno vlnové vinutí, které se do modelu vloží opět přes UDP. Zobrazí se opět okno pro zadání rozměrů. Okno je totožné jako pro stator (Obr. 34), zadávají se kompletní rozměry statoru, počet, typ a rozměry drážek, aby program věděl, do jakého objektu bude vinutí vkládáno. Okno parametrů vinutí je rozšířeno o parametry na (Obr. 40). Zde se zvolí dvouvrstvé vinutí a cívkový krok. Další parametry jsou předvyplněné.

FiletType	0		0	0: a quarter circle; 1: tangent connection.
Layers	2		2	Number of winding layers
CoilPitch	7		7	Coil pitch measured in slots
EndExt	5	mm	5mm	One-side end extended length
SpanExt	18	mm	18mm	Axial length of end span; 0 for no span.
SegAngle	10	deg	10deg	Deviation angle for end span (5~15, <5 for true surface).
PolePitch	6		6	Pole pair pitch measured in slots
LenRegion	200	mm	200mm	Region length
InfoCoil	1		1	0: winding; 1: one coil; 100: region.

Show Hidden

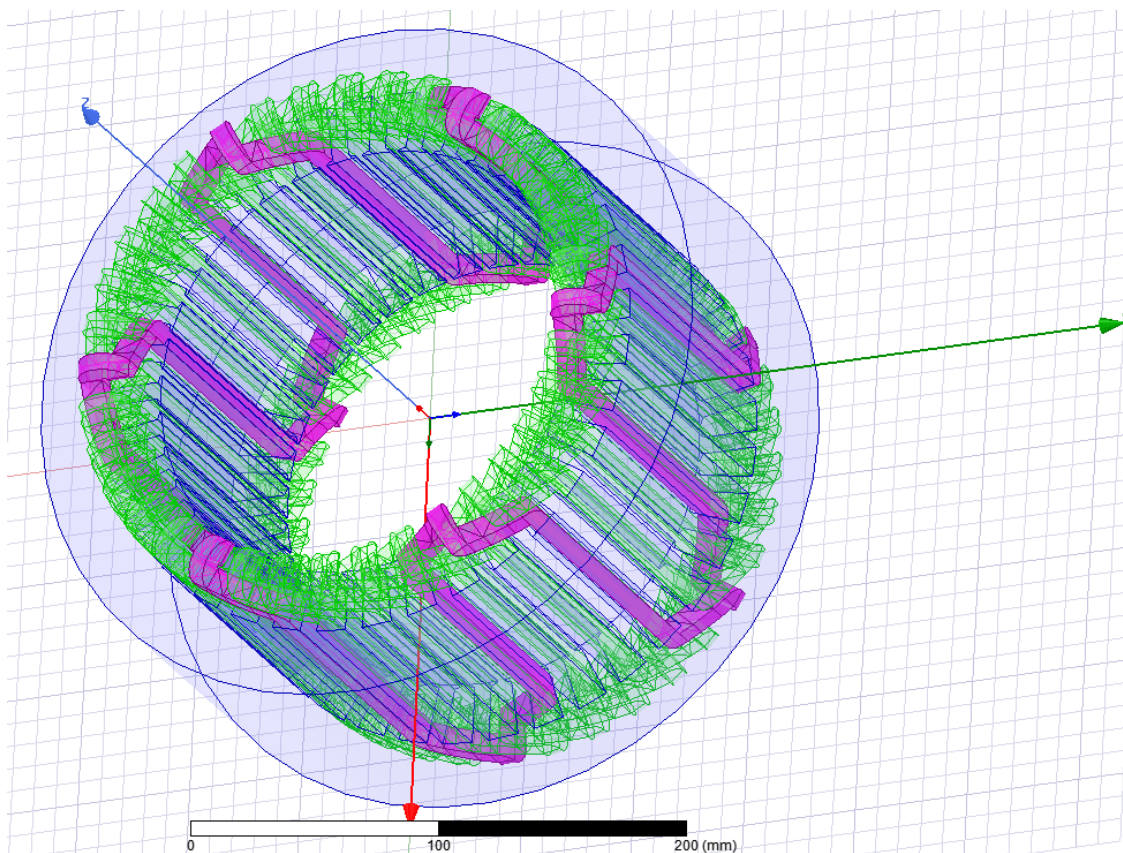
Obr. 40 - Zadání parametrů statorového vinutí

Takto však vytvořím pouze jednu cívku, například tu fialové barvy na obrázku (Obr. 42). Nejjednodušší postup, jak vytvořit zbylé cívky je jejich duplikace. Proto zvolím možnost **Edit** → **Duplicate** → **Around Axis**, což znamená klonování cívky podle jedné ze 3 os. Z obrázku (Obr. 41) je patrné, že duplikace bude probíhat podle osy **Z**. Vzhledem k počtu satorových drážek (36 drážek), je pro čtyřpólový stroj potřeba celkem 9 cívek („Total Number“), dále je třeba zadat úhel, o který se mají cívky podle osy **Z** duplikovat, což je pro 36 drážek 10° („Angle“).



Obr. 41 - Duplikace satorových cívek

Po dokončení duplikace má sator kompletní vinutí (Obr. 42) a model je celý navrhnut. Nyní je možné podrobit vytvořený motor analýzám a výpočtu v nějakém z dostupných řešičů.



Obr. 42 - Sator s kompletním vinutím

3.2 Návrh RSM pomocí RMxprt

Na základě první kapitoly je jasné, že nejnovější verze přináší určitý pokrok v simulování RSM motorů, což spočívá v přidání tohoto typu motoru do návrhového prostředí pro rychlý návrh točivých strojů (RMxprt). To přináší určité zjednodušení, neboť návrh v tomto modulu je značně rychlejší a méně náročný na podrobné znalosti konstrukčních parametrů jako návrh přes UDP.

Začnu tedy vytvořením projektu a vložením RMxprt designu, kde se otevře možnost výběru z různých typů rotorů (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, kapitola 1). Hned od začátku je trochu problém nalézt, pod kterou z možností se RSM skrývá, ale po delším hledání byl stroj objeven pod možností „Generic Rotating Machine“. Tento typ motoru umožňuje návrh více druhů motorů a abych dosáhl RSM motoru, je třeba zadat parametry dle (Obr. 43Obr. 43).

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Source Type	AC			AC or DC source to deliver electrical power	<input type="checkbox"/>
Structure	Inner Rotor			Inner rotor, outer rotor, or axial-flux rotor	<input type="checkbox"/>
Stator Type	SLOT_AC			The stator core type	<input type="checkbox"/>
Rotor Type	NONS_RELU			The rotor core type	<input type="checkbox"/>

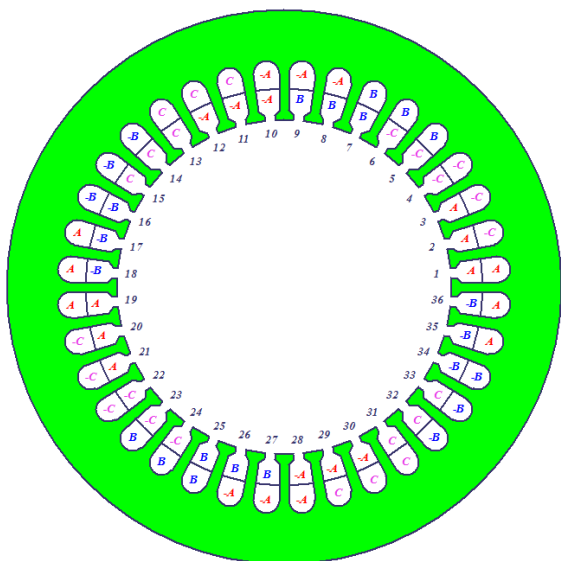
Show Hidden

Obr. 43 - Vytvoření RSM motoru v RMxprt

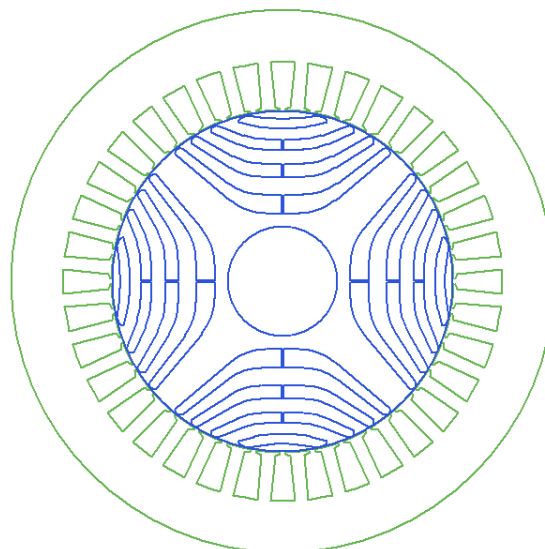
„Source Type“ zvolím AC, protože se jedná o střídavý stroj. Ve struktuře se dá navolit, zda má mít motor vnitřní, nebo vnější rotor, zvolím tedy vnitřní „Inner Rotor“. Konstrukci statoru chci jako u asynchronního stroje, zvolím tedy drážkovaný a střídavý „SLOT_AC“ a poslední nejdůležitější nastavení v záložce „Machine“ je zvolení typu rotoru. RSM rotor se skrývá pod označením „NONS_RELU“.

Nyní se ve stromové struktuře projektu (Obr. 6) posunu k návrhu statoru. Postup návrhu nebude popsán tak podrobně jako v předešlém bodě, protože je velmi analogický. Pouze pro porovnání s návrhem pomocí UDP jsou v přílohách přiloženy parametry, které je zde potřeba zadat (příloha 8.2).

Pokud budu postupovat chronologicky dle stromové struktury, dalším bodem je zvolení typu drážky a zadání rozměrů. To je obdobné jako v UDP (kapitola 3.1), výhodou je možnost zadání autodesignu, kdy program vytvoří nejvhodnější tvar drážky. Návrh vinutí se opět velmi podobá UDP, (příloha 8.2). Dále je potřeba nastavení parametrů vinutí, které se opět neliší, takže nastavím totožně s UDP a potvrdím. Automaticky se vytvoří propojení, polarita a fáze jednotlivých cívek (Obr. 44) tak, aby při připojení střídavého napájení vzniklo točivé magnetické pole. Propojení jednotlivých cívek je přiloženo v příloze (příloha 8.3).



Obr. 44 – Vygenerované rozložení vinutí



Obr. 45 - Model RSM v RMXprt

Nejprve nastavím v poloze „Rotor“, kolikapólový stroj navrhují a pokračuji k zadání základních rozměrů a materiálu v možnosti „Core“, kde navíc doplním číselník plnění „Stacking Factor“ na hodnotu mezi 0,9 a 0,99. Zadávací tabulka vypadá stejně jako u statoru, kam zadám stejné rozměry jako v UDP a ještě zvolím tvar magnetických bariér, kde je opět na výběr ze 4 základních typů. Rozměry bariér zadám do nastavení „Pole“ (Obr. 46). Zde je opět výhoda určitého autodesignu, kdy RMXprt bariéry přizpůsobí.

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only
Barriers per Pole	4			Number of barriers in one pole	<input type="checkbox"/>
H	0.5	mm	0.5mm	Dimension H	<input type="checkbox"/>
W	2	mm	2mm	Dimension W	<input type="checkbox"/>
R	5	mm	5mm	Barrier fillet radius R	<input type="checkbox"/>
R0	30	mm	30mm	Barrier arch center location R0	<input type="checkbox"/>
Rb	36.5	mm	36.5mm	Incircle radius of the bottom barriers	<input type="checkbox"/>
B0	10	mm	10mm	Bottom width of the first barrier	<input type="checkbox"/>
Y0	9.5	mm	9.5mm	Bottom width of the first tooth	<input type="checkbox"/>
Barrier Auto Arrangement	<input checked="" type="checkbox"/>			Check the box to let barriers be auto-arranged	<input type="checkbox"/>

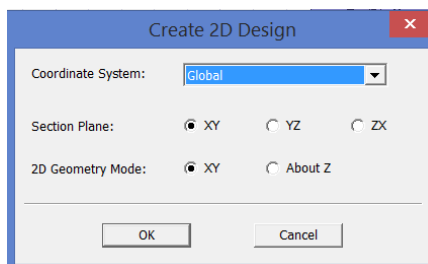
Show Hidden

Obr. 46 - Nastavení rozměrů bariér

RMXprt vytváří model postupně s přidáváním rozměrů jednotlivých částí. V rámci tohoto modulu je model pouze drátový a nezobrazuje vinutí (Obr. 45), jinak je model totožný jako v předešlé kapitole. Dále je možné, dle kapitoly 1, model vyexportovat do plnohodnotného 2D/3D modelu. Simulace funkce stroje nebude probíhat na modelu z RMXprt, důvody jsou uvedeny v závěru práce.

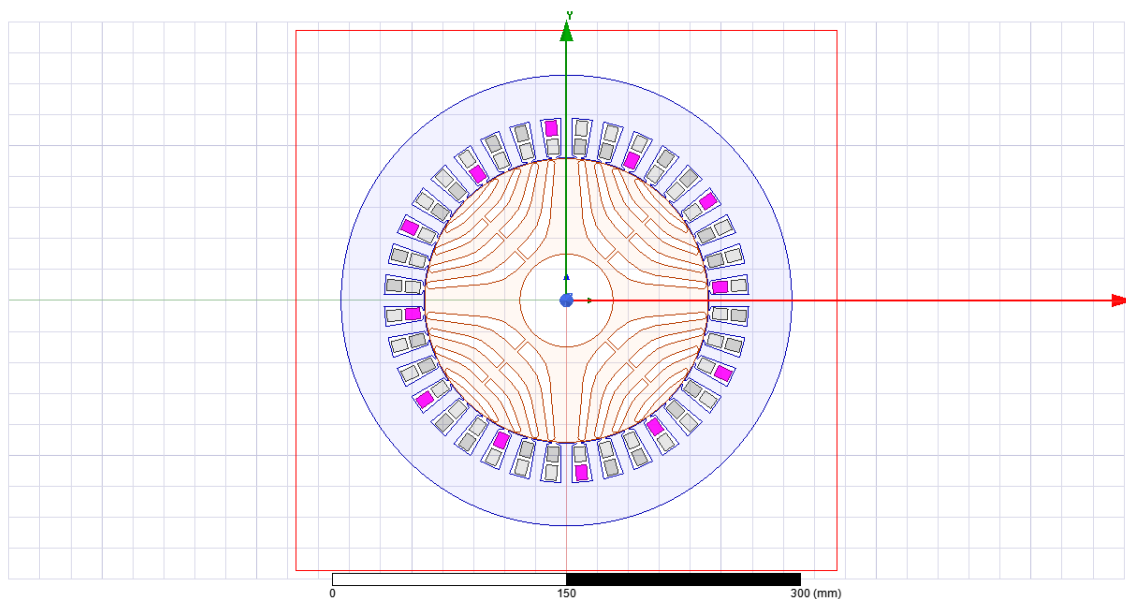
4 Simulace funkce motoru

Po úspěšném vytvoření 3D modelu reluktančního synchronního motoru v Maxwell 3D je možné vytvořit 2D model, který bude pro simulaci chodu stroje vhodnější. Výrazně se sníží výpočetní doba, protože výpočet 3D modelu by zabral i několik dní. Proto začnu vytvořením 2D řezu, který lze udělat přes volbu **Maxwell 3D** → **Create 2D Design**. Objeví se následující okno.



Obr. 47 - Tvorba 2D modelu řezem

Nyní zvolím řez a geometrii podle os **XY** a potvrdím. Automaticky se vytvoří řez motoru (Obr. 48), kde je vidět rotor, stator a rozřezané jednotlivé cívky.



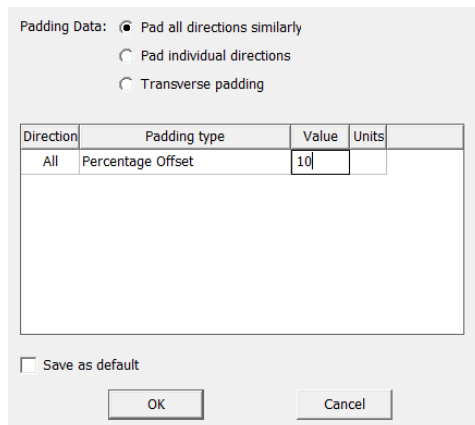
Obr. 48 - Řez motoru

Vzhledem k tomu, že model byl vytvořen pomocí UDP, nejsou zde nastaveny žádné parametry a vše je nutné zadat ručně. To je určitá nevýhoda oproti vyexportovanému modelu z RMxpert, kdy je v cívkách automaticky nastavené buzení, region, hranice výpočtu, časy výpočtu atd.

4.1 Nastavení simulace pro Magnetostatic

4.1.1 Nastavení hranice výpočtu

Nejprve je potřeba nastavit region výpočtu (viz kapitola 1). Ten se vytvoří tlačítkem z panelu nástrojů, kde zvolím hodnotu procentního přesahu na 10 % za hranice modelu (Obr. 49).

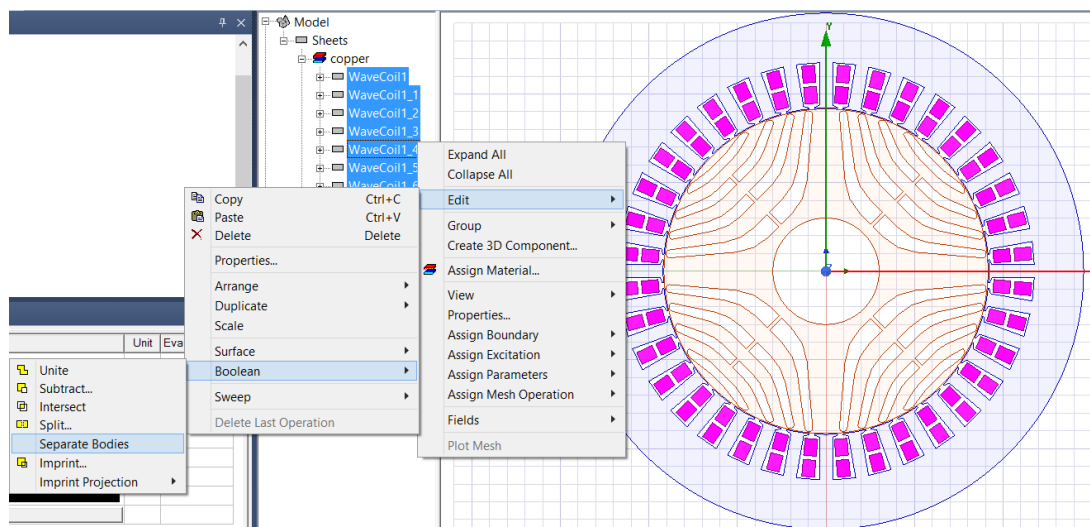


Obr. 49 - Nastavení regionu výpočtu

Region se vytvoří v podobě červeného čtverce kolem modelu (Obr. 48). Nyní je nutné zvolit výběr hran místo objektů, označit všechny 4 hrany čtverce a následně v okně „Project Manager“ (Obr. 2) nastavit hrany regionu v možnosti „Boundaries: Assign Boundary → VektorPotencial“, čímž se nastaví hranice výpočtu.

4.1.2 Nastavení buzení

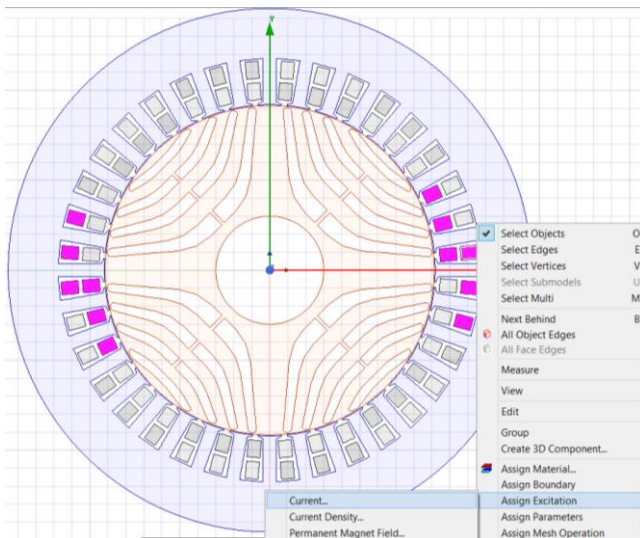
Dále je potřeba nastavit buzení do statorového vinutí. Budu tedy vycházet z rozvržení fází, jaké vytvořil RMxprt (Obr. 44).



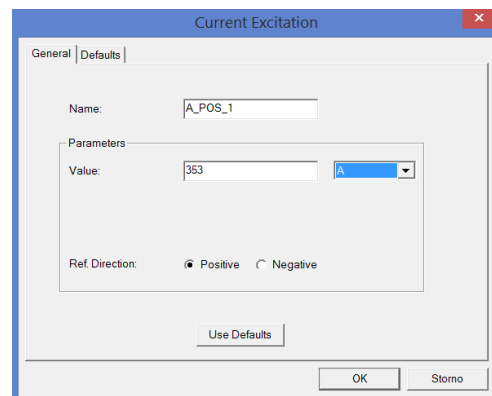
Obr. 50 – Postup rozdělení jednotlivých cívek na samostatné objekty

Vytvořený 2D řez sebou nese nastavení z 3D modelu a jednotlivé cívky jsou spojené do jedné sekce s původně zadaným cívkovým krokem (Obr. 48). Je tedy nezbytné tyto sekce přes možnost **Edit** → **Boolean** → **Separate Bodies** rozdělit. Nyní je každý „fialový obdélníček“ samostatným objektem (Obr. 50).

Dále je nutné označit cívky, které náležejí jedné fázi a směru proudu, na obrázku (Obr. 51 a) jsou vybrané cívky pro kladný směr fáze A (rozvržení cívek dle příslušných fází dle (Obr. 44)). Zde je nutné rozlišit, zda bude úloha řešena pomocí magnetostatického nebo transientního řešiče, protože pro statické úlohy se buzení zadává jako hodnota proudu nebo proudové hustoty. Pro přechodné děje je nutné z jednotlivých vodičů vytvořit cívky „Coil“, které se následně přidávají pod vinutí jednotlivých fází „Winding“, kde se buzení zadá například jako napěťová funkce, v tomto případě sinusová funkce pro střídavé napětí. Nejprve mě budou zajímat mapy pole v řešiči Magnetostatic, takže nastavím proudové buzení dle (Obr. 51 b).



a)



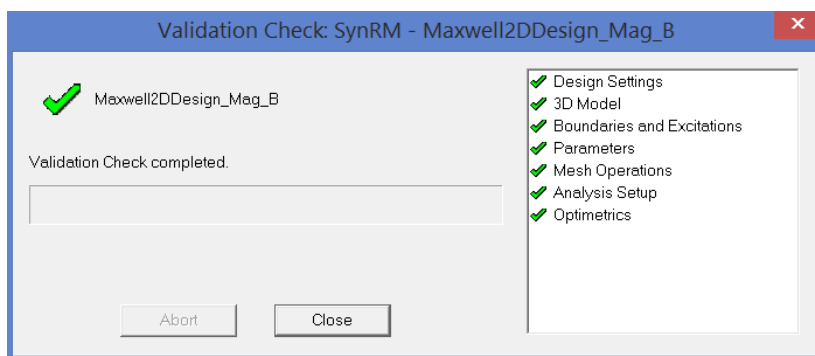
b)

Obr. 51 - a) označení cívek fáze A pozitivní; b) nastavení proudového buzení jedné cívky fáze A

Dále zvolím jednotky a hodnotu proudu a určím směr proudu zvolením „Positive“ – z nárysny, nebo „Negative“ – směr za nárysnu. Z návrhu asynchronního motoru v RMXprt je jmenovitý proud motoru v efektivní hodnotě 25 A, nastavím tedy pro RSM stejnou hodnotu. Zde si musím dát pozor, protože v Maxwell se zadává proud pomocí ampérvávitů v cívce. V jedné cívce se nachází 10 závitů, je proto nutné zadat hodnotu proudu v ampérvávitěch. Dále je nutné efektivní hodnotu přepočítat na maximální v amplitudě, 25 A je tedy třeba vynásobit $\sqrt{2}$, což je 35,3 A pro jeden závit a pro celou cívku je hodnota buzení 353 ampérvávitů. Tato je pouze pro fázi A. Ostatní dvě fáze budou mít poloviční hodnotu, protože se jedná o statické úlohy, pomyslně „zastavím“ třífázový průběh proudu v amplitudě právě fáze A v čase 5 ms, kdy v tuto chvíli je hodnota proudu obou zbývajících fází poloviční a opačné polarity (pro frekvenci 50 Hz, kdy jedna perioda trvá 20 ms).

To je potřeba udělat pro všechny fáze a oba směry proudu. Vzhledem k optimalizaci simulace je vhodnější nenastavovat buzení konstantní hodnotou proudu, nýbrž pomocí proměnné. Hodnotu proudu lze následně měnit jednoduše pro všechna vinutí pouze změnou dané proměnné a není potřeba měnit hodnotu pro každou cívku zvlášť.

Stejně jako při řešení v RMXprt je i zde před spuštěním nutná validace, která se spustí stejným způsobem (viz kapitola 1). Zde je ale kontrolováno více parametrů.



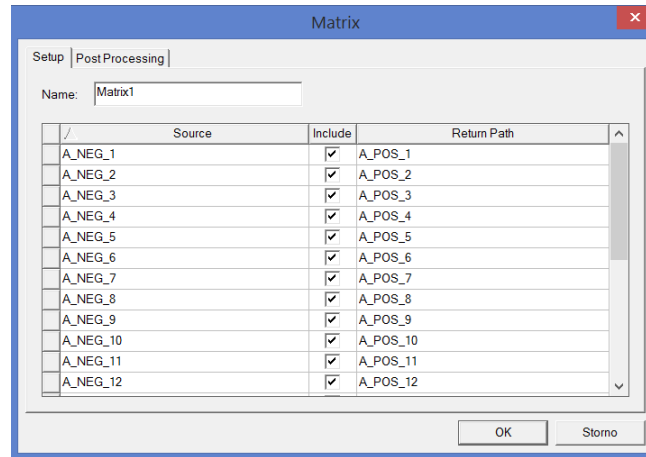
Obr. 52 - Validace projektu v Maxwell

První kontrolovanou položkou jsou globální proměnné. Kontrola 3D modelu v 2D řezu znamená kontrolu nastavení hloubky modelu, která je převzata ze zadané délky objektů. Následně se kontrolují hranice výpočtu a nastavení buzení a parametrů. Zkontroluje se výpočetní síť a „Analysis Setup“ je obdobný jako u RMXprt, akorát jsem zde v možnosti „Solver“ zvýšil přesnost výpočtu na $1e-6$. Pokud není používán externí obvod, bere se jako přesnost výpočtu právě tato hodnota. Posledním bodem je nastavení parametrické analýzy, která bude využita k výpočtu indukčností (bude popsáno později). Po úspěšné validaci je možné simulaci spustit. Pokud se místo zelené fajfky objeví u některého bodu červený křížek, je potřeba se k příslušnému nastavení vrátit a opravit ho.

4.1.3 Nastavení pro výpočet indukčností

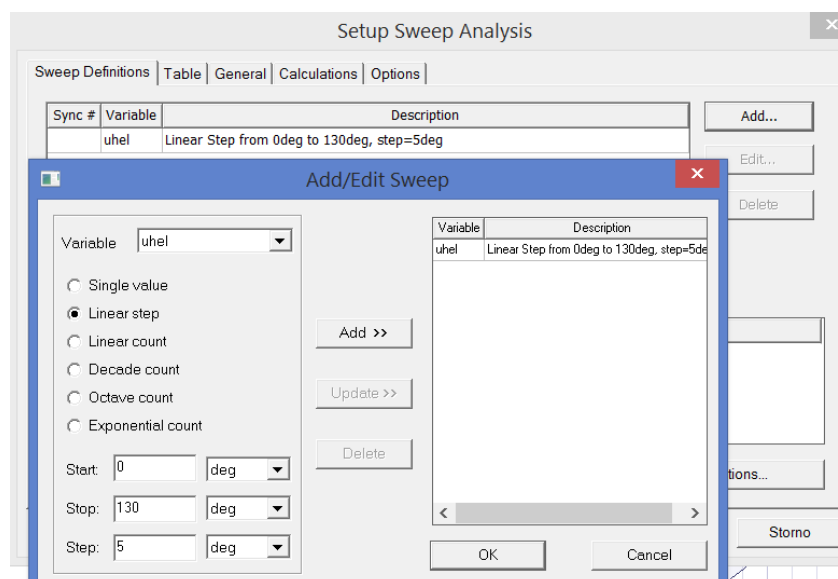
Jak bylo popsáno v teorii RSM v druhé kapitole, poměr indukčností je kvalitativním ukazatelem motoru. Zjišťovat tedy budu indukčnost v podélné a příčné ose. Pro zkrácení doby výpočtu bude indukčnost opět počítána ve 2D řezu. Použiji projekt, který byl nastaven v předchozích kapitolách a upravím nastavení buzení, protože indukčnost budu počítat na cívkách jedné fáze, zvolil jsem fázi A. Nyní je potřeba nastavit parametr „Matrix“ (matice), jedná se o bod „Parameters“ (Obr. 52). V nastavení „Matrix“ (Obr. 53) jsou vidět všechny cívky fáze A. Ve sloupci „Source“ jsou buzené cívky a ve sloupci „Return Path“ jejich návratová cesta. V druhé záložce „Post Processing“ se nastavuje počet závitů jednotlivých cívek, který je pro každou cívku 10.

Výsledkem „Matrix“ je matice indukčností. Vzhledem k počtu prvků 12 cívek pro jednu polaritu fáze A, bude výsledkem matice 12x12. Na hlavní diagonále budou vypočítány vlastní indukčnosti a na vedlejších indukčnosti vzájemné.



Obr. 53 - Nastavení "Matrix"

Aby bylo možné spočítat indukčnosti v podélné a příčné ose, je potřeba rotorem motoru během simulace otáčet. Protože se jedná o statickou simulaci, probíhá výpočet tak, že proběhne pro jednu polohu rotoru, pak se musí zadat, o kolik se má rotor otočit a opět proběhne výpočet. To lze zadat pomocí parametrické analýzy, kdy se označí rotor a z panelu nástrojů se vybere ikonka pro rotaci (místo zadání konkrétních stupňů, o kolik se má rotor otočit), se do pole napíše pouze proměnná úhel, protože výsledkem má být hodnota indukčnosti v závislosti na úhlu natočení rotoru. Dále zvolím, podle které osy se má rotor otáčet. Po potvrzení se program zeptá na hodnotu proměnné úhel, kterou je nejlepší nastavit na nulu. Všechny lokální proměnné a jejich hodnoty se zobrazují v záložce **Maxwell 2D** → **Design Properties**.



Obr. 54 - Nastavení parametrické analýzy

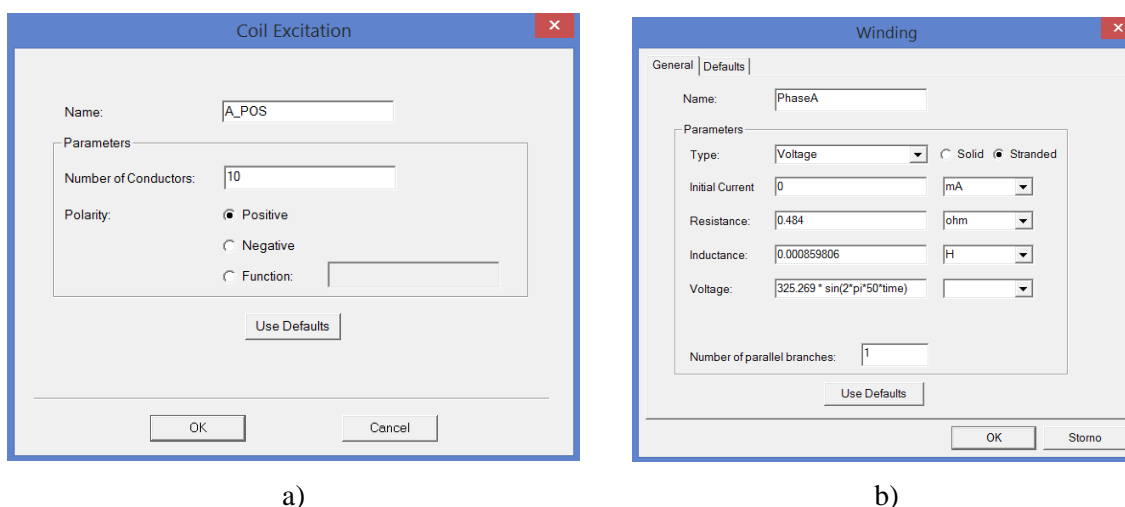
K nastavení samotné parametrické analýzy se musí ve stromě projektu zvolit **Optimetrics** → **Add** → **Parametric**. Zde se nastaví, jak se má parametr úhel měnit. Ve „Sweep Definitions“ zvolím možnost „Add“ a v modrém okně (Obr. 54) se zvolí nejprve proměnná úhel, lineární krok a počáteční a konečná hodnota spolu s krokem. To určí, jak se bude rotor v každém kroku pootáčet. V záložce „Table“ se vypíší všechny kroky analýzy, což slouží pouze pro kontrolu.

4.2 Nastavení pro transientní simulaci

Nastavení simulace pro přechodné děje (transientní) se od nastavení pro statické děje odlišuje nastavením buzení, pohybu rotoru a nastavením časových podmínek, neboť přechodné děje probíhají po určitou dobu.

4.2.1 Nastavení buzení

Buzení je tedy nutné nastavit (viz kapitola 4.1.2) tak, že se zvolí cívka příslušné fáze a polarity stejně jako u statického řešiče (Obr. 51 a), v transientním řešiči k možnosti buzení proudem a proudovou konstantou přibyla možnost „Coil“.



Obr. 55 - a) Nastavení "Coil"; b) Nastavení vinutí "Winding" jednotlivých fází

Zde je vhodné cívky pro přehlednost pojmenovat dle fáze a polarity (Obr. 55 a). Je nutné zadat počet vodičů v jedné cívce a polaritu dané fáze. Toto nastavení se opět provede pro všechny tři fáze a obě polarity. Tím se ve stromové struktuře vytvoří celkem 72 položek buzení (36 drážek krát 2 cívky). Nyní v „Excitation“- buzení vytvořím vinutí jednotlivých fází (**pravé tlačítko myši** → „Add Winding“) celkem 3 a do každého vinutí přidám buzení cívek pro kladnou i zápornou polaritu.

Vinutí je vhodné přejmenovat dle dané fáze a dále se nastaví typ buzení (napěťové, proudové, externí) (Obr. 55 b). Externí napájení je k dispozici pro podporované typy strojů, kdy RMXprt vytvoří sám externí napájecí obvod, bohužel RSM motor takto podporován zatím není. Dá se ale očekávat, že

v příštích verzích budou možnosti bohatší a RSM motor půjde navrhnout stejně jednoduše jako ostatní typy motorů.

V nastavení buzení je dále nutné zadat odpor vinutí. Tuto hodnotu jsem převzal z odporu vinutí asynchronního stroje, vytvořeného v RMxprt. Stejně tak hodnotu indukčnosti vinutí. Buzení je reprezentováno napětíovou funkcí, která je rovněž převzata z asynchronního stroje. To znamená, že motor bude simulován v ustáleném stavu při konstantním napájení třífázovým průběhem. Napětíová funkce je dána následující rovnicí:

$$U = U_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t - \varphi) \quad (19)$$

kde U_{max} je amplituda napětí $U_{max} = 230 \cdot \sqrt{2} = 325,269 \text{ V}$

f je frekvence napájecího napětí a je rovna 50 Hz

t je čas a jedná se o systémovou proměnnou

φ je fázový posun

Pro jednotlivé fáze s dosazenými hodnotami vypadají napětíové rovnice následovně:

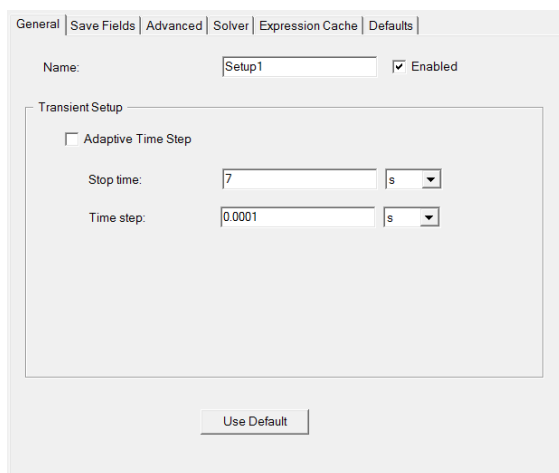
$$\text{Fáze A:} \quad U_A = 325,269 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) \quad (20)$$

$$\text{Fáze B:} \quad U_B = 325,269 \cdot \sin\left(2\pi \cdot 50 \cdot t - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (21)$$

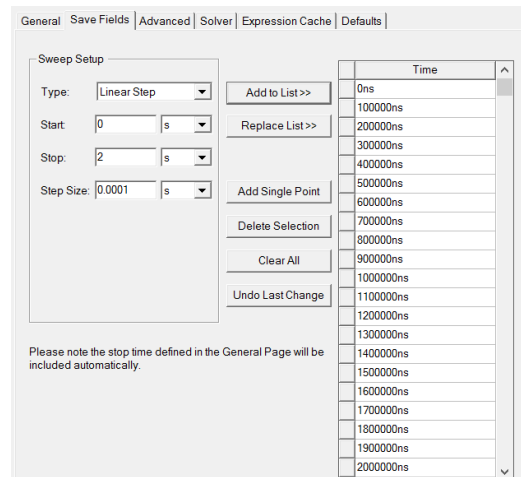
$$\text{Fáze C:} \quad U_C = 325,269 \cdot \sin\left(2\pi \cdot 50 \cdot t - \frac{4}{3}\pi\right) \quad (22)$$

4.2.2 Nastavení časových podmínek simulace

Při simulaci přechodných dějů je důležité zadat dvě časové hodnoty. Nejprve konečný čas „Stop Time“ a dále časový krok „Time Step“, s kterým se má úloha řešit. Volba kroku je důležitá a značně ovlivňuje dosažené výsledky (kapitola 1). Je nutné zvolit kompromis mezi přesností výpočtu a časovou náročností. Většina následujících úloh bude řešena s krokem 0.0001 sekundy.



a)



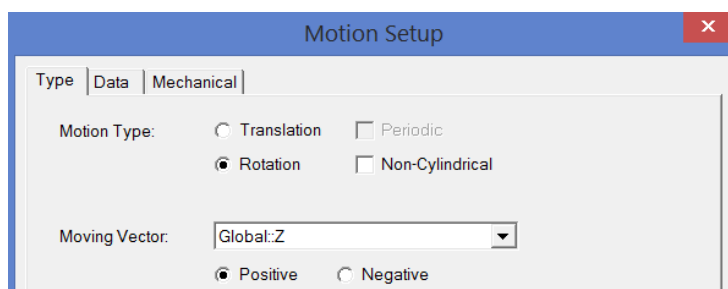
b)

Obr. 56 – a) Nastavení konečného času a kroku výpočtu; b) Nastavení ukládání obrázků polí

Nastavení časových podmínek se provádí v záložce „Analysis“. V záložce „General“ (Obr. 56 a) nastavím dva důležité časové kroky a přesunu se k druhé záložce „Save Fields“ (Obr. 56 b). Zde se obdobně nastavují časové hodnoty, které určují, kdy se mají ukládat data o polích. Navíc je tu hodnota začátku ukládání, dále se nastaví krok a konec, stejně jako u předešlého nastavení. Dále je tu možnost nastavení typu, já budu počítat s lineárním krokem, ještě se tu nachází lineární počet a logaritmické měřítko. Následně se musí kliknout na tlačítko „Add to list“, které vytvoří tabulku časových okamžiků, kdy se pole budou ukládat.

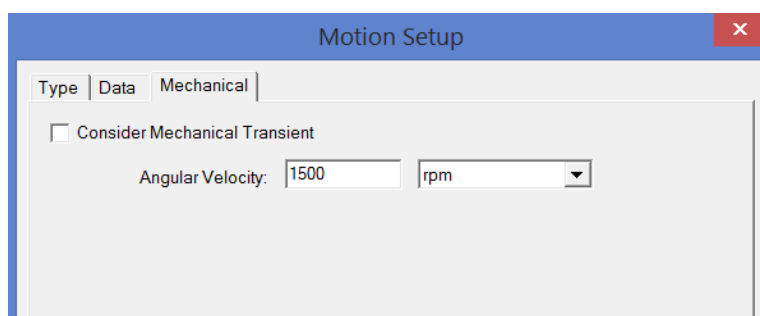
4.2.3 Nastavení pohybu rotoru

V transientním řešiči již není třeba zadávat otáčení rotoru přes parametr, ale nastavuje se pomocí „Model“ kde se nastaví „Motion Setup“ (viz kapitola 1). Nejprve je potřeba programu říct, jaká část modelu se má otáčet, protože se má otáčet rotor, je nutné nakreslit kruh, který bude mít stejný průměr jako rotor, nebo může mít hranu i v půlce vzduchové mezery. Po označení tohoto kruhu je nutné ho nastavit jako „Band“ (Obr. 57) Pokud je model motoru exportován z RMxpert, je vše potřebné již nastaveno.



Obr. 57 - Nastavení "Motion Setup"

Zde je nutné zadat rotační pohyb a osu otáčení. V další záložce „Data“ se nachází možnost zadání počátečních podmínek, jako je úhel natočení a rotační limit. V posledním bodě nastavení, „Mechanical“ nastavím pro ustálený stav rychlost otáčení na 1500 otáček za minutu (Obr. 58). Pokud bych řešil například rozběh motoru, je potřeba zaškrtnout políčko „Consider Mechanical Transient“, kde se následně zadá počáteční rychlost, moment setrvačnosti, tlumení a zátěžný moment. Vzhledem k tomu, že bude řešen jen ustálený stav, nebude toto další nastavení rozebíráno.

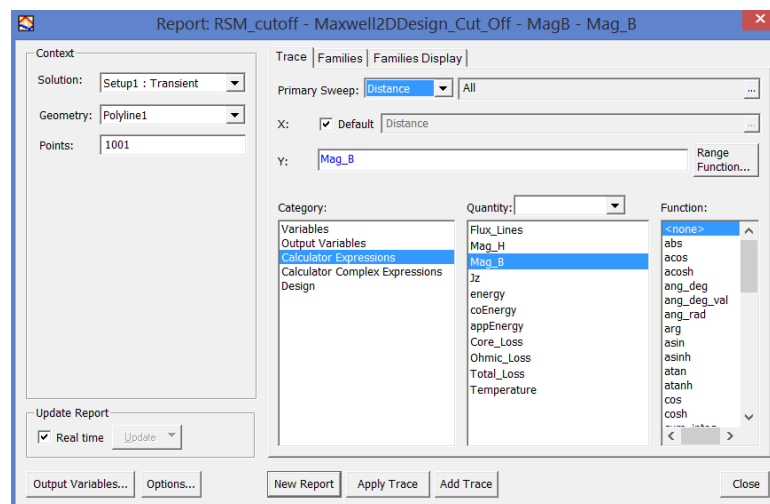


Obr. 58 - Nastavení "Mechanical"

4.2.4 Nastavení výpočtu magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Aby bylo možné zobrazit nějakou veličinu, je třeba zvolit, na jakém objektu se má zobrazovat. Je proto nezbytné do vzduchové mezery umístit nějaký objekt, na kterém se bude průběh magnetické indukce zobrazovat. Nejvhodnější je umístit do středu vzduchové mezery kružnici. Tu je ale třeba nakreslit jako křivku. Zvolí se tedy kreslení „3 point arc“ – oblouk určený třemi body. Body jdou zadat buď pomocí souřadnic dle os **X** a **Y**, nebo pomocí kliknutí do pracovní plochy. Nakreslí se dva tyto oblouky, které se následně spojí v jednu „Polyline“.

Při tvorbě grafu v nastavení „RectangularPlot“ je nezbytné nastavit geometrii, na které se má magnetická indukce zobrazovat, jako „Polyline“. Výsledkem tedy bude hodnota magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti po křivce „Polyline“ ve vzduchové mezeře.



Obr. 59 - Nastavení zobrazení magnetické indukce na křivce

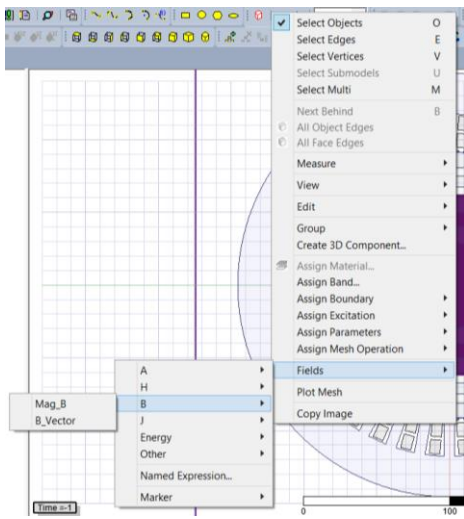
4.3 Zobrazení výsledků simulace

Magnetostatický řešič slouží k zobrazení map polí, vektorů, indukčností atd. (viz kapitola 1). Pokud se tedy povedlo simulaci dle předešlých kapitol správně nastavit, projít validací a výpočet proběhl až do konce, je nyní možné zobrazit výsledky.

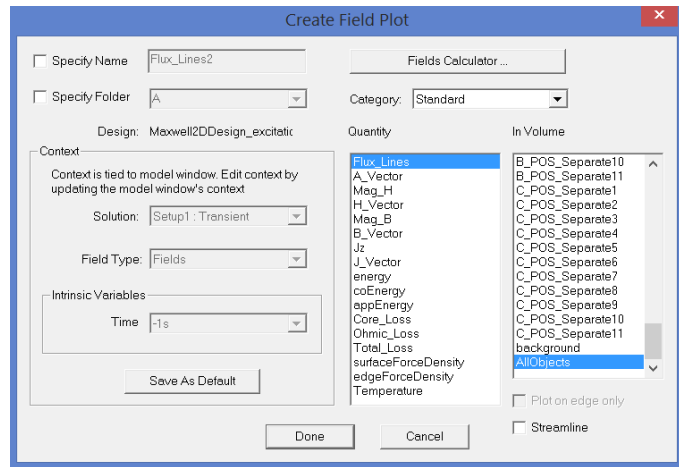
Na výběr je zobrazení mapy celého pole, nebo pomocí vektorů. Pro zobrazení je nutné zvolit, ve které rovině chci pole vidět. Proto v okně návrhu v možnostech „Planes“ zvolím **XY**, neboť je motor v řezu podle těchto os. Kliknutím do plochy se dále vybere konkrétní pole (Obr. 60 a), které chci zobrazit. Otevře se okno (Obr. 60 b), ve kterém jsou vidět všechny možnosti, které lze zobrazit. V pravém sloupci se volí, na kterých objektech má být pole zobrazeno. Pro ověření funkce stroje je nejlepší poslední bod „All Objects“, kdy se pole zobrazí na celém modelu.

Zde je opět určitá odlišnost v zobrazování výsledků mezi statickými a přechodnými ději. Výsledek statického děje se ukáže v jedné poloze a v jednom časovém okamžiku. Pro přechodný děj se

při zobrazování musí zvolit, ve kterém čase se má pole zobrazit. To je závislé na nastavení ukládání, které bylo nastaveno výše. Grafy se zobrazují dle postupu popsaném v kapitole 1.



a)



b)

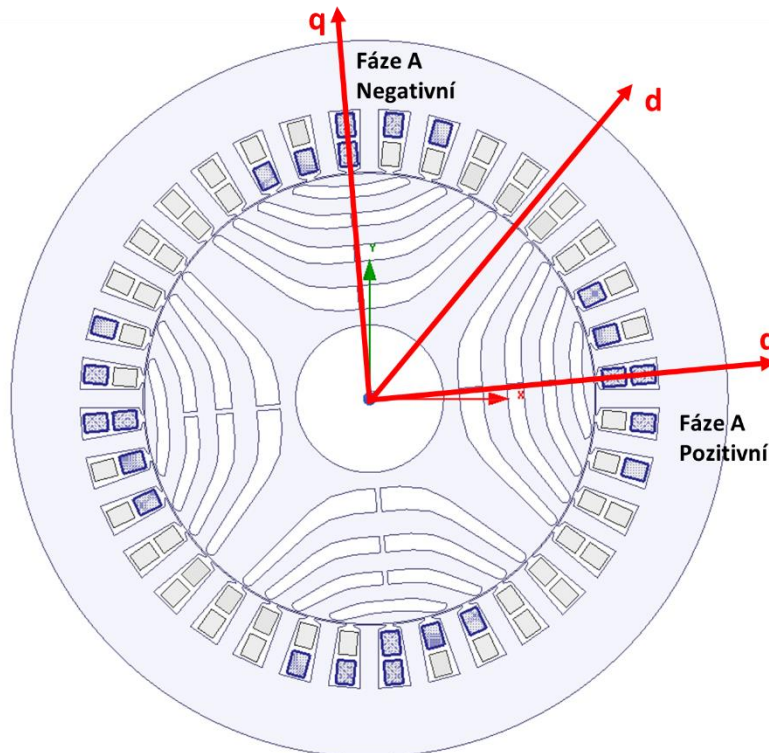
Obr. 60 – a) Cesta k zobrazení polí; b) Nastavení zobrazení obrázku pole

5 Analýza vypočtených dat

5.1 Výsledky magnetostatické simulace

5.1.1 Natočení rotoru do podélné a příčné polohy

Pro vyhodnocení vlastností RSM jsou důležité tři polohy rotoru vůči poli statoru. Jedná se o polohu v ose podélné d , v ose příčné q a v poloze pro jmenovité zatížení. V podélné poloze je rotor zobrazen na (Obr. 61). Osa q musí být přesně v ose vinutí fáze A. Osa q je oproti ose souřadnicového systému posunuta o 5 deg. Což je dáno vybuzeným polem statoru (Obr. 37), kde je podle silokřivek magnetického toku vidět poloha osy d , která je oproti ose X posunuta o 50 deg. Pro příčnou polohu musí být rotor vůči poloze na obrázku (Obr. 61) pootočen o 45 deg. Poloha pro jmenovité zatížení bude popsána v další části práce.

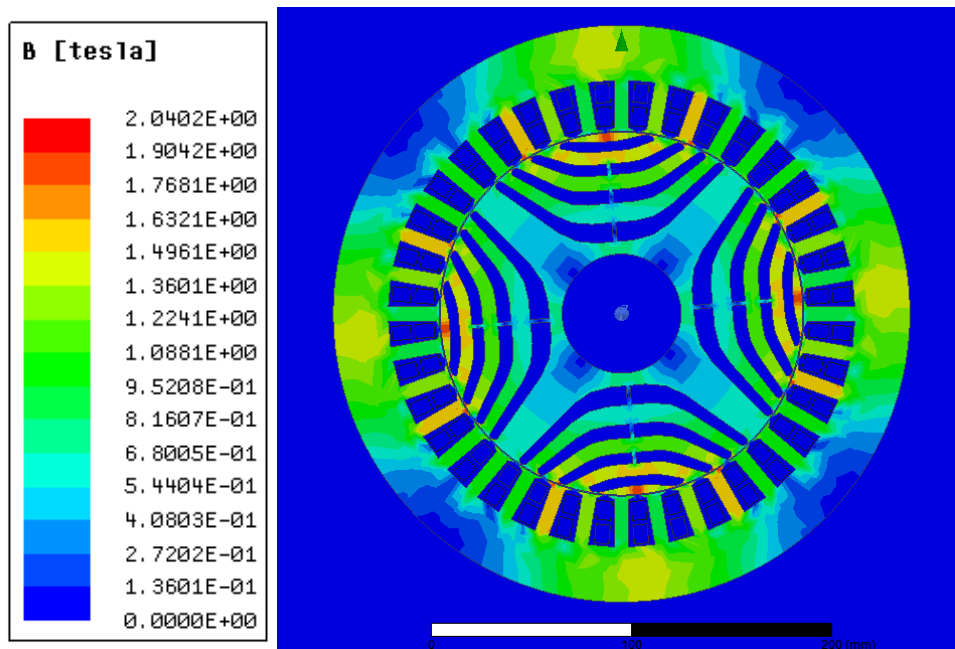


Obr. 61 - Natočení rotoru do podélné polohy

5.1.2 Magnetická indukce a pole statorového vinutí

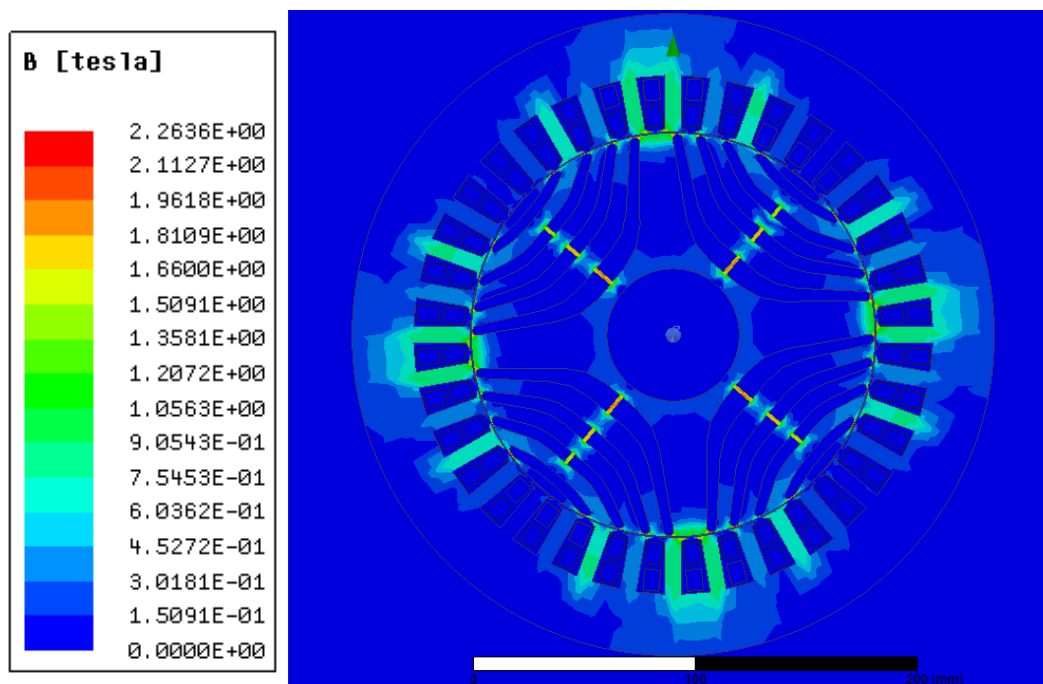
Statické simulace byly nastaveny a vypočteny dle parametrů zadaných v kapitole 4.1. Nyní je tedy možné zobrazit výsledky. Prvním výsledkem, který bude vypovídat o správnosti návrhu je zobrazení nasycení stroje. Tím se dozvíme, zda je buzení jmenovitým proudem převzaté z RMxprt pro

asynchronní stroj dostatečné a jestli je zvolený materiál vhodný. Nejprve se tedy podívám na mapu pole magnetické indukce v případě, že je rotor v podélné ose (Obr. 62).



Obr. 62 - Mapa pole magnetické indukce v podélné ose

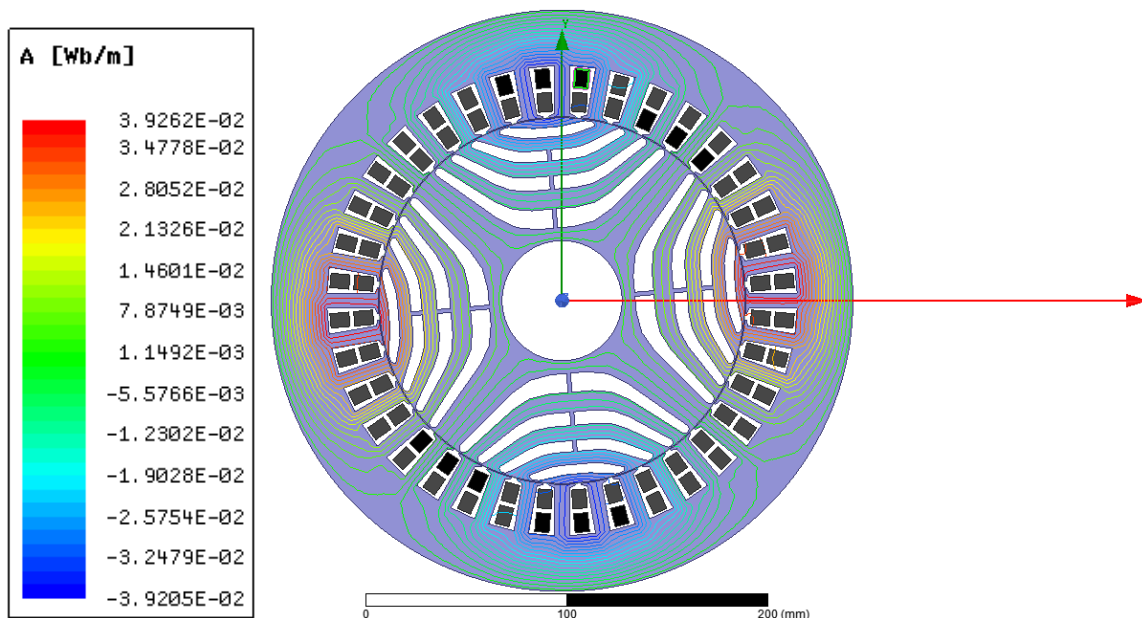
Z obrázku je jasně vidět, že se jedná o čtyřpólový stroj, jak je naznačeno barevnou škálou magnetické indukce na statoru. Je vidět, že se přesycuje především oblast žebér spojujících magnetické bariéry. Dochází i k částečnému přesycování statorových zubů (viz kapitola 2), které jsou přímo naproti hrotu magnetické bariéry. Díky zvolení vhodného tvaru je toto přesycení omezeno. Hodnota magnetické indukce přesahuje lehce hodnotu 1,5 T, na kritických místech dosahuje až 2 T.



Obr. 63 - Mapa pole magnetické indukce v příčné ose

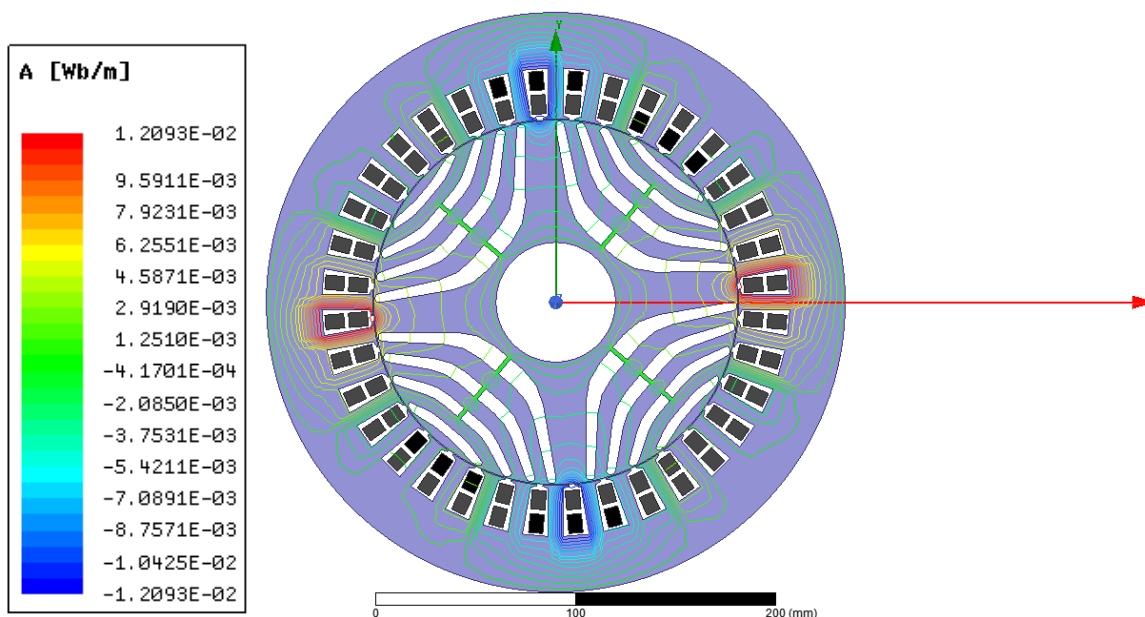
Nyní se podívám na mapu pole magnetické indukce v případě, že je rotor natočen přesně do příčné polohy neboli osy q vůči statorovému poli (Obr. 63). Pro takové natočení rotoru jsou opět vidět čtyři póly statoru, ale stroj je oproti předešlému případu značně nenasyčen. Přesycovány jsou pouze můstky a žebra spojující magnetické bariéry, kde se hodnota magnetické indukce blíží opět hodnotě 2 T.

Lepší představa o tom, jak vypadá pole vybuzené statorovým vinutím bude zřejmá z obrázku magnetického toku, který je zobrazen pomocí jeho silokřivek. Na obrázku (Obr. 64) je rotor opět natočen do podélné polohy. Zde je vidět, jak se silokřivky uzavírají po hlavních cestách magnetického toku cestou nejmenšího odporu. Dále se uzavírají podél magnetických bariér. Silokřivky se díky vhodně tvarovaným magnetickým bariérám nedeformují a mají tvar odpovídající silokřivkám v plném materiálu, podle kterého byl návrh tvořen (Obr. 37). Opět je zde zřejmá čtyřpólová struktura stroje.



Obr. 64 - Silokřivky magnetického toku statoru v podélné ose

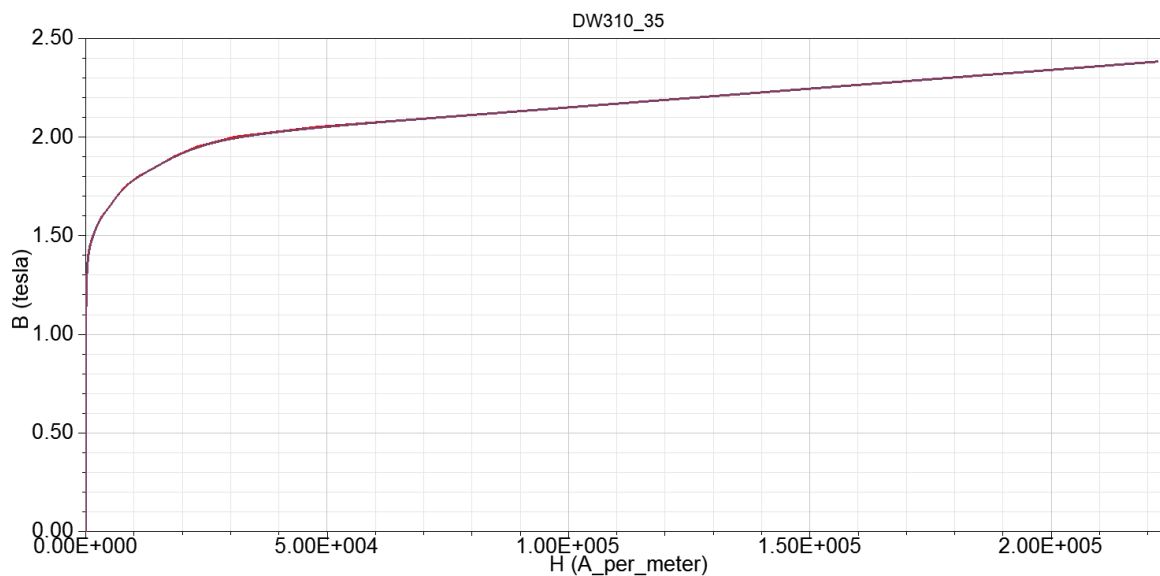
Stejně jako v případě pole magnetické indukce je zobrazena i příčná poloha rotoru pro magnetický tok (Obr. 65). Pokud je rotor natočen do příčné osy, jak bylo vidět na obrázku pole magnetické indukce (Obr. 63), dochází k přesycování můstků spojujících žebra. Na obrázku zobrazujícím silokřivky magnetického toku je vidět, že právě přes tyto můstky se silokřivky magnetického toku uzavírají, což způsobuje ono přesycování. V této poloze dochází ke značné deformaci jednotlivých silokřivek.



Obr. 65 - Silokřivky magnetického toku statoru v příčné ose

Zobrazení zbývajících poloh rotoru mezi podélnou a příčnou osou je uvedeno v příloze (příloha 8.4).

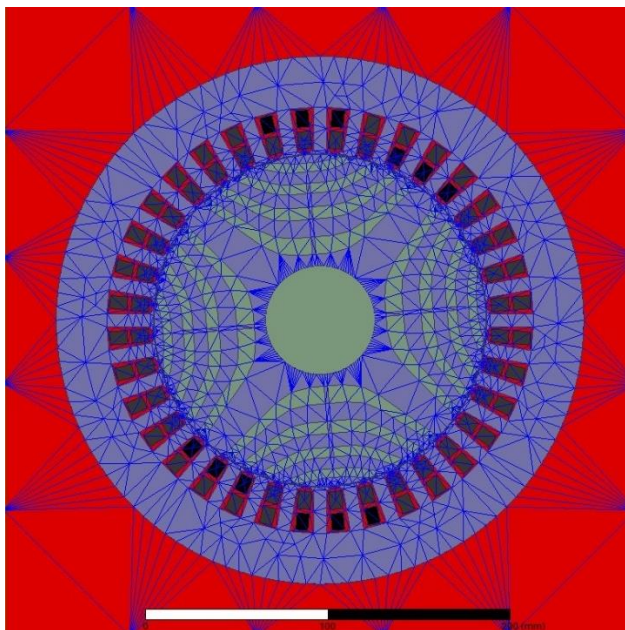
Aby mohlo být zhodnoceno nasycení stroje, je třeba se podívat na magnetizační křivku použitého materiálu. Zvolena byla elektrotechnická ocel pod označením DW_310_35, která má v databázi nahranou BH křivku (Obr. 66.)



Obr. 66 - BH křivka materiálu DW_310_35

Z grafu lze odečíst přibližnou hodnotu kritické magnetické indukce, která je přibližně 1,5 T. Z tohoto důvodu lze o návrhu RSM motoru říct, že je s daným proudovým buzením plně nasycen, ale není přesycen. Pro přesycení by musela hodnota magnetické indukce překročit hodnotu zhruba 2,25 T.

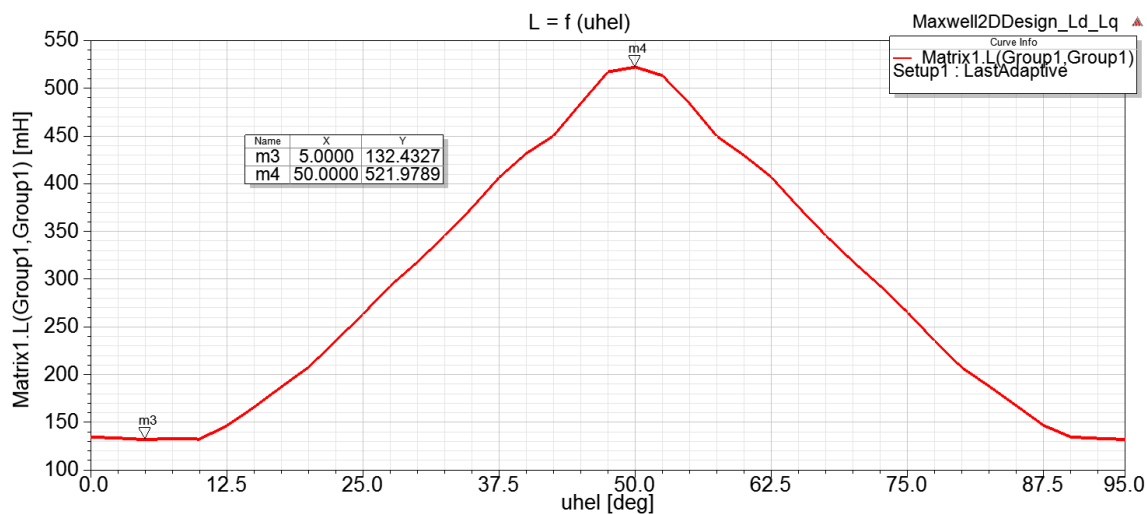
Program si vytvořil na objektu celého výpočetního regionu tzv. autoadaptivním procesem sítí (Obr. 67). Červené okolí motoru je právě region, který byl zvolen na 10 % přesahu za model. Toto okolí je bráno jako vakuum, a tak je v těchto místech síť řídká. Naopak v kritických místech, jako je vzduchová mezera, oblast okolo hřídele je výpočetní síť automaticky zjemněna na menší prvky, čímž je dosaženo přesnějšího výpočtu. Síť může být uživatelsky upravena v možnosti „Mesh Operations“ v projektovém okně, to ale nebylo potřeba, neboť výsledky jsou dostatečně přesné.



Obr. 67 - Výpočetní síť

5.1.3 Indukčnost motoru

Poměr indukčností v podélné a příčné ose je kvalitativní ukazatel stroje (viz kapitola 2). Proto byla dle kapitoly 4.1.3 navržena parametrická analýza a tento poměr byl spočítán. Výsledný průběh indukčnosti, v závislosti na úhlu natočení rotoru je na (Obr. 68).

Obr. 68 - Průběh indukčnosti v závislosti na úhlu natočení rotoru $L_d/L_q=4$

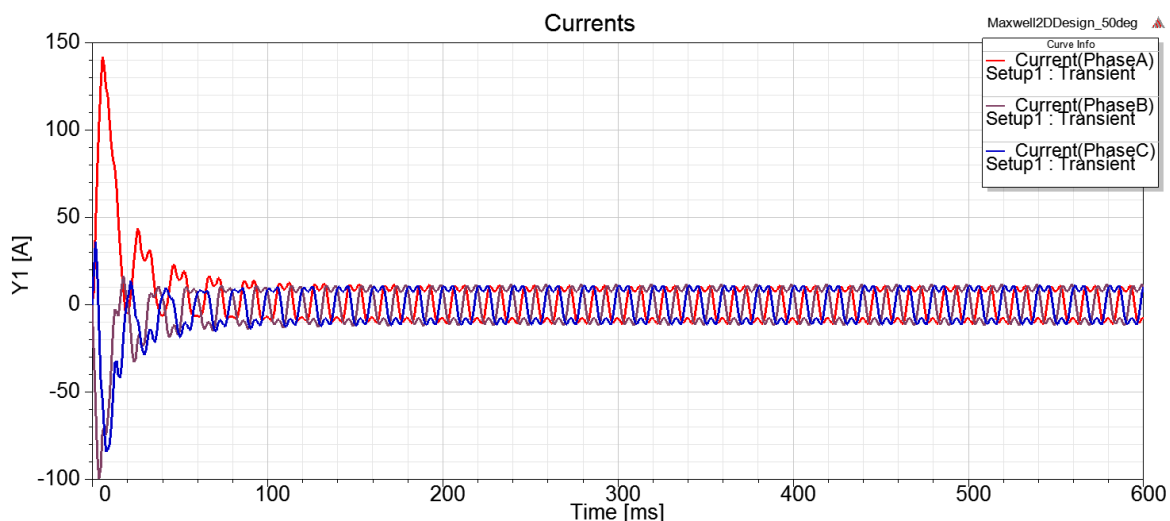
Pomocí funkce vyhledání minima a maxima je na grafu možné nalézt přesné hodnoty nejnižší indukčnosti, která odpovídá indukčnosti v příčné ose $L_q = 132$ mH, která se nachází pro natočení rotoru dle proměnné $\text{uhel} = 5$ deg (Obr. 61). Nejvyšší indukčnosti v podélné ose $L_d = 522$ mH odpovídá natočení rotoru do úhlu 50 deg oproti souřadnicovému systému. Z těchto hodnot vychází, že je poměr indukčností téměř 4. Kvalitní motor by měl dosahovat poměru cca 10. Snažil jsem se dosáhnout co nejvyššího poměru, i když to není úkolem této práce. Dalšího zvýšení by mohlo být dosaženo změnou materiálu a úpravou rozměrů rotoru a geometrie magnetických bariér.

5.2 Výsledky transientní simulace

V transientním řešiči jsou řešeny simulace v ustáleném stavu. Rychlost rotoru je tedy nastavena na jmenovitých 1500 otáček za minutu, která odpovídá napájení ze sítě o frekvenci 50 Hz, dle vztahu (1). Statorové vinutí je buzeno třífázovou napěťovou funkcí, jak je uvedeno v kapitole 4.2.

5.2.1 Proud, moment a magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Nyní popíši průběhy proudů, momentu a magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Vzhledem k tomu, že se jedná o synchronní stroj, kde se rotor otáčí synchronní rychlostí s polem statoru, záleží na výchozím natočení rotoru. Přesněji řečeno, o kolik je podélná osa rotoru vůči točivému poli statoru opožděna. Tento posun je nazýván zátěžným úhlem. Ten má vliv jak na stabilitu chodu motoru, tak na zatížení čili velikost odebíraného proudu a velikost momentu. Ukážu tedy průběh těchto veličin pro 2 různé hodnoty zátěžného úhlu. Pro zátěžný úhel $\delta = 0$ deg je příčná osa rotoru q srovnána přesně s osou fáze A (Obr. 61). Pro tento případ jsou proudy statorovým vinutím zobrazeny na obrázku (Obr. 69).

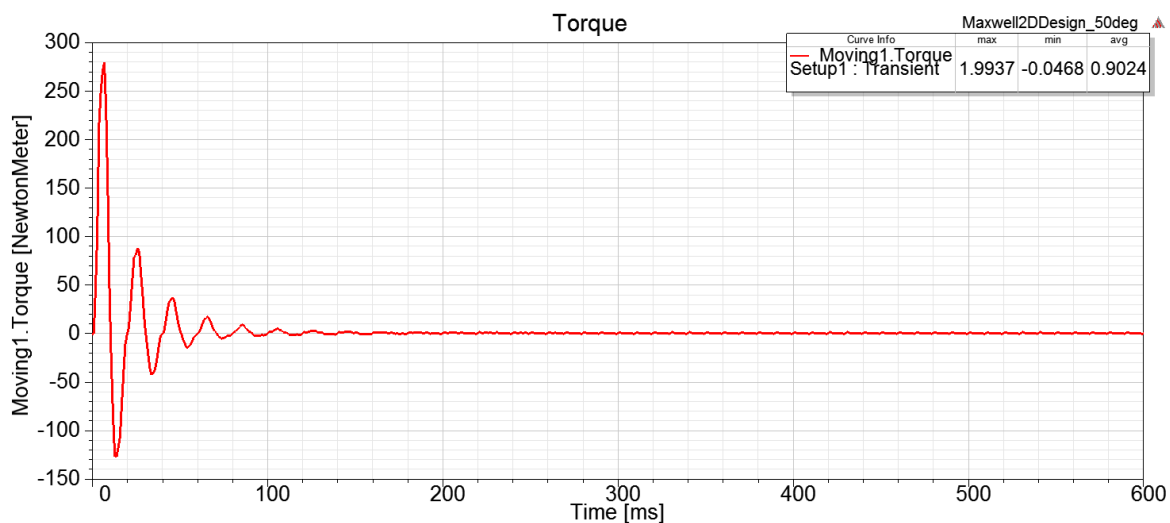


Obr. 69 - Průběh proudu pro zátěžný úhel 0°

Na začátku je vidět krátký přechodný děj, kdy je amplituda proudů několikanásobná oproti jmenovité hodnotě. Přechodný děj se ustaluje s časovou konstantou τ , která je daná poměrem indukčnosti a odporu statorového vinutí (Obr. 55 b).

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (23)$$

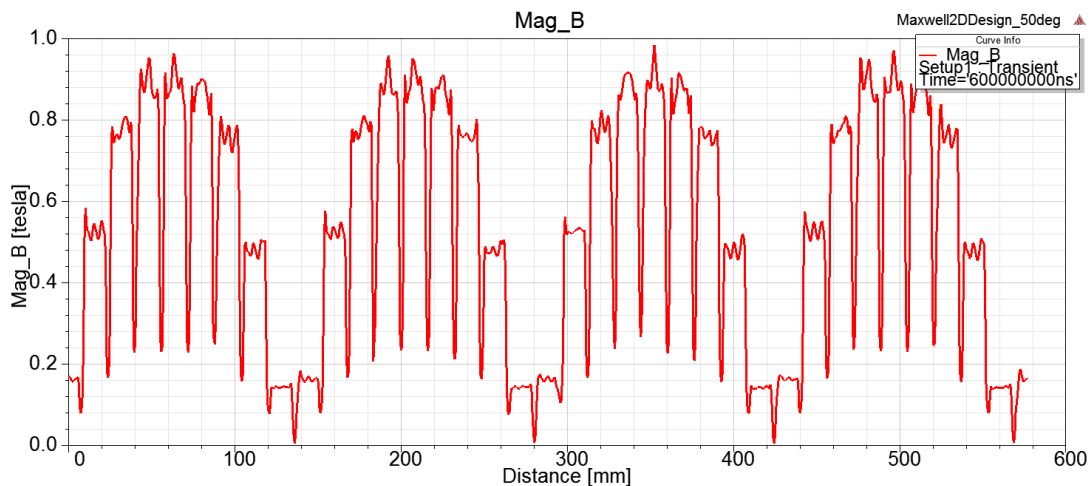
Ustálení proudů trvá zhruba 100 ms, po této době se průběh dále harmonizuje a má sinusový průběh, i když průběh není hladký a v oblasti amplitudy je deformovaný. Amplituda proudů je stálá a dosahuje maximálně 11 A. V tomto případě je odebíraný proud nejmenší. Protože je zátěžný úhel roven nule, stator nemusí vyvinout téměř žádný moment, aby byl rotor unášen jeho točivým polem synchronní rychlostí (Obr. 70).



Obr. 70 - Průběh momentu pro zátěžný úhel 0°

Moment kopíruje průběh proudů, zpočátku je patrný stejný přechodný děj. Následně se hodnota momentu ustálí a kmitá s malým přesahem kolem nuly. Jak je vidět v pravém horním rohu grafu (Obr. 70), kde je uvedena střední, maximální a minimální hodnota na rozsahu 300 – 600 ms, kdy je moment ustálen. Na tomto zkráceném rozsahu kmitá moment o ± 1 Nm. Střední hodnota momentu je taktéž 1 Nm a je to moment, který je potřeba generovat, aby byl rotor udržen v synchronismu.

Dále je možné zobrazit průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře (Obr. 71). Vzhledem k nulovému zátěžnému úhlu její hodnota nedosahuje ani 1 T. Reálné křivky toku magnetické indukce jsou velmi zkreslené, což je způsobeno změnami permeance (magnetické vodivosti) na obou stranách vzduchové mezery, což je zcela ve shodě s [10], kde se průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře shoduje s teoretickým předpokladem dle výše zmíněné literatury. (Permeance je v elektromagnetismu převrácenou hodnotou reluktance).



Obr. 71 - Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro zátěžný úhel 0°

Důležitá je hodnota zátěžného úhlu, pro který bude stroj generovat jmenovitý moment. Moment stroje se vypočte dle vztahu:

$$P = M \cdot \omega \quad (24)$$

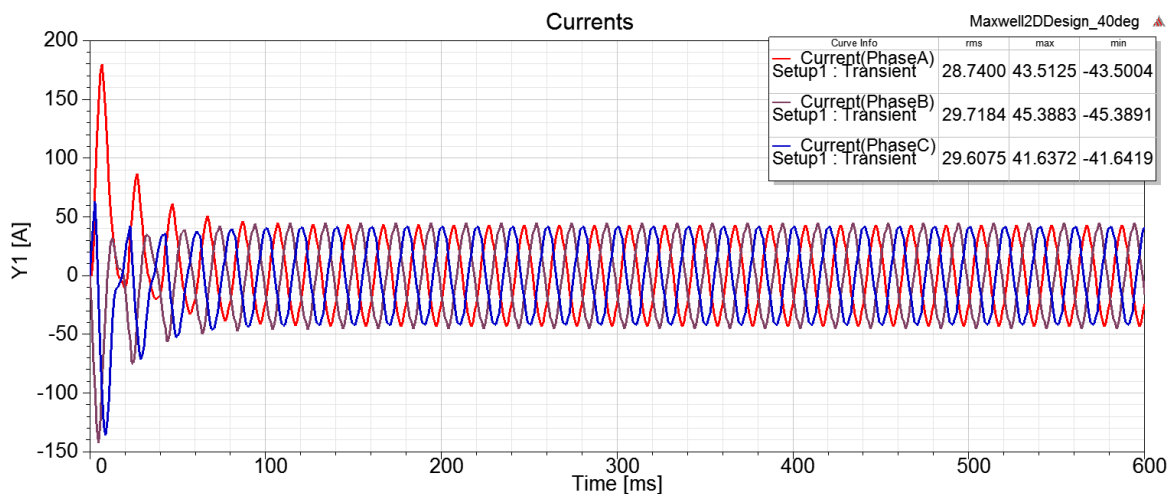
kde P je jmenovitý výkon motoru (15 kW)
 M je jmenovitý moment
 ω je úhlová rychlost

Pokud vztah upravíme pro výpočet momentu a dosadíme proměnné, vyjde jmenovitý moment.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{15000}{157} = 95,54 \text{ Nm} \quad (25)$$

Jmenovitý moment je tedy 95,54 Nm. Navržený motor tento moment generuje při zátěžném úhlu zhruba 10 deg. Je tedy potřeba rotor natočit tak, aby byla podélná osa rotoru q oproti ose vinutí fáze A opožděna o hodnotu právě 10 deg. Průběhy pro tento zátěžný moment jsou následující.

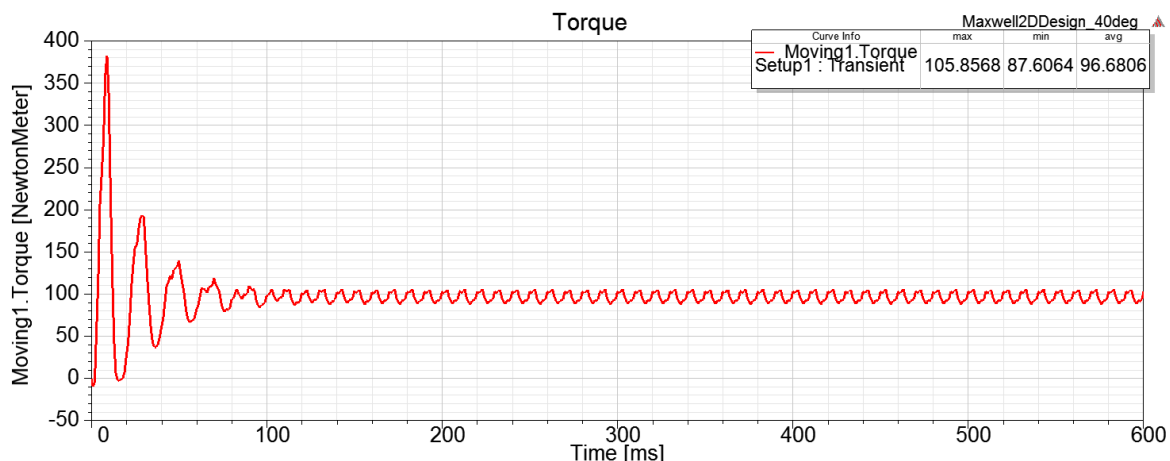
Opět ukážu průběhy proudů a momentu pro nově nastavený zátěžný úhel. Dá se očekávat, že proud statorovým vinutím se zvýší (Obr. 72).



Obr. 72 - Průběh proudu pro zátěžný úhel 10 deg

Na počátku je opět přechodný děj, který je ustálen po 100 ms. Amplitudy proudů nyní v ustáleném stavu na zkráceném časovém intervalu 300 – 600 ms dosahují efektivní hodnoty cca 29 A. Průběh amplitud již není deformován jako při zátěžném úhlu 0 deg a proudy jsou více sinusové.

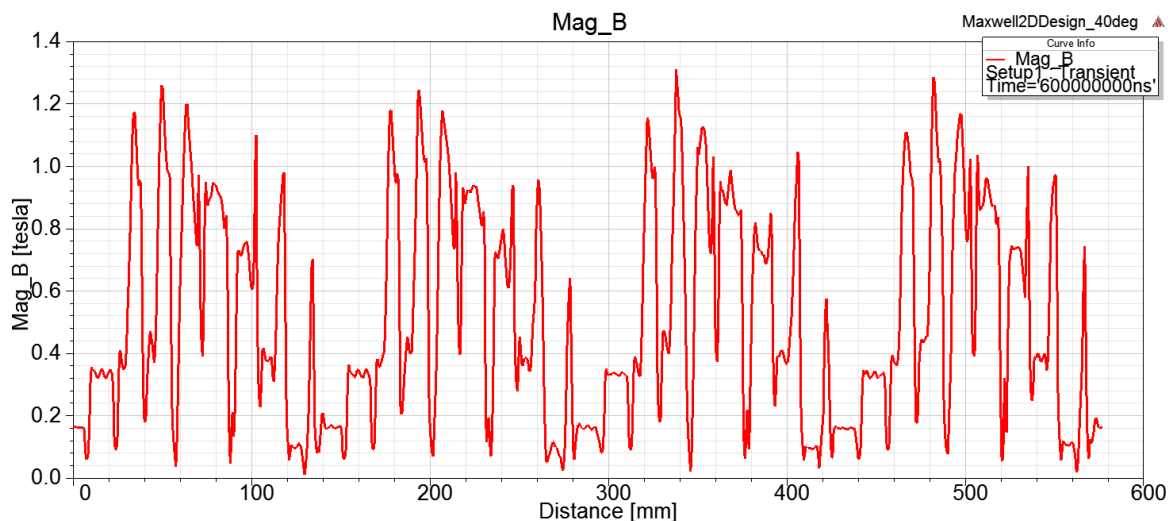
Momentu (Obr. 73) opět chvíli trvá, než se ustálí. Za ustálený průběh se dá opět považovat 100 ms a dále.



Obr. 73 - Průběh momentu pro zátěžný úhel $\delta=10$ deg

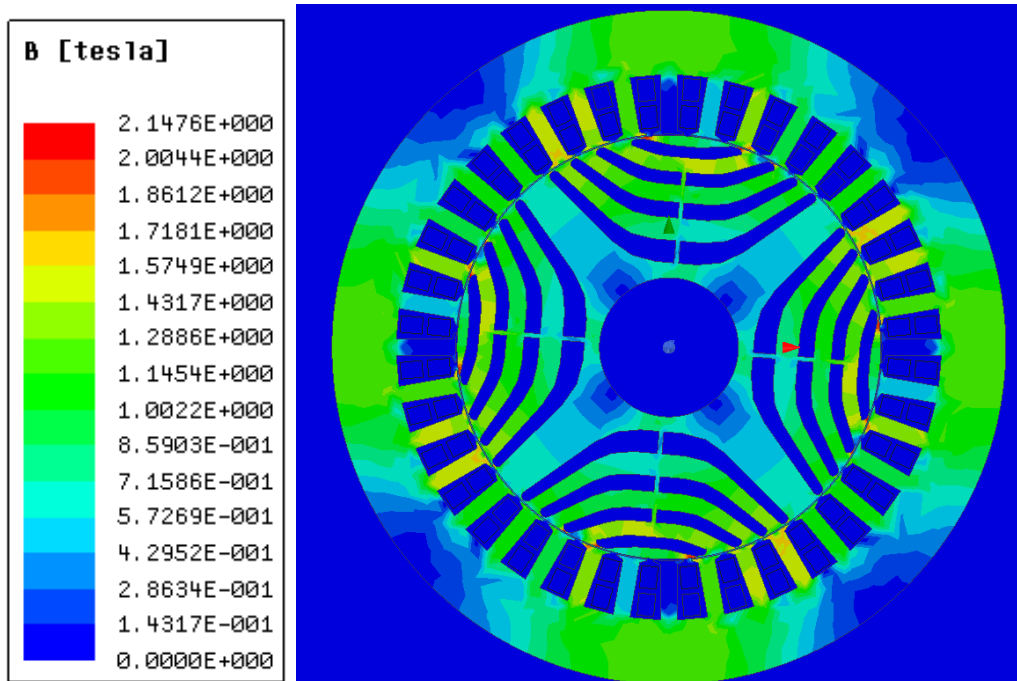
Hodnoty z pravého horního rohu jsou opět uvedeny pro zkrácený časový interval. Střední hodnota momentu je pro zátěžný úhel $\delta=10$ deg cca o 1 % vyšší než jmenovitá. Pulzace momentu dosahuje ± 10 Nm, to odpovídá pulzaci 10 %, což znamená, že se pulzace momentu oproti nulovému zátěžnému úhlu snížila.

Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře se více zdeformoval a špičková hodnota se zvýšila na úroveň přes 1,2 T.



Obr. 74 - Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro zátěžný úhel 10 deg

Když vím, při jaké hodnotě zátěžného úhlu je motor v chodu při jmenovitých hodnotách, je vhodné se podívat na pole magnetické indukce, jak je obvod motoru nasycen nyní (Obr. 75).

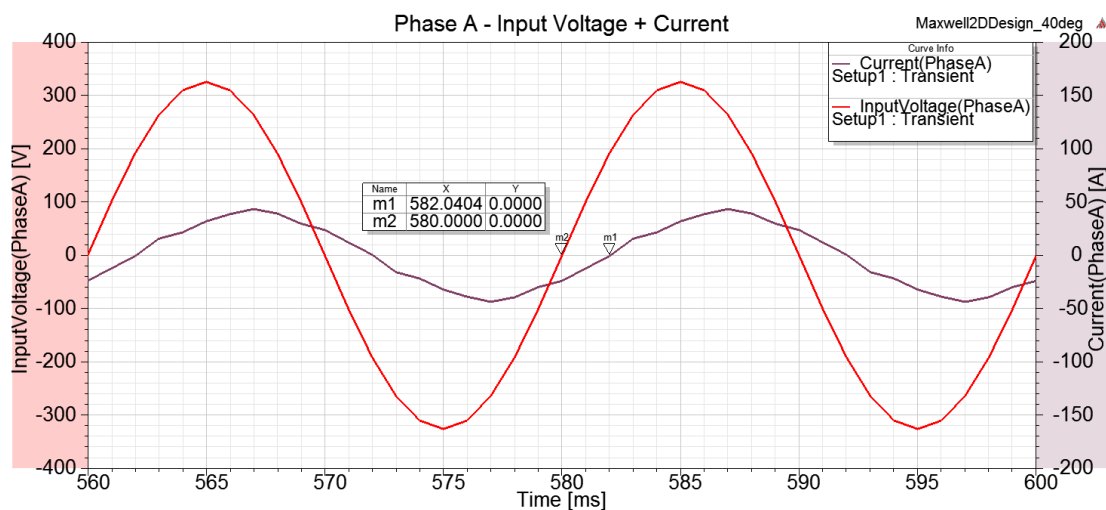


Obr. 75 - Mapa pole magnetické indukce pro jmenovité zatížení (zátěžný úhel 10 deg)

Natočení rotoru vůči statorovým zubům je takové, že žádný zub nevychází přímo proti magnetické bariéře, žádný zub tedy není přesycen, jak tomu bylo, když byl rotor v podélné poloze (Obr.62). Stejně tak nedochází k přesycování oblasti posledního žebra. Jediná místa, která dosahují maximální magnetické indukce jsou nejtenčí místa u poslední bariéry. Dle průběhu BH křivky můžu říct, že stroj je za jmenovitých podmínek ideálně nasycen.

5.2.2 Určení účinníku

Účinník se určí jednoduše z průběhu napájecího napětí a proudu fáze A (Obr. 76).



Obr. 76 - Průběh napájecího napětí a proudu fáze A

Zobrazen je průběh dvou period v ustáleném stavu. Na bodech průchodu příslušných veličin nulou jsou umístěny „Markery“ m1 pro napětí a m2 pro proud. Časový posun mezi průchody nulou je 2 ms. Při napájecí frekvenci 50 Hz trvá jedna perioda napájecího napětí 20 ms, na jednu milisekundu tedy připadá 18 stupňů elektrických. Fázový posun se rovná $\varphi=36$ deg a výsledný účinník má tedy hodnotu $\cos \varphi=0,8$.

Při známé hodnotě účinníku lze spočítat příkon stroje a následně jeho účinnost. Nejprve je ale nutné spočítat zdánlivý výkon, který se vypočte dle:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 29 = 20091,8 \text{ VA}$$

Příkon stroje je dán vztahem:

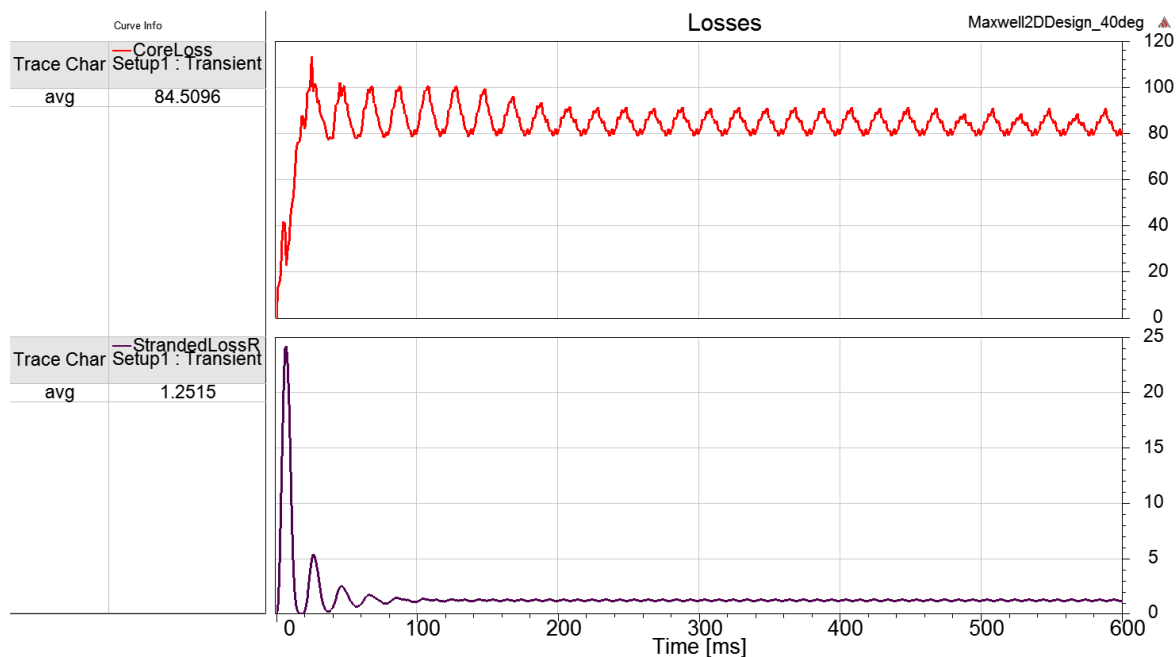
$$P_p = S \cdot \cos \varphi = 20784 \cdot 0,8 = 16073,4 \text{ W}$$

Účinnost motoru je dána poměrem výstupního výkonu a příkonu, tedy:

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{15000}{16073,4} = 0,93 \rightarrow 93\%$$

5.2.3 Ztráty

Nyní se podívám na ztráty, které v motoru vznikají. Zajímají mě ztráty v železe, které jsou v Maxwell nazývány jako „CoreLoss“ a ztráty ve vinutí statoru „StrandedLossR“. U ztrát ve vinutí by mohl být uživatel lehce zmaten, protože program Maxwell umožňuje zobrazit ještě jedny ztráty a sice „StrandedLoss“. Ztráty „StrandedLoss“ se počítají, pokud je buzení realizováno pomocí externího obvodu. Pokud je buzení napěťové nebo proudové zadané v „Excitation“, je potřeba zobrazit ztráty s „R“. Ztráty jsou zobrazeny pro zátěžný úhel 10 deg (Obr. 77), tedy pro téměř jmenovité zatížení.



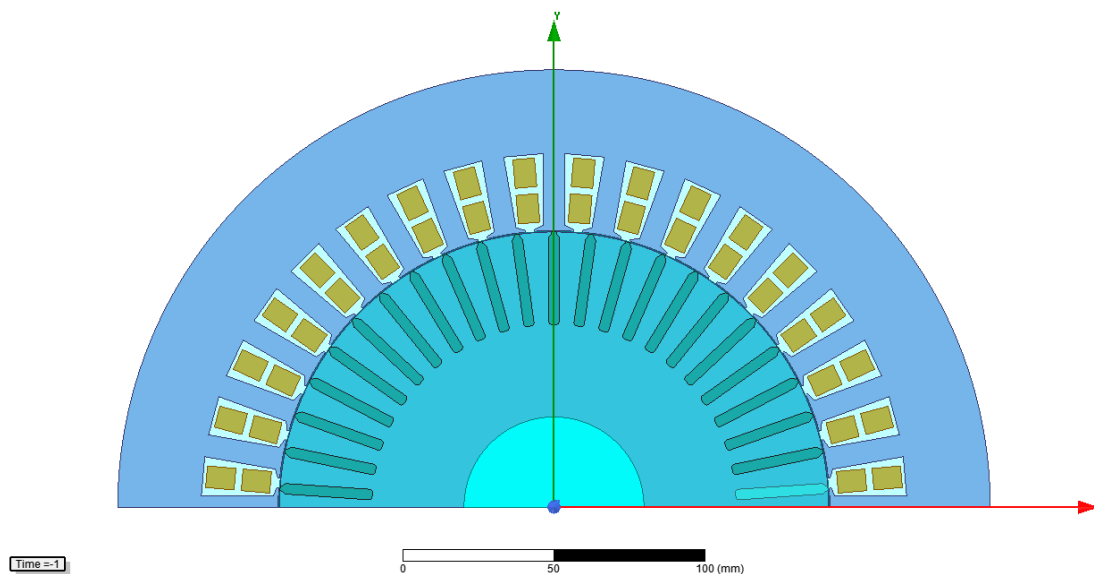
Obr. 77 – Ztráty RSM motoru pro jmenovité zatížení

Zde pozor na měřítko grafů. Graf výše má měřítko na ose Y ve watttech a spodní v kW. Střední hodnota ztrát v železe na zkráceném časovém intervalu je 84,5 W. Zato ztráty ve vinutí jsou pro jmenovité zatížení 1,25 kW. Tato hodnota ztrát ve vinutí bude pravděpodobně způsobena tím, že veškerý moment a sycení stroje musí dodat právě statorové vinutí, což naplňuje předpoklad z kapitoly 2.

Aby měla data o ztrátách význam, porovnal jsem je se ztrátami asynchronního motoru, který byl na začátku návrhu RSM. Toto srovnání poskytne nejlepší pohled na reálné výsledky RSM motoru a jeho porovnání s ASM.

5.2.3.1 Návrh asynchronního motoru

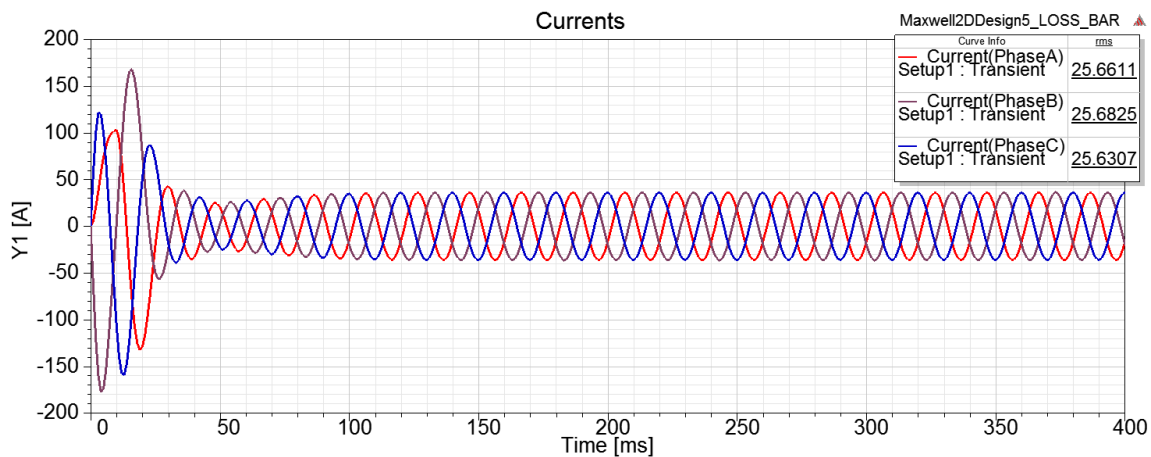
Pro účely porovnání ztrát ASM a RSM motorů jsem vytvořil model asynchronního motoru o stejných parametrech dle [20] v RMxpert. Asynchronní motor má na rotoru klecové vinutí z hliníku. Materiál statoru a rotoru je totožný jako u RSM, rovněž i vinutí je vytvořeno totožně. Model byl z RMxpert vyexportován v 2D řezu (Obr. 78). Vzhledem k tomu, že veškeré hodnoty buzení byly převzaty právě z tohoto návrhu, je vše nastavené totožně, jako u transientních simulací RSM.



Obr. 78 - 2D řez asynchronním motorem

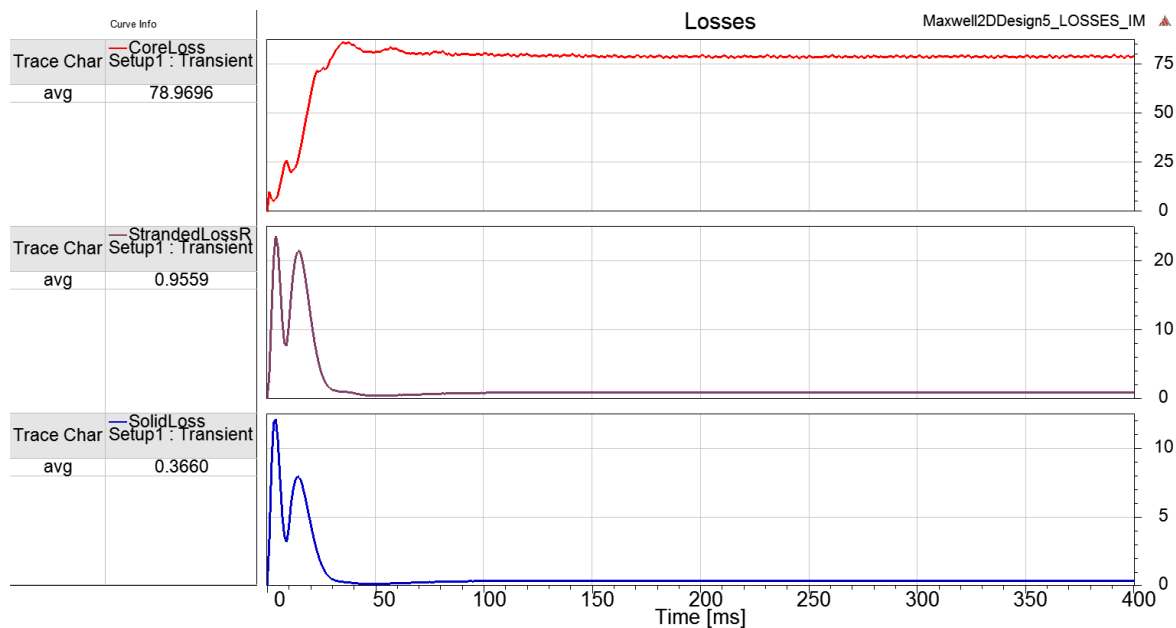
5.2.3.1.1 Průběh ztrát asynchronního motoru

Průběh proudů (Obr. 79) je u asynchronního motoru také doprovázen přechodným dějem, ustalujícím se se stejnou časovou konstantou τ . Proudů mají po ustálení na rozdíl od RSM zcela hladký sinusový průběh. Efektivní hodnota jmenovitého proudu je cca 25,5 A, kdy stroj generuje moment o hodnotě 100 Nm.



Obr. 79 - Průběh proudů asynchronního motoru

Ztráty v železe jsou oproti RSM motoru o trochu nižší, jejich střední hodnota na ustáleném zkráceném časovém intervalu 200 – 400 ms je 79 W. Průběh ztrát v železe je vidět na prvním grafu na obrázku (Obr. 80).



Obr. 80 – Ztráty asynchronního motoru

Ztráty mají podobný průběh jako u RSM, pouze méně pulzují, což je dáno hladkým průběhem proudů, resp. momentu.

Další ztráty jsou ztráty ve vinutí statoru (druhý průběh Obr. 80). Ztráty ve vinutí statoru mají střední hodnotu 0,96 kW. Tato hodnota je nižší než u RSM, protože statorové vinutí nemusí dodat veškerý výkon, který je nutný ke generování jmenovitého momentu, protože se na něm podílí i vinutí na rotoru.

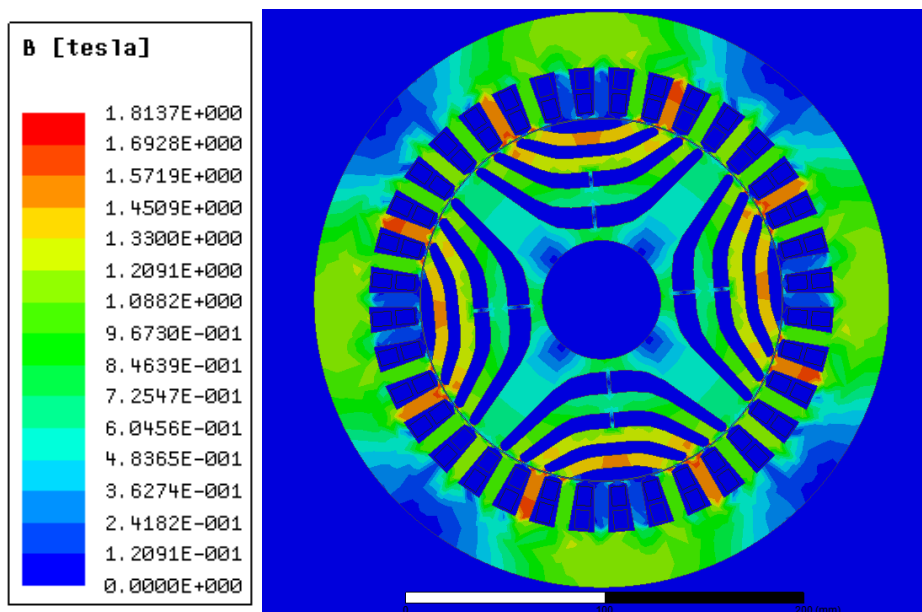
U asynchronního motoru je potřeba vyšetřit ještě jeden typ ztrát. Jedná se o ztráty v rotorovém vinutí, v Maxwell nazvané „SolidLoss“. „Solid“ znamená plný materiál, neboť tyče rotorové klece jsou

vyrobeny z plného hliníku. Ztráty, které zde vznikají v důsledku indukování proudů, jsou vyobrazeny na spodním průběhu (Obr. 80). Tyto ztráty dosahují v ustáleném stavu střední hodnoty 366 W.

Po součtu všech tří typů ztrát u asynchronního motoru jsou celkové ztráty 1,4 kW. U RSM motoru jsou „SolidLoss“ zcela nulové, proto se sečtou pouze ztráty v železe a v rotorovém vinutí, které dohromady dají 1,33 kW. Vezmu-li v potaz mírné přetížení RSM motoru, dosahuje RSM motor nižších ztrát o zhruba 100 W.

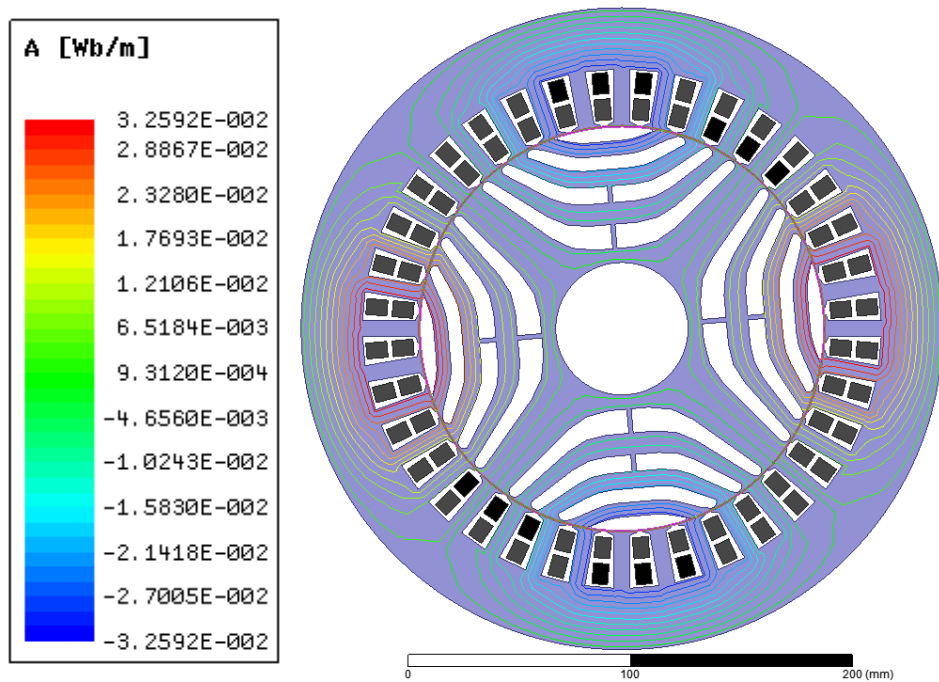
5.3 Rotor s „Cut-Off“ strukturou

Vzhledem k výsledkům magnetostatické simulace (Obr. 62), kde dochází k přesycování posledního žebra motoru, jsem provedl simulaci s totožnými parametry pro rotor, kde je poslední bariéra neuzavřena tzv. „Cut-Off“ struktura. Uzavírání magnetického toku by se v takovém případě mělo změnit a neuzavírat se v takové hustotě v malém objemu materiálu posledního žebra a celkové přesycení by se mělo snížit.



Obr. 81 - Pole magnetické indukce rotoru s „Cut-Off“ strukturou pro podélnou polohu

Z obrázku pole magnetické indukce (Obr. 81) je vidět, že se její maximální hodnota snížila na 1,8 T. Použití neuzavřené poslední bariéry způsobuje magnetické nevyužití dvou statorových zubů na každém pólu stroje. Jak je vidět na znázornění siločar statorového pole (Obr. 82), které se přes tyto zuby vůbec neuzavírá. To způsobuje vyšší přesycení zubů, které jsou přímo proti magnetické bariéře, protože se tok musí uzavřít přes méně zubů a méně žebel.

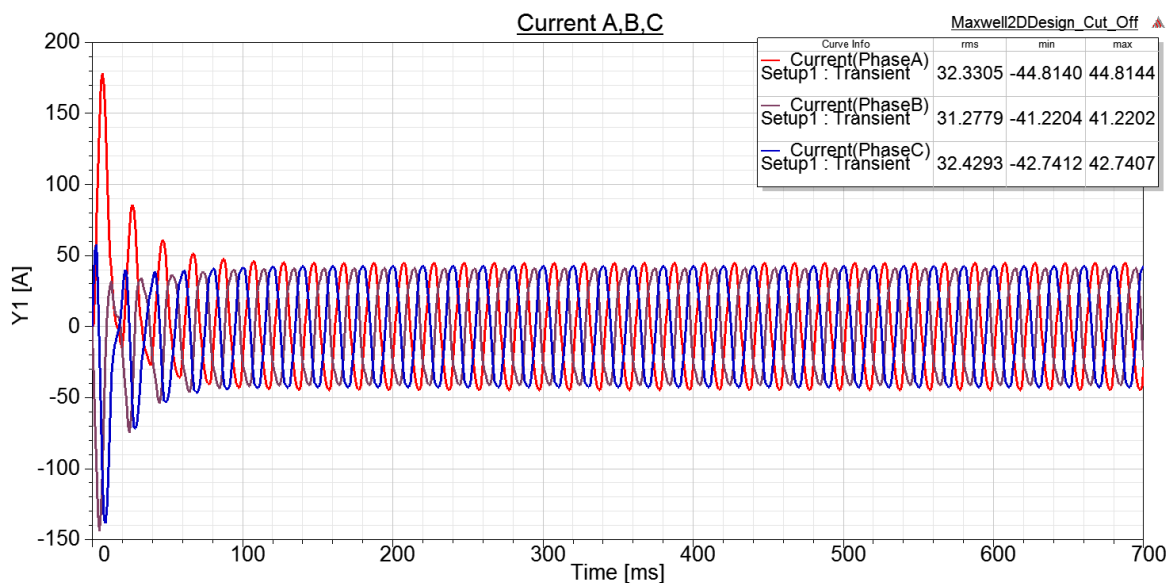


Obr. 82 - Silokřivky magnetického toku statoru v podélné ose s „Cut-Off“ rotorem

Obrázky pro rotor v příčné poloze jsou v příloze (příloha 8.5).

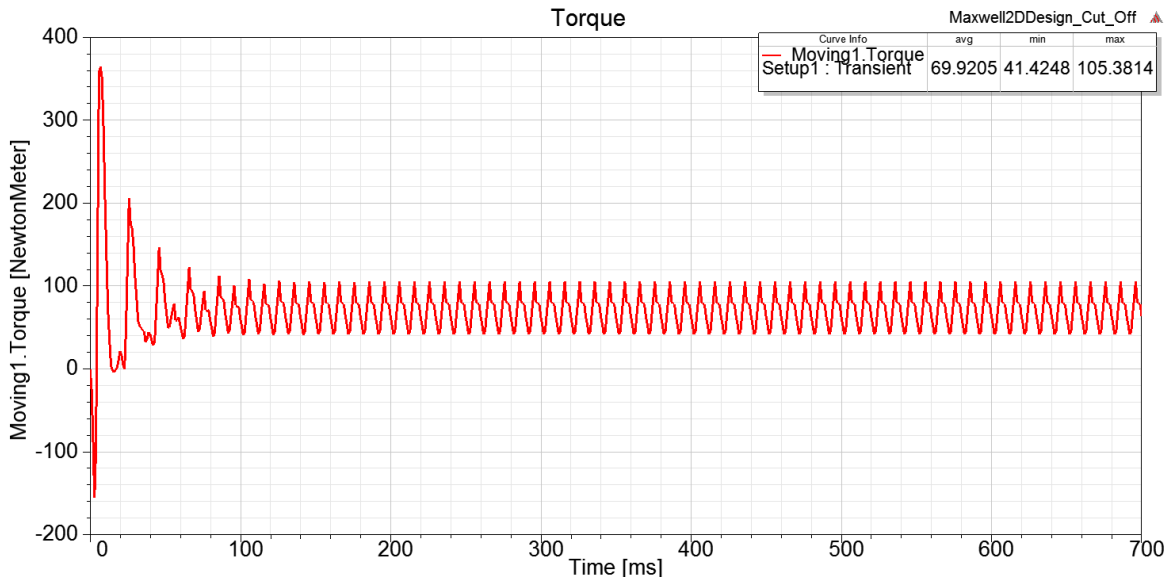
5.3.1 Průběhy proudů a momentu

Průběh proudů opět začíná přechodným dějem (Obr. 83), který se ustaluje se stejnou časovou konstantou. Průběhy proudů mají více vyhlazený sinusový průběh. Rotor je v poloze, kdy je zátěžný úhel 10 deg, kdy motor s uzavřenou poslední bariérou odebíral jmenovitý proud a generoval jmenovitý moment.



Obr. 83 – Průběh proudů motoru s „Cut-Off“ strukturou pro zátěžný úhel 10 deg

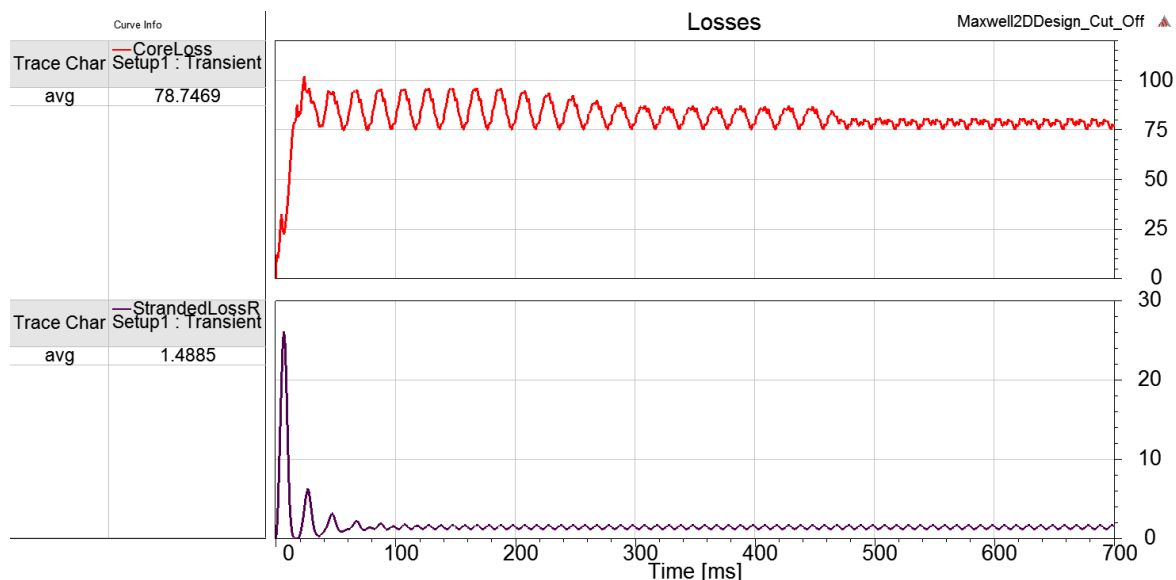
Z legendy v pravém horním rohu, kde jsou uvedeny hodnoty pro ustálený průběh na intervalu 300 – 700 ms, je vidět, že efektivní hodnota proudu je cca 32 A. Takže motor s „Cut-Off“ strukturou odeberá o 10% vyšší proud.



Obr. 84 – Průběh momentu motoru s „Cut-Off“ strukturou pro zátěžný úhel 10 deg

I když odeberá vyšší proud, generovaný moment je zhruba o třetinu nižší než jmenovitý. Protože rotor není hladký, zvýšila se pulzace momentu, který nyní pulzuje o ± 30 Nm, což je zhruba 40 %.

Vyšší odebíraný proud se musel podepsat i na ztrátách, kdy došlo ke zvýšení především ztrát ve satorovém vinutí, které dosahují téměř 1,5 kW (spodní průběh Obr. 85).

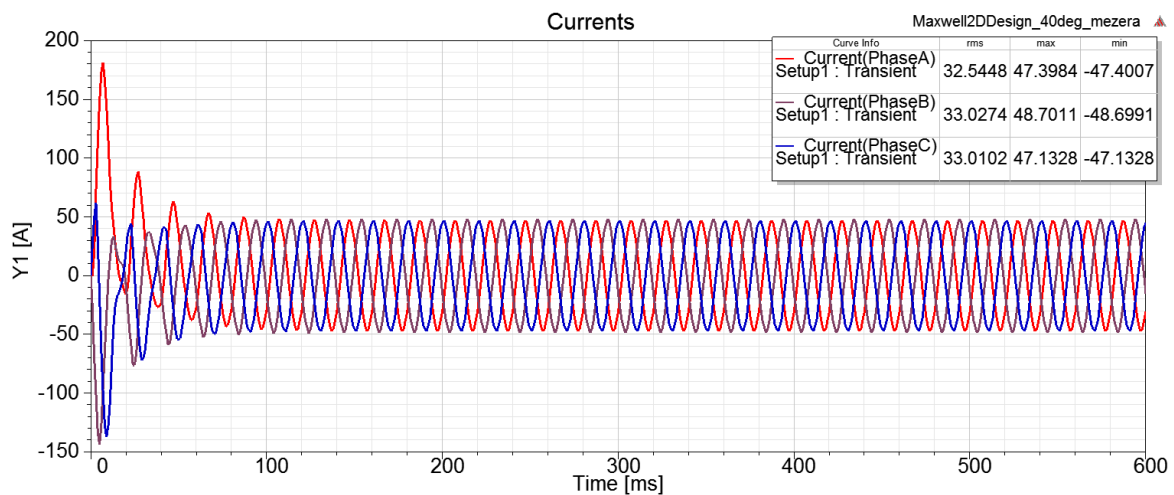


Obr. 85 - Ztráty RSM motoru s „Cut-Off“ rotorem pro zátěžný úhel 10 deg

Ztráty v železe se ustalují delší dobu a jsou ustálené až od zhruba 500 ms (horní průběh Obr. 85). Při ustáleném průběhu na intervalu 500 – 700 ms dosahují střední hodnoty 79 W. Tyto ztráty díky „Cut-Off“ struktuře klesly, ale pouze o 6 W, což je v celkovém součtu ztrát zanedbatelné.

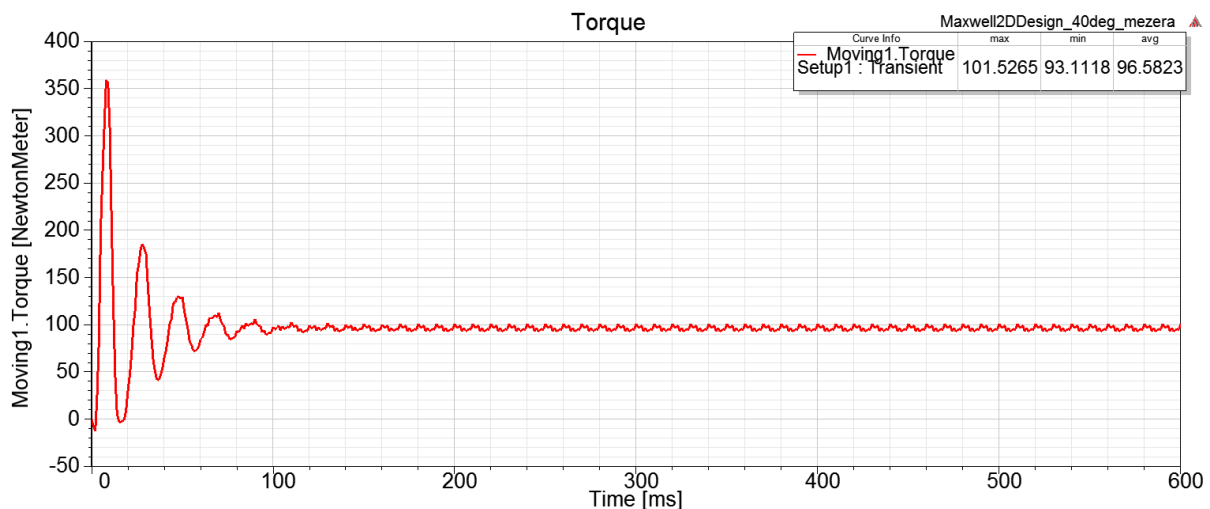
5.4 Snížení pulzace momentu zvětšením vzduchové mezery

Zvětšením vzduchové mezery se dá dosáhnout zmenšení pulzace momentu (viz kapitola 2.3.3, [11]). Pro ověření tohoto tvrzení jsem zkopíroval projekt z kapitoly 5.2.1, kdy byl RSM motor simulován pro téměř jmenovité podmínky. Daný motor měl dle kapitoly návrhu 3.1.2 nastavenou vzduchovou mezeru jako původní asynchronní motor 0,5 mm. Změnil jsem tedy vnější průměr rotoru na 182 mm, čímž vznikla dvojnásobná vzduchová mezera 1 mm. Tento model jsem podrobil simulaci při totožných podmínkách jako v kapitole 5.2.1 pro výsledky simulace (Obr. 72 a Obr. 73).



Obr. 86 - Průběh proudů pro motor se zvětšenou vzduchovou mezerou

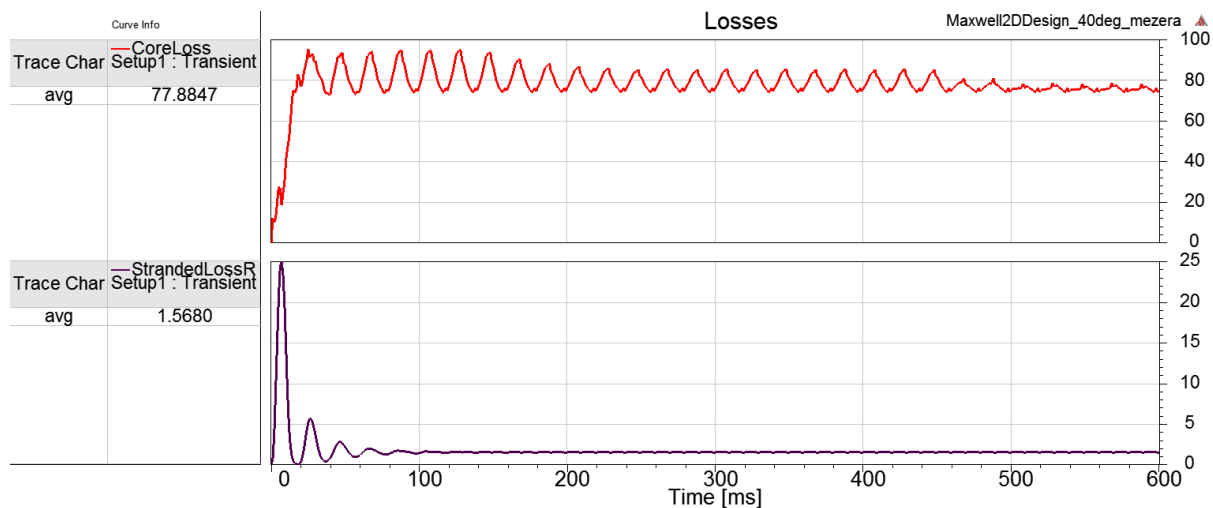
Pro takto nastavenou simulaci je výsledný průběh proudů (Obr. 86) doprovázen opět počátečním přechodným dějem, který byl popsán výše. Zdvojnásobení vzduchové mezery na 1 mm způsobilo zvýšení odebíraného proudu pro jmenovité zatížení. Proud se z 29 A zvýšil na zhruba 33 A. Průběh proudů ale není tak zdeformovaný, jako na (Obr. 72) a je zcela sinusový. Hodnoty v pravém horním rohu (Obr. 86) jsou opět uvedeny na zkráceném, ustáleném intervalu 300 – 600 ms.



Obr. 87 - Průběh momentu pro motor se zvětšenou vzduchovou mezerou

Podle obrázku (Obr. 87) zvětšení vzduchové mezery opravdu přineslo snížení pulzace momentu, a to na polovinu oproti motoru s poloviční vzduchovou mezerou (Obr. 73), kdy moment nyní pulzuje o 5 %.

Velmi negativní vliv mělo zvětšení vzduchové mezery na ztráty. Ztráty ve statorovém vinutí „StrandedLossR“ stouply o více než 300 W (spodní průběh Obr. 88), což v porovnání s celkovými ztrátami není zcela nezanedbatelná hodnota.



Obr. 88 - Průběh ztrát pro motor se zvětšenou vzduchovou mezerou

6 Závěr

V této diplomové práci je popsán návrh reluktančního synchronního motoru 15 kW. Úkolem práce bylo na návrh stroje aplikovat vývojové prostředí od společnosti Ansys, a sice program Electronics 17.0. V průběhu tvorby diplomové práce vyšla nová verze Electronics 18.0. Z důvodu širších možností variant návrhu RSM motorů bylo po konzultaci s vedoucím práce rozhodnuto na verzi 18.0 přejít. V první kapitole práce jsem popsal vývojové prostředí, způsoby návrhu elektrických točivých strojů, nastavení parametrů simulace a zobrazování výsledků právě pro verzi 18.0.

Dále jsem popsal princip a základní konstrukční uspořádání nejběžnějších RSM motorů. Zmínil jsem problémy spojené s návrhem a uvedl příklady optimalizace geometrie rotorové části, na které nejvíce závisí výsledné vlastnosti a funkčnost motoru.

Dle nastudovaných principů konstrukce jsem provedl návrh motoru. Model jsem vytvořil pomocí tzv. předdefinovaných uživatelských primitiv v programu Maxwell 3D. Dále jsem provedl návrh stroje pomocí modulu RMxpert, do kterého je implementace RSM strojů nově doplněna od verze 18.0. Původní očekávání bylo ovšem zklamáním. Přestože RMxpert návrh geometrie RSM umožňuje, analytický výpočet jeho parametrů nikoliv. Oproti ostatním typům strojů obsažených v modulu RMxpert program neprovede výpočty a ani nevytvoří napájecí obvod. Dá se však očekávat, že v budoucích verzích programu budou možnosti návrhu RSM rozšiřovány a návrh tohoto typu motoru bude zjednodušen na úroveň návrhu nejrozšířenějších typů strojů jako jsou stejnosměrné, asynchronní a běžné synchronní.

V návrhu jsem tedy pokračoval z nižší úrovně tzv. předdefinovaných uživatelských primitiv, jak jsem podrobně popsal v kapitole 3. Zvolil jsem postup, který je v literatuře uplatňován nejčastěji, kdy je použit asynchronní motor s kotvou nakrátko, u kterého se pouze zamění rotorová část. Provedl jsem tedy návrh dle [20], kde je návrh asynchronních strojů podrobně popsán, jako rotor jsem do stroje umístil radiálně vrstvený rotor s magnetickými bariérami dle [8].

Následně jsem se zabýval ověřením funkce stroje, které probíhalo z důvodu úspory výpočetního času v programu Maxwell 3D pouze na 2D řezu motoru. I takto provedené zjednodušení si vyžádalo výpočetní čas řádově několika hodin. Provést simulaci 3D modelu v rámci možností mého přenosného počítače (CPU – Intel Core i5-5200U 2,20 GHz – TurboBoost 2,7 GHz, 2 fyzická a 4 virtuální jádra; RAM 8 GB; HDD 500 GB) se ukázalo z důvodu nedostatku výpočetního výkonu a paměťového prostoru jako nemožné. Simulace provedené ve 2D však poskytují zcela dostatečná data. Navrženému a optimalizovanému modelu jsem dle kapitoly 4 nastavil parametry simulace nejprve pro magnetostatický (stacionární děje) řešič a následně jsem nastavení upravil pro transientní (přechodné děje) řešič.

Základní transientní simulace ustáleného chodu stroje pro otáčky 1500 ot./min jsou provedeny v kapitole 5.

Výsledky simulací v ustáleném stavu jsou dokumentovány grafy průběhů proudů, momentu, magnetické indukce ve vzduchové mezeře, mapami pole magnetické indukce a mapami silokřivek magnetického toku (Obr. 62 až Obr. 88).

Dále jsem zkoumal závislost indukčností na úhlu natočení. Poměr maximální a minimální indukčnosti je hlavním kvalitativním kritériem navrženého motoru. Pro tento výpočet jsem použil magnetostatický řešič s využitím modulu Optimetrics, kde jsem vytvořil parametrickou analýzu pro řízení natočení rotoru. Dosáhl jsem poměru podélné a příčné indukčnosti $L_d/L_q=4$.

V literatuře je obvykle RSM srovnáván s asynchronním motorem (ASM). Proto jsem provedl kompletní návrh ASM shodných parametrů. Zaměřil jsem se na výpočet ztrát, neboť právě snížení ztrát má být jednou z hlavních výhod RSM oproti asynchronním. Celkové ztráty RSM činily cca 1300 W oproti ztrátám 1400 W u asynchronního. Tohoto rozdílu ztrát bylo dosaženo díky absenci rotorového vinutí, které u asynchronních motorů způsobuje zhruba 30 % z celkových ztrát. Vyšší ztráty u RSM byly oproti ASM na satorovém vinutí. To přisuzuji tomu, že satorové vinutí RSM musí dodat veškerý výkon stroje. Desetiprocentní snížení ztrát u RSM přesně odpovídá informacím uváděných společností AAB u svých výrobků (Obr. 30).

Dále jsem provedl simulace pro variantu rotoru s neuzavřenou poslední bariérou, tzv. „Cut-Off“ strukturou (Obr. 25 a). Tato geometrie rotoru přinesla snížení přesycování stroje v kritických místech (Obr. 81). Tato konstrukce má však i nevýhody. Pro stejný zátěžný úhel, při kterém původní motor (Obr. 39) generoval jmenovitý moment a odebíral jmenovitý proud, motor s „Cut-Off“ rotorem odebíral proud vyšší, ale generovaná střední hodnota momentu se snížila o cca 30 %. Pulzace momentu se naopak zvýšila, dosahovala téměř 40 %. Vyšší odebíraný proud se podepsal na vyšších ztrátách ve satorovém vinutí. Tuto geometrii tudíž nepovažuji za optimální.

Proto jsem provedl ještě jednu simulaci, kde jsem se snažil ověřit tvrzení o snížení pulzace momentu, pokud se zvětší vzduchová mezera. Pro vzduchovou mezeru zvětšenou na 1 mm z původních 0,5 mm klesla pulzace momentu na polovinu, tj. z původních 10 % na 5 %. Větší vzduchová mezera však způsobovala odběr vyššího proudu, což opět znamenalo zvýšení ztrát. V tomto případě o cca 260 W z původních 1,3 kW na 1,55 kW. Na druhou stranu, větší vzduchová mezera způsobila hladší sinusový průběh proudů.

Závěrem chci konstatovat, že dle mého názoru jsou všechny provedené simulace ve shodě s předpokládanými charakteristikami danými fyzikálním principem funkce stroje. V technické praxi se obvykle pro ověření míry shody výsledků simulací provádí realizace funkčního vzoru navrženého stroje.

Měření na fyzickém stroji by umožnila posoudit význam např. nepřesnosti výpočtů průběhů magnetické indukce ve vzduchové mezeře (Obr. 74), případně vliv hustoty výpočetní sítě v kritických místech atp. To však nebylo v daném případě v mých možnostech.

7 Literatura

- [1] MATYSKA Pavel, ABB s. r. o.; „*Synchronní reluktanční motory v regulovaných pohonech*“ [online], [cit. 2017-05-26], dostupné z:
<https://www.abb-conversations.com/cs/files/2013/06/Synchronn%C3%AD-reluktan%C4%8Dn%C3%AD-motory.pdf>
- [2] Katalog ABB srpen. 2016, „*Low voltage IE4 Synchronous reluctance motor*“ [online], [cit. 2017-05-26], dostupné z:
https://library.e.abb.com/public/6d4f5034141d4e0eb9f30a1abc6445fc/IE4_SynRM_08-2016_LOW.pdf
- [3] Katalog ABB, „*Koncepce motoru SynRM²*“ [online], [cit. 2017-05-26], dostupné z:
<https://library.e.abb.com/public/ebed45c8669f4cc18f13191490e47654/12241%20-%20ABB%20-%20Leaflet%20A4%20SynRM.pdf>
- [4] Techsoft Engineering - webové stránky poskytovatele softwaru Ansys v České republice [online], [cit. 2017-05-26], dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys/>
- [5] SVS FEM – webové stránky poskytovatele softwaru Ansys v České republice [online], [cit. 2017-05-26], dostupné z: <https://www.svsfem.cz/produkty/elektronika>
- [6] VOŽENÍLEK Petr, NOVOTNÝ Vladimír, MINDL Pavel. „*Elektromechanické měniče*“. 2. vydání. České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04875-7
- [7] REZA M. „*Synchronous reluctance machine (SynRM) Design*“, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm 2007
- [8] HRABOVCOVÁ Valéria, LIČKO Miroslav. „*Reluktančný synchronný motor*“, EDIS - ŽU, Žilina 2001, ISBN 80-7100-891-5
- [9] KOSTKO J. K.. „*Polyphase Reaction Synchronous Motors*“, Journal Amer. Inst. Elect. Engrs, 1923, Vol 42, pp. 1162-1168
- [10] PYRHONEN Juha, JOKINEN Tapani, HRABOVCOVÁ Valéria. „*Design of rotating electrical machines*“, 2. vydání, ISBN 978-1-118-58157-5
- [11] HRABOVCOVÁ, Valéria, JONOUŠEK Ladislav, RAFAJDUS Pavol, LIČKO Miroslav. „*Moderné Elektrické Stroje*“. EDIS - ŽU, Žilina 2001, ISBN 80-7100-809- 5.
- [12] STATON D. A. et al. „*Maximising the Saliency Ratio of the Synchronous Reluctance motor*“, IEE PROCEEDINGS-B, July 1993, Vol. 140, No. 4., pp 249-259
- [13] KAMPER M. J. et al. „*Direct finite element design optimization of the cage less reluctance synchronous machine*“, Energy Conversion, Sept. 1996, Vol. 11, No. 3., pp 547–55
- [14] HAATAJA J.. „*A comparative performance study of fourpole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives*“, Doctoral thesis. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2003

-
- [15] MATSUO T. and Lipo T. A. „Rotor design optimization of synchronous reluctance machine“, Energy Conversion, June 1994, Vol. 9, No. 2., pp 359–365
- [16] BÁRTA Jan, ONDRUŠEK Čestmír, „Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine“, University of Technology, Brno, Science journal, March 2015, pp 555-559
- [17] VAGATI A. et al. „Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors“, Industry Applications, July 1998, Vol. 34, No. 4., pp 758–765.
- [18] LEHNER Bastian, GERLING Dieter. „Direct Parameter-Based Torque Ripple Minimization of Synchronous Reluctance Machines“, Universitaet der Bundeswehr Muenchen, Germany
- [19] Technical Note IEC 60034-30-1, „Standard on efficiency classes for low voltage AC motors“ [online], [cit. 2017-05-26], dostupné z:
https://library.e.abb.com/public/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1_lowres.pdf?filename=TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1_lowres.pdf
- [20] KOTAL Miroslav, VOŽENÍLEK Petr, NOVOTNÝ Petr. „Příklady výpočtu elektrických strojů točivých“, 4. vydání. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, Praha 1988
- [21] ANSYS INC. User's guide – Maxwell online help. Canonsburg, USA: Ansys, 2016
- [22] ANSYS Advantage vol. III, Issue 2, 2009 [online], [cit 2017-05-26], dostupné z:
<http://www.ansys.com/-/media/Ansys/corporate/resourcelibrary/article/AA-V3-I2-Up-and-Away.pdf>

8 Přílohy

8.1 Třídy účinnosti dle výkonu a počtu pólů stroje [19]

Output kW	IE1				IE2				IE3				IE4			
	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole
0.12	45.0	50.0	38.3	31.0	53.6	59.1	50.6	39.8	60.8	64.8	57.7	50.7	66.5	69.8	64.9	62.3
0.18	52.8	57.0	45.5	38.0	60.4	64.7	56.6	45.9	65.9	69.9	63.9	58.7	70.8	74.7	70.1	67.2
0.20	54.6	58.5	47.6	39.7	61.9	65.9	58.2	47.4	67.2	71.1	65.4	60.6	71.9	75.8	71.4	68.4
0.25	58.2	61.5	52.1	43.4	64.8	68.5	61.6	50.6	69.7	73.5	68.6	64.1	74.3	77.9	74.1	70.8
0.37	63.9	66.0	59.7	49.7	69.5	72.7	67.6	56.1	73.8	77.3	73.5	69.3	78.1	81.1	78.0	74.3
0.40	64.9	66.8	61.1	50.9	70.4	73.5	68.8	57.2	74.6	78.0	74.4	70.1	78.9	81.7	78.7	74.9
0.55	69.0	70.0	65.8	56.1	74.1	77.1	73.1	61.7	77.8	80.8	77.2	73.0	81.5	83.9	80.9	77.0
0.75	72.1	72.1	70.0	61.2	77.4	79.6	75.9	66.2	80.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	75.0	75.0	72.9	66.5	79.6	81.4	78.1	70.8	82.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	77.2	77.2	75.2	70.2	81.3	82.8	79.8	74.1	84.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	79.7	79.7	77.7	74.2	83.2	84.3	81.8	77.6	85.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	81.5	81.5	79.7	77.0	84.6	85.5	83.3	80.0	87.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	83.1	83.1	81.4	79.2	85.8	86.6	84.6	81.9	88.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	84.7	84.7	83.1	81.4	87.0	87.7	86.0	83.8	89.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	85.0	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	88.7	88.7	87.7	86.2	90.3	90.6	89.7	88.0	91.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	86.9	90.9	91.2	90.4	88.6	92.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	89.9	89.9	89.2	87.4	91.3	91.6	90.9	89.1	92.7	93.0	92.2	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	90.7	90.7	90.2	88.3	92.0	92.3	91.7	89.8	93.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	91.2	91.2	90.8	88.8	92.5	92.7	92.2	90.3	93.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	91.7	91.7	91.4	89.2	92.9	93.1	92.7	90.7	94.0	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	92.1	92.1	91.9	89.7	93.2	93.5	93.1	91.0	94.3	94.6	94.1	92.5	95.3	95.7	95.1	93.7
75	92.7	92.7	92.6	90.3	93.8	94.0	93.7	91.6	94.7	95.0	94.6	93.1	95.6	96.0	95.4	94.2
90	93.0	93.0	92.9	90.7	94.1	94.2	94.0	91.9	95.0	95.2	94.9	93.4	95.8	96.1	95.6	94.4
110	93.3	93.3	93.3	91.1	94.3	94.5	94.3	92.3	95.2	95.4	95.1	93.7	96.0	96.3	95.8	94.7
132	93.5	93.5	93.5	91.5	94.6	94.7	94.6	92.6	95.4	95.6	95.4	94.0	96.2	96.4	96.0	94.9
160	93.8	93.8	93.8	91.9	94.8	94.9	94.8	93.0	95.6	95.8	95.6	94.3	96.3	96.6	96.2	95.1
200	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
250	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
315	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
355	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
400	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
450	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
500-	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
1000	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4

8.2 Nastavení „Machine“ a vinutí v RMxprt

Nastavení „Machine“

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Outer Diameter	291	mm	291mm	Outer diameter of the iron core	<input type="checkbox"/>
Inner Diameter	184	mm	184mm	Inner diameter of iron core	<input type="checkbox"/>
Length	123	mm	123mm	Length of the iron core	<input type="checkbox"/>
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the iron core	<input type="checkbox"/>
Steel Type	DW310_35			Steel type of the iron core	<input type="checkbox"/>
Press Board Thickne...	0	mm		One side thickness of the press boards at w...	<input type="checkbox"/>
Magnetic Press Board	<input type="checkbox"/>			Pole press board is made of magnetic materi...	<input type="checkbox"/>
Skew Width	0	deg	0deg	Skew width measured in degrees	<input type="checkbox"/>
Lamination Sectors	0			The number of lamination sectors to compos...	<input type="checkbox"/>

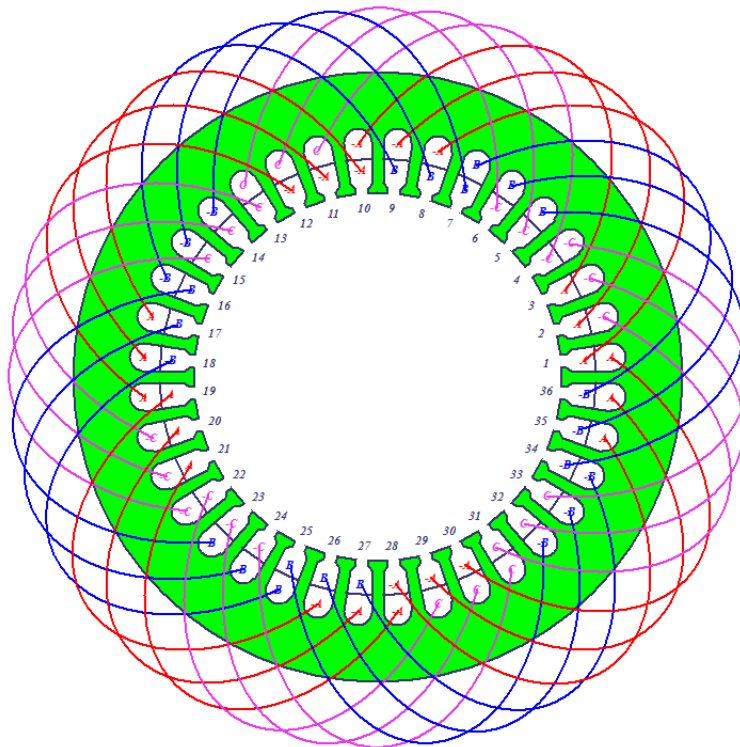
Show Hidden

Nastavení vinutí

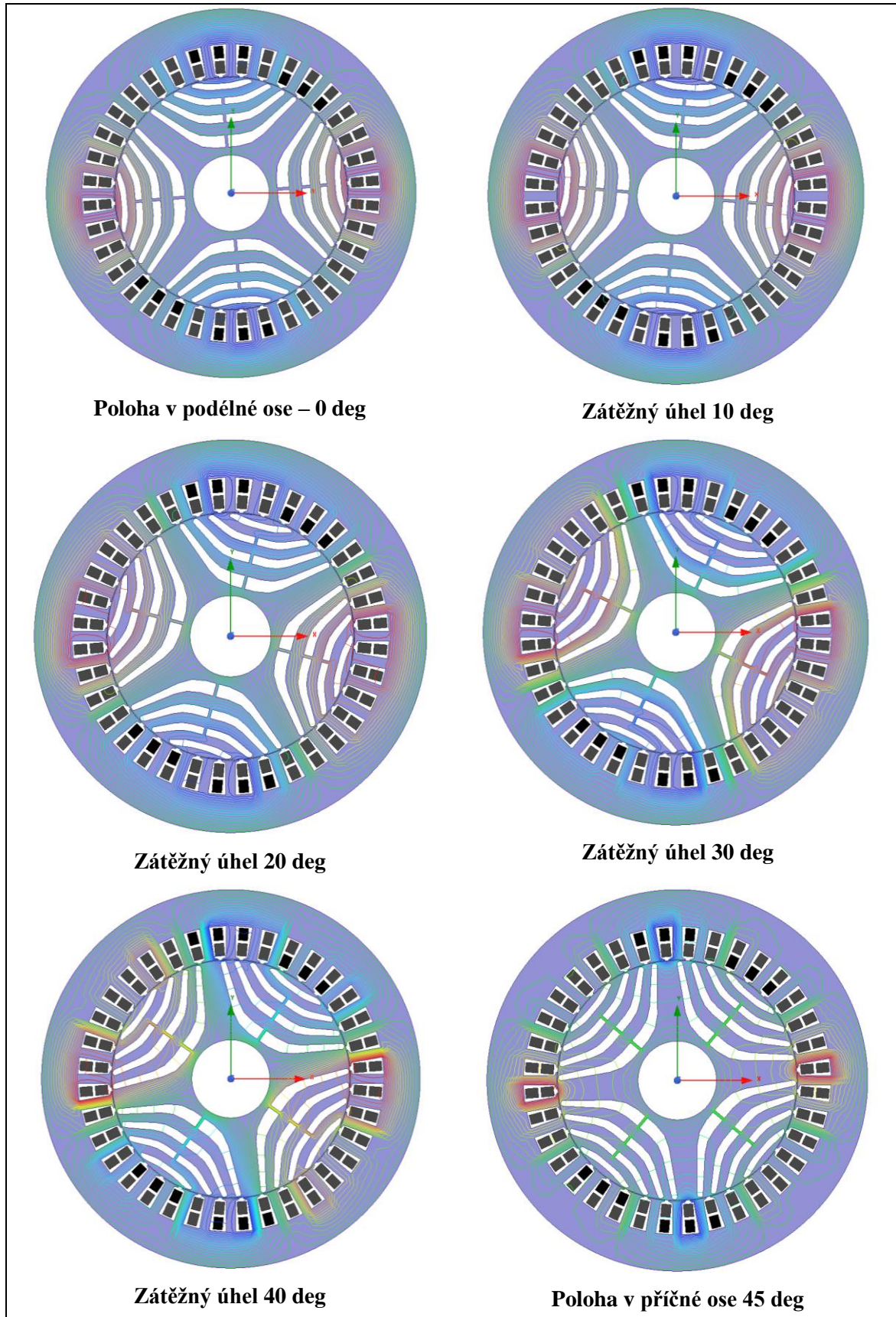
Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only
Winding Layers	2			Number of winding layers	<input type="checkbox"/>
Winding Type	Whole-Coiled			Stator winding type	<input type="checkbox"/>
Parallel Branches	1			Number of parallel branches of stator winding	<input type="checkbox"/>
Conductors per Slot	10		10	Number of conductors per slot, 0 for auto-design	<input type="checkbox"/>
Coil Pitch	7			Coil pitch measured in number of slots	<input type="checkbox"/>
Number of Strands	0		0	Number of strands (number of wires per conductor), 0 for auto-design	<input type="checkbox"/>
Wire Wrap	0.11	mm		Double-side wire wrap thickness, 0 for auto-pickup in the wire library	<input type="checkbox"/>
Wire Size	Diameter: 0mm			Wire size, 0 for auto-design	<input type="checkbox"/>
Conductor Type	copper			Steel type of the stator core	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

8.3 Propojení statorových cívek dle RMxprt

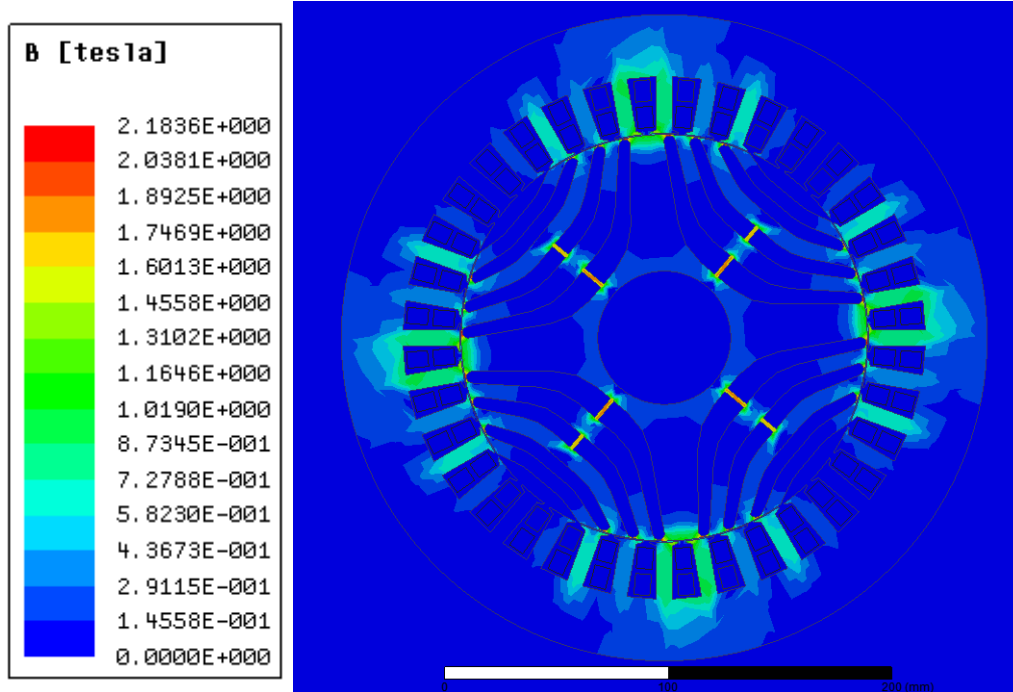


8.4 Zobrazení silokřivek magnetického toku pro různé polohy rotoru

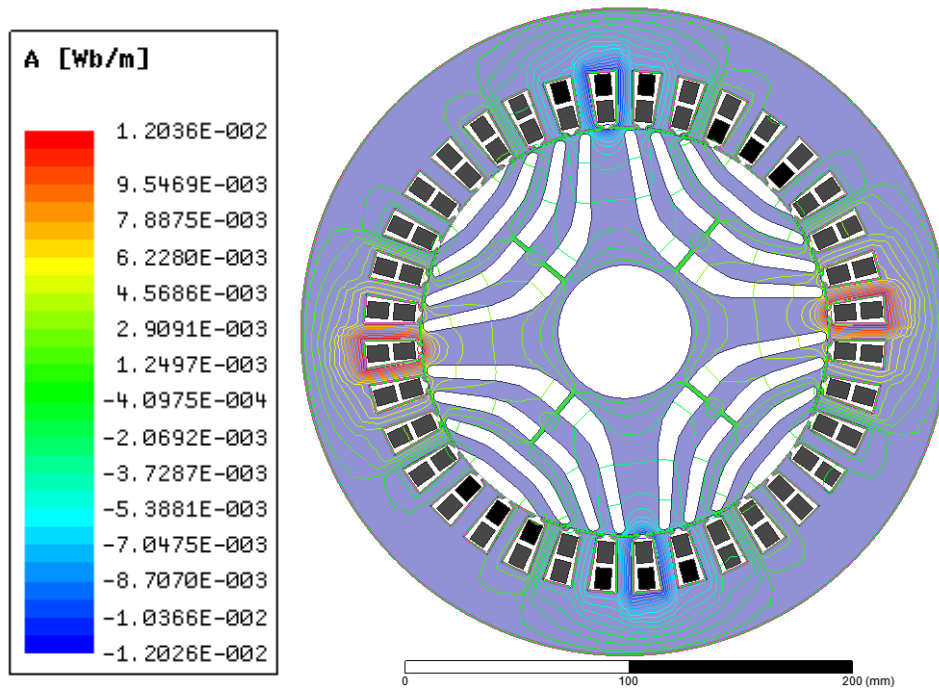


8.5 Mapy pole pro rotor s „Cut-Off“ strukturou v příčné ose

8.5.1 Mapa pole magnetické indukce

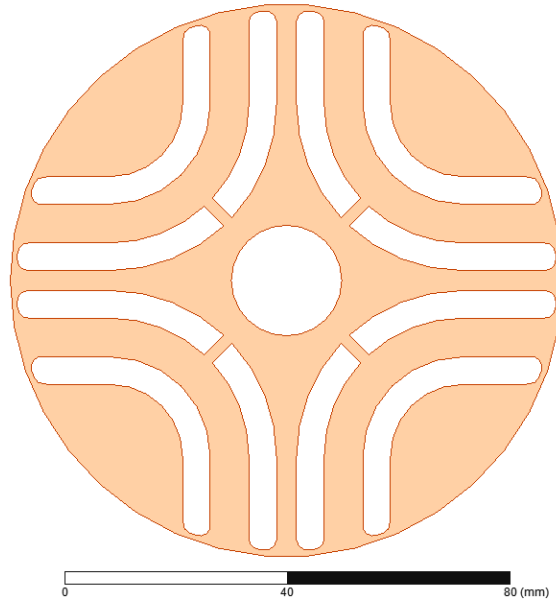


8.5.2 Siločivky magnetického toku statoru

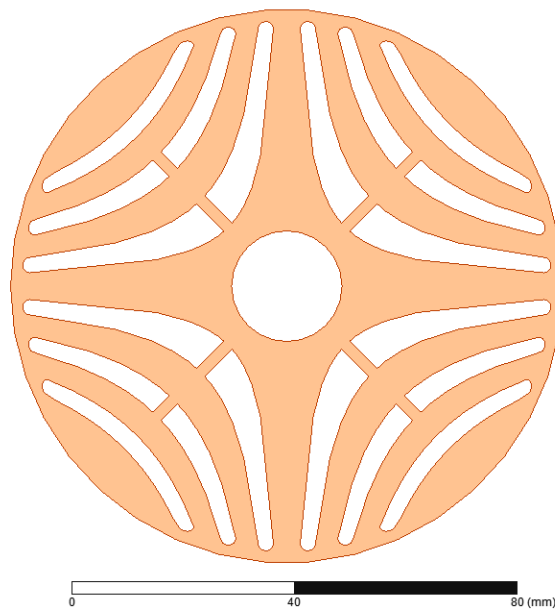


8.6 Tvary rotorů RSM

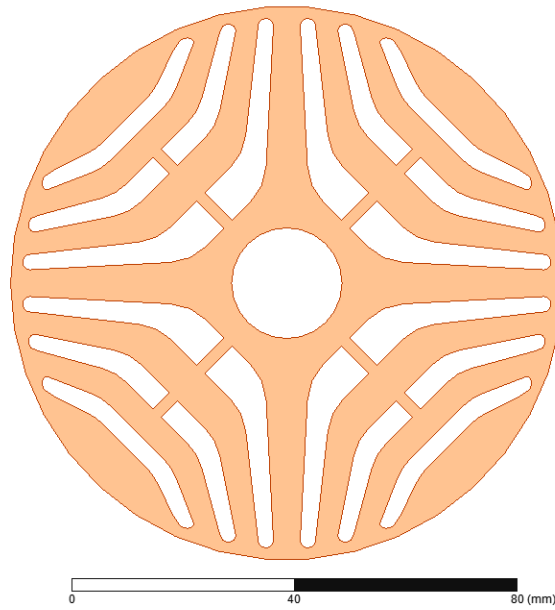
Arc



Hyperbolic



Hyperbolic line



ALA

