

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra elektrických pohonů a trakce**

**Aplikace vývojového prostředí ANSYS pro optimalizaci  
geometrie rotoru synchronního motoru 10 kW s  
permanentsními magnety**

**Květen 2018**

**Bakalant: Jan Dimitrov**

**Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.**

## Čestné 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.

Datum: 25. 5. 2018

.....

podpis bakalanta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za poskytnutí rad, podnětů a materiálů pro zpracování této bakalářské práce.

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dimitrov** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **456977**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Aplikace vývojového prostředí ANSYS pro optimalizaci geometrie rotoru synchronního motoru 10 kW s permanentními magnety**

Název bakalářské práce anglicky:

**Application of ASYS Enviroment in 10kW PMSM Geometry Optimalization**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s vývojovým prostředím ANSYS Maxwell/RMxpert
2. Vypracujte literární a patentovou rešerši současného stavu techniky PMSM
3. Ve vybraných variantách proveďte elektromagnetický návrh stroje
4. Proveďte simulace funkce stroje v ANSYS Maxwell 3D.
5. Analyzujte vypočtená data.
6. Vypracujte doporučení pro technickou praxi

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] Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S., Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, IEEE Press, 2013
- [4] Manuály ANSYS RMxpert, Maxwell 3D, Techsoft-engineering 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **16.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Karel Buhr, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

**Anotace:**

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s vývojovým prostředím ANSYS Electronics a v tomto programu navrhnout synchronní motor s permanentními magnety o výkonu 10 kW. Pomocí simulací porovnat různé geometrie rotoru a posoudit velikosti povrchových ztrát v permanentních magnetech v závislosti na jejich rozložení.

**Klíčová slova:**

Synchronní motor s permanentními magnety, Ansys Electronics, RMXprt, Maxwell

**Summary:**

The aim of this Bachelor thesis is to become acquainted with the development environment ANSYS Electronics and to design a synchronous motor with permanent magnets with the power of 10 kW in this program. Further to compare different geometries of the rotor using simulations and to assess the surface losses in permanent magnets depending on their layout.

**Index Terms:**

Synchronous motor with permanent magnets, Ansys Electronics, RMXprt, Maxwell

# OBSAH

Úvod.....	7
1 Literární řešerše.....	8
2 Návrh modelu.....	9
2.1 RMxprt.....	9
2.1.1 Volba provedení statoru.....	10
2.1.2 Volba provedení rotoru.....	10
2.2 Výsledky RMxprt.....	11
3 Maxwell 2D/3D.....	13
3.1 Meshing.....	14
3.2 Motion Setup.....	15
3.3 Nastavení pro výpočet ztrát.....	15
4 Ztráty v permanentních magnetech.....	16
5 Výsledky simulací v Maxwell 2D.....	19
5.1 1. typ rozložení magnetů.....	19
5.2 2. typ rozložení magnetů.....	22
5.3 3. typ rozložení magnetů.....	24
6 Porovnání výsledků simulací.....	27
Závěr.....	28
Literatura.....	29
Přílohy.....	30
Příloha 1 - Designe Sheet.....	30
Příloha 2 – Vlastnosti elektrické oceli DW310_35.....	34
Příloha 3 – Vlastnosti elektrické oceli Steel_1008.....	35

# Úvod

Elektrické motory se stále vyvíjejí a zdokonalují podle konkrétních aplikací. Mezi hlavní cíle patří zvyšování účinnosti, kterého je také možné dosáhnout použitím permanentních magnetů, které nahradí vinutí buzení synchronního motoru. Výhodou je snížení ztrát v rotoru, protože zde není vinutí protékané elektrickým proudem, ale magnety bývají většinou vodivé, takže v nich vznikají Jouleovy ztráty způsobené vířivými proudy. Dříve byly permanentní magnety využívány převážně v aplikacích s malými otáčkami, kde tyto ztráty byly zanedbatelné, ale nyní se stále více používají ve vysokootáčkových motorech, kde se s těmito ztrátami musí počítat hlavně z důvodu zahřívání magnetů. Dalším typem motoru zajímavým z hlediska snižování ztrát v rotoru jsou reluktanční motory. Tyto motory využívají rozdílné velikosti indukčnosti v příčné a podélné ose díky speciálnímu tvaru rotoru. Některé tyto rotory využívají také pomocných permanentních magnetů, které zvyšují poměr indukčností.

My budeme navrhovat synchronní motor s permanentními magnety pomocí vývojového prostředí *Ansys Electronics*. V modulu *RMxprt* navrhne a zkontrolujeme základní vlastnosti motoru, jehož stator bude proveden jako u synchronního stroje s třífázovým vinutím. Na rotor budou umístěny permanentní magnety různých tvarů. Dále návrh převedeme do modelu MKP *Maxwell 2D*, kde pomocí simulací provedeme porovnání různých geometrií rotoru, především jejich vliv na povrchové ztráty v magnetech.

# 1 Literární rešerše

Využití permanentních magnetů v točivých elektrických strojích se stává stále rozšířenější. K dispozici je řada odborných článků, které se touto problematikou zabývají. Mezi ně patří článek od Aleksandra Nagorny, který pro společnost NASA navrhoval motor pro setrvačnick využíváný v kosmu a prováděl na něm simulace [7]. Stejně jako v naší práci se zabývá mimo jiné geometrií rotoru a demagnetizací permanentních magnetů.

Omezením ztrát vířivými proudy v magnetech pomocí částečného stínění se zabývají autoři v článku [6]. Také studují, jaký vliv na těchto ztrátách má velikost vzduchové mezery a velikost vstupu statorových drážek.

Motory s permanentními magnety mají velký potenciál využití v elektro nebo hybridních automobilech. V článku [8] je provedeno porovnání různých typů motorů, mezi které patří synchronní motor s permanentními magnety a synchronní reluktanční motor s pomocnými magnety.

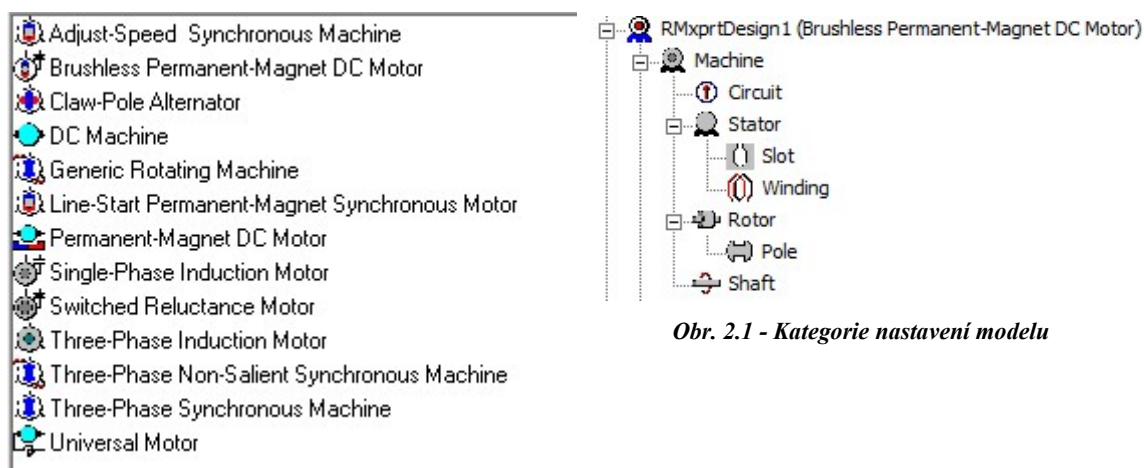


## 2 Návrh modelu

Model je možné vytvořit několika způsoby. *Ansys* podporuje velkou řadu formátů i jiných vývojových programů, mezi které patří *AutoCad*, ze kterého můžeme hotový, předem připravený model, importovat. Dále jsou zde dvě možnosti jak vytvářet model přímo v *Ansys Eletronics*. Jednou z nich je použít v modulu *Maxwell* předdefinované tvary (User Defined Primitive), kde si můžeme zvolit část stroje, kterou chceme vložit do projektu a změnit jeho parametry tak, aby odpovídaly našim požadavkům.

### 2.1 RMxpert

Další možností, kterou budeme využívat, je modul *RMxpert* (Rotating Machine expert) kde na začátku zvolíme z nabídky typ motoru (Obr. 2.1), v našem případě *Brushless Permanent-Magnet DC Motor*, který odpovídá požadovanému synchronnímu motoru s permanentními magnety. V jednotlivých kategoriích (Obr 2.2), které se liší podle typu stroje, postupně nastavíme jednotlivé hodnoty a parametry.



Obr. 2.1 - Kategorie nastavení modelu

Obr. 2.2 - Výběr typu stroje v RMxpert

V první kategorii *Machine* (Obr. 2.3), kde jsme provedli základní nastavení motoru, jsme zadali, že se jedná o 4 pólový stroj s vnitřním umístěním rotoru, velikost ztrát třením a ventilací. Jde o vysokootáčkový stroj a jeho referenční otáčky jsme nastavili na 50 000 ot/min. Dále jsme zvolili, jestli napájení bude provedeno měničem typu DC nebo CCC (chopped current control) a zapojení obvodu je provedeno do hvězdy.

V nastavení obvodu (Obr. 2.4) jsme určili šířku spouštěcího impulsu na 120°, úbytek napětí na tranzistoru a na diodách, maximální a minimální proud měničem, který je potřeba nastavit u námi zvoleného typu CCC.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Machine Type	Brushless Permanent-Magnet DC M...		
Number of Poles	4		
Rotor Position	Inner Rotor		
Frictional Loss	50	W	50W
Windage Loss	100	W	100W
Reference Speed	50000	rpm	
Control Type	CCC		
Circuit Type	Y3		

Obr. 2.3 - Nastavení stroje (Machine)

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Lead Angle of Trigger	0	deg	0deg
Trigger Pulse Width	120	deg	120deg
Transistor Drop	2	V	
Diode Drop	2	V	
Maximum Current	200	A	200A
Minimum Current	100	A	100A

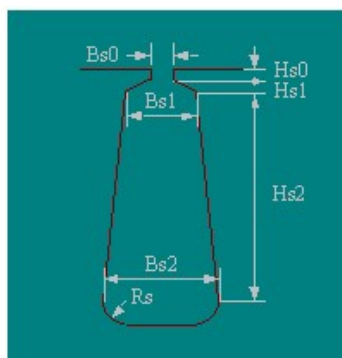
Obr. 2.4 - Nastavení obvodu (Circuit)

## 2.1.1 Volba provedení statoru

Ve specifikacích statoru (Obr. 2.5) jsme stanovili délku statoru, velikost vnitřního a vnějšího průměru. Zvolili jsme počet drážek 24, vybrali jsme z nabídky jejich typ a rozměry (Obr. 2.7) jsme stanovili podle tabulek normalizovaných rozměrů drážek pro vinutí z doporučené literatury [5]. Jako materiál jsme zvolili plechy z elektrické oceli DW310\_35, které jsou obsaženy v knihovně materiálů Ansys. Jeho vlastnosti jsou dány B-H křivkou a ztráty jsou vypočteny pomocí Steinmetzových konstant. Kompletní vlastnosti tohoto materiálu jsou v Příloze 2. Dále je zde nastavení faktoru plnění plechů, který určuje, kolik procent průřezu tvoří aktivní materiál v poměru k nemagnetické izolační vrstvě.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Diameter	146	mm	146mm
Inner Diameter	73.5	mm	73.5mm
Length	18.5	mm	18.5mm
Stacking Factor	0.95		
Steel Type	DW310_35		
Number of Slots	24		
Slot Type	3		
Skew Width	0		0

Obr. 2.5 - Nastavení statoru



Obr. 2.6 - Drážka statoru

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Auto Design	<input type="checkbox"/>		
Parallel Tooth	<input type="checkbox"/>		
Hs0	0.5	mm	0.5mm
Hs1	1.7	mm	1.7mm
Hs2	22.5	mm	22.5mm
Bs0	2.8	mm	2.8mm
Bs1	5.5	mm	5.5mm
Bs2	11.5	mm	11.5mm
Rs	0.7	mm	0.7mm

Obr. 2.7 - Rozměry drážek

## 2.1.2 Volba provedení rotoru

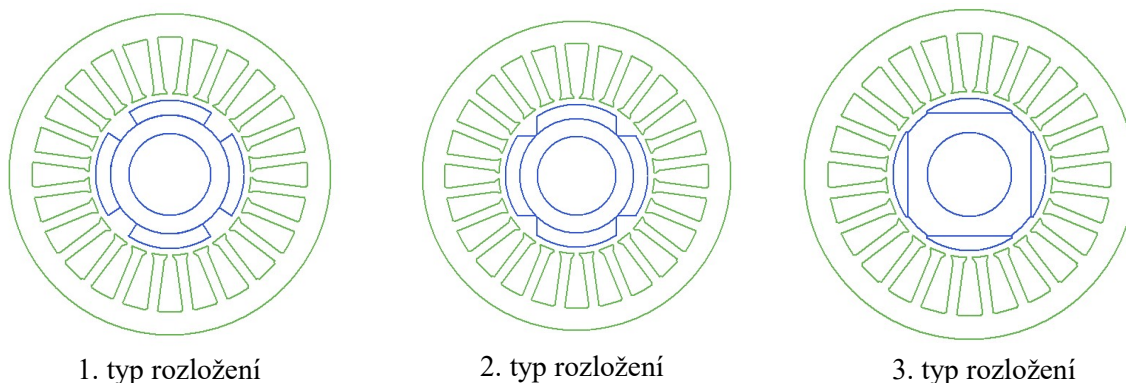
U rotoru jsme obdobně jako u statoru provedli nastavení rozměrů, zvolili jsme plný materiál *Steel 1008*, jehož vlastnosti jsou v Příloze 3, a určili jsme typ pólu. Budeme počítat se třemi variantami povrchové montáže permanentního magnetu (Obr. 2.9) a dále budeme porovnávat vliv geometrie na vlastnosti stroje. U všech typů rozložení je možné nastavit poměrnou část magnetu

na obvodu rotoru, offset, který umožňuje změnit střed kružnice, která opisuje tvar pólu, oproti středu

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Diameter	68	mm	68mm
Inner Diameter	38	mm	38mm
Length	18.5	mm	18.5mm
Steel Type	steel_1008		
Stacking Factor	1		
Pole Type	1		

Obr. 2.8 - Nastavení rotoru

motoru, materiál magnetu, v našem případě samarium kobaltové magnety (SmCo) a tloušťka magnetu. Pro náš model jsme použili magnety od společnosti *Arnold Magnetic Technologies*, jejichž materiály jsou obsaženy v knihovně *Ansysu*. Naposled musíme zvolit, zda chceme počítat s magnetickou nebo nemagnetickou hřídelí. My jsme použili hřídel nemagnetickou.



*Obr. 2.9 - Typy rozložení magnetů na rotoru*

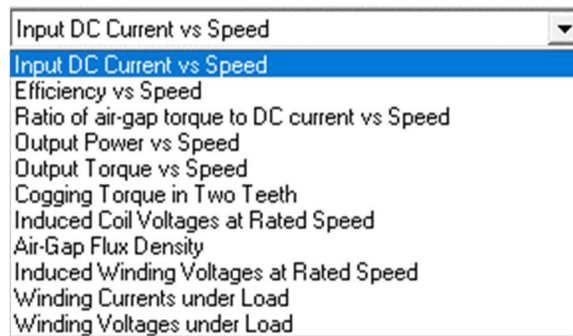
## 2.2 Výsledky RMxprt

Abychom u takto definovaného motoru v modulu *RMxprt* mohli provádět simulace a dále například vytvořit model v *Maxwell2D/3D*, musíme nastavit *Analysis Setup* (Obr. 2.10), kde stanovíme jestli se jedná o motor nebo generátor. Typ zátěže zvolíme z možností: konstantní rychlost, výkon, moment; lineární moment a moment podle ventilátorové charakteristiky, jmenovité hodnoty výkonu, napětí, rychlosti a pracovní teplotu.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name	Setup1		
Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>		
Operation Type	Motor		
Load Type	Const Power		
Rated Output Power	7.6	kW	7.6kW
Rated Voltage	61	V	61V
Rated Speed	50000	rpm	50000rpm
Operating Temperature	115	cel	115cel

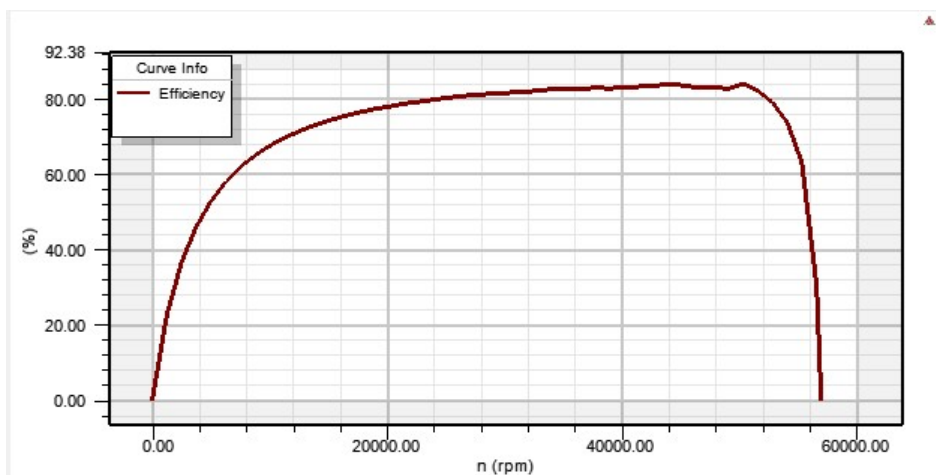
*Obr. 2.10 - Analysis setup*

Před provedením celkové analýzy modelu (*Analyze All*) je nutné provést kontrolu úplnosti (validaci), která ověří, jestli je model zadaný v pořádku. Po provedení analýzy získáme množství dat (Solution data), jak ve formě číselné, tak i grafické. V dostupném dokumentu je úplná výpočetní specifikace, která mimo jiné obsahuje výpis zadaných hodnot všech částí stroje a materiálů, také vstupní hodnoty a velikosti různých veličin při plném zatížení i bez zatížení. (viz Příloha 1). Dále je možné zobrazit křivky různých veličin v závislosti například na otáčkách či elektrickém úhlu (Obr. 2.11).



*Obr. 2.11- Možnosti grafického výstupu RMxprt*

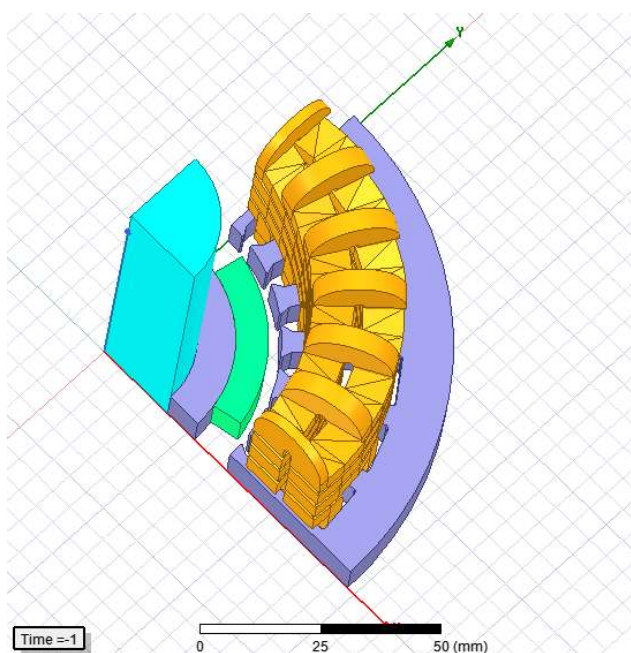
Jedním z grafů, který je možné zobrazit, je účinnost v závislosti na otáčkách (Obr. 2.12). V tomto grafu i v číselných výsledcích můžeme zjistit, že účinnost při plném zatížení se pohybuje okolo 84 %, což se může zdát na tento motor málo, ale jsou zde započteny ztráty v jádře statoru i rotoru, také ztráty třením, ventilační a značné jsou také ztráty na tranzistorech a diodách v měniči.



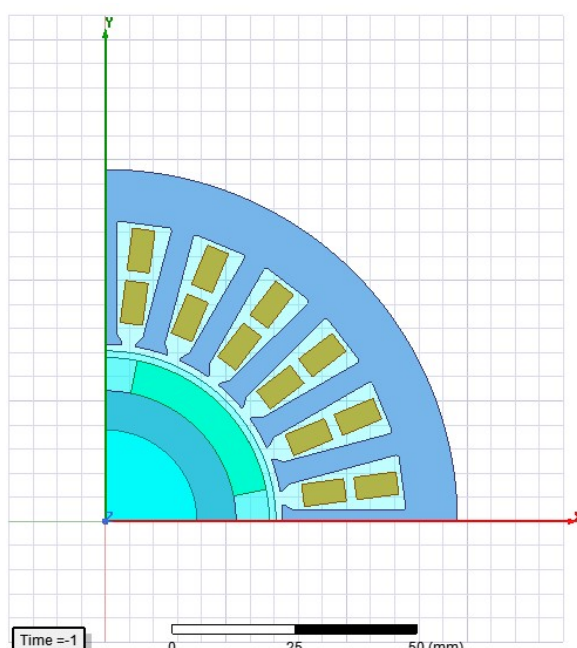
*Obr. 2.12 – Závislost účinnosti na otáčkách*

### 3 Maxwell 2D/3D

Pro další výpočty a simulace je nutné převést vyřešený a validovaný model z *RMxp* do *Maxwell 2D* nebo *Maxwell 3D*. My budeme využívat především 2D simulace, které jsou výpočetně jednodušší a pro náš účel dostačující. Při převodu do Maxwellu se automaticky (v programu Circuit Editor) vytváří elektrický obvod, ze kterého je model napájen. V tomto modulu je řada možností, jak zobrazit výsledky. Jednou z nich jsou mapy polí, kde je možné znázornit např. hustoty, vektory silokřivky atd. jednotlivých veličin elektromagnetického pole. Nejčastěji se jedná o magnetický tok, magnetickou indukci, intenzitu magnetického pole, proudovou hustotu, ztráty a další. Z těchto veličin je také možné vytvořit různé typy grafů.



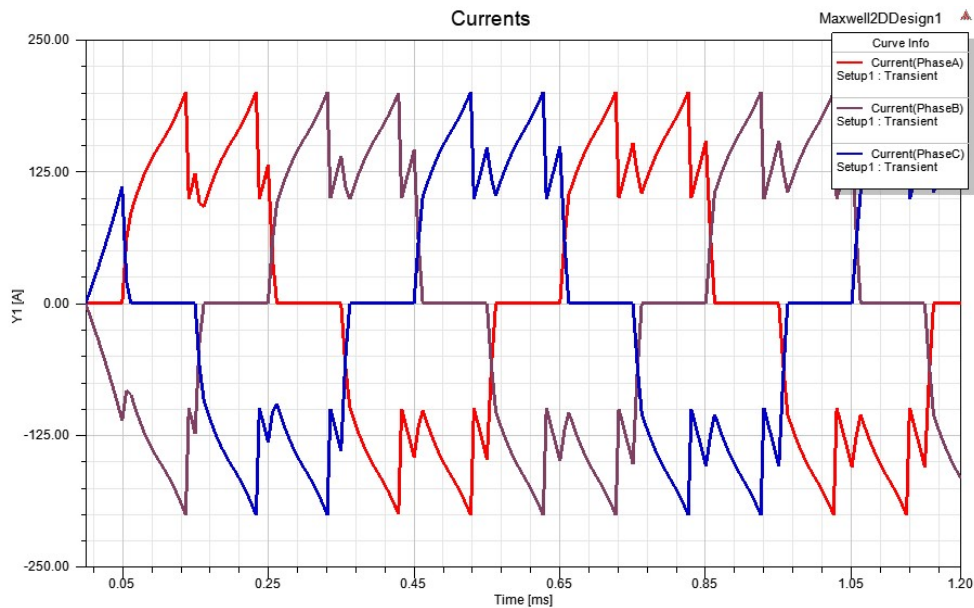
Obr. 3.1 - 3D model motoru



Obr. 3.2 - 2D model motoru

Mezi základní grafy, které Maxwell sám vygeneruje, patří průběh momentu, proudů, indukovaného napětí a spřaženého magnetického toku v čase. Na obr. 3.3 můžeme sledovat průběh proudů všech tří fází, které se pohybují v námi nastaveném pásmu, který je určený maximální a minimální hodnotou proudu v měniči, který pracuje v režimu „CCC“ viz. kapitola 2.1. Maximální proud je nastaven na 200 A, minimální na 100 A.



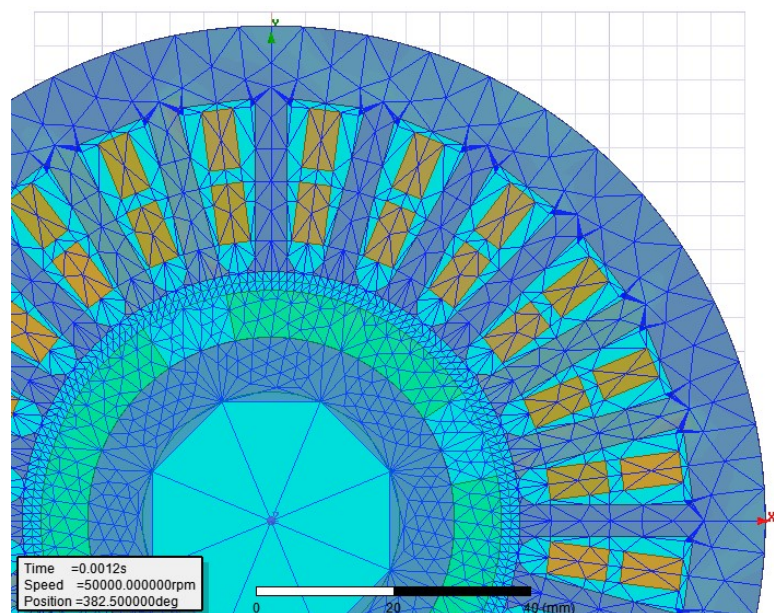


**Obr. 3.3 - Průběh proudů v čase**

Maxwell nabízí možnost využít tři různé řešiče, a to *Magnetostatic*, *Transient* a *EddyCurrent*. Magnetostatický řešič je výpočetně nejjednodušší a simulace trvají nejkratší dobu. Proudů je zde potřeba zadávat do jednotlivých částí cívek ručně na rozdíl od *Transientu*, kde jsou proudy vypočteny automaticky. V transientních simulacích můžeme sledovat elektrické i elektromechanické přechodové děje a porovnávat výsledky v různých časech. *EddyCurrent* řešič zase umožňuje provádět simulace pro různé frekvence napájecího napětí nebo proudu. My budeme hlavně využívat řešič *Transient*.

### 3.1 Meshing

Důležité je nastavení výpočetní sítě (*Meshing*) na modelu a stanovení okrajových podmínek na prostoru řešení. Simulace spočívá v řešení diskretizovaných Maxwellových rovnic v celém výpočetním prostoru. Návrh sítě, který je složen z trojúhelníků, ovlivňuje v značné míře přesnost, ale také dobu výpočtu. Pro naše potřeby jsme zachovali původní nastavení. Největší nepřesnost může vzniknout v oblasti hřídele, která je nahrazena pouze osmi trojúhelníky, ale i přes to jsou pro nás takto přesné výsledky dostačující.

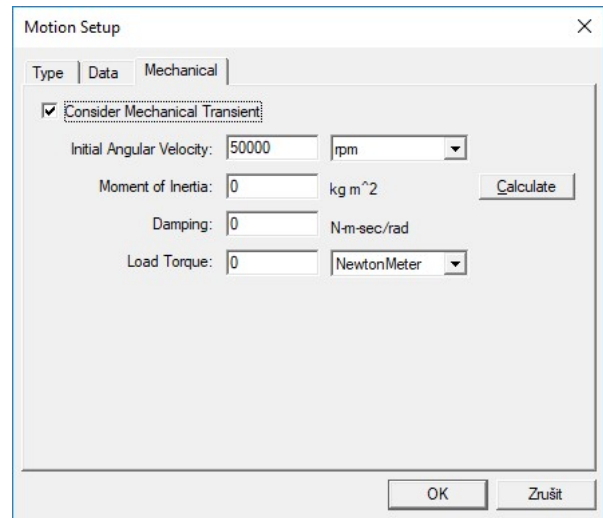


**Obr. 3.4 - Rozložení výpočetní sítě**

## 3.2 Motion Setup

Další krok, který je nutné před spuštěním provést, je definování mechanického zatížení, tzv. *Motion Setup*. Zde se nastaví typ pohybu (translační resp. rotační), podél které osy bude vykonáván a počáteční natočení rotoru. V kolonce *Mechanical* (Obr. 3.5) můžeme zvolit, zda budeme řešit elektro-mechanický přechodový děj, kde je kromě rychlosti otáčení potřeba nastavit ještě moment setrvačnosti, tlumení a zátěžný moment nebo pouze elektro-magnetický, kde stačí nastavit rychlost, kterou bude rotor v simulaci rotovat a následně dojde k připojení ke zdroji.

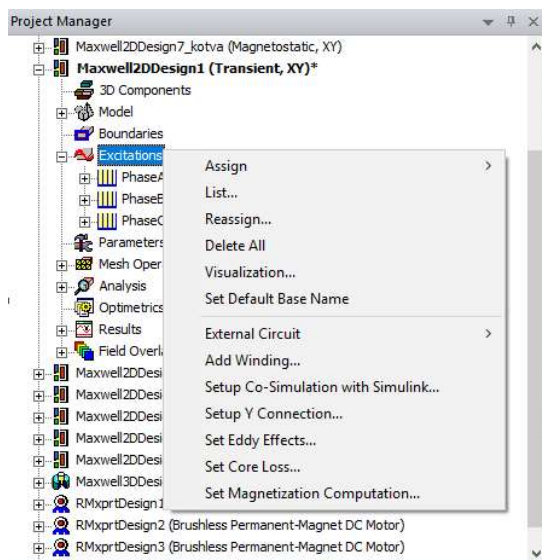
Budeme používat druhý způsob, takže rozběh (elektro-mechanický přechodový děj) řešit nebudeme.



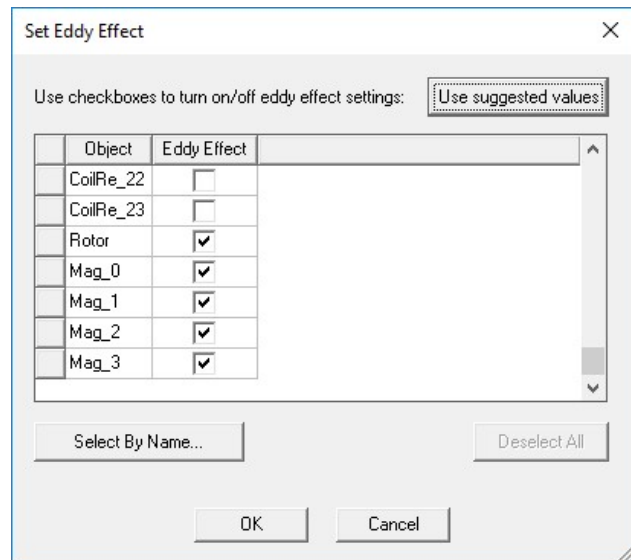
Obr. 3.5 - Motion Setup

## 3.3 Nastavení pro výpočet ztrát

Protože se chceme zabývat ztrátami, především v permanentních magnetech, je potřeba zadat, v jakých částech motoru se budou dané ztráty počítat. Nastavení se provede pravým kliknutím na kategorii *Excitations* a volbou *Set Eddy Effects* a *Set Core Loss* (Obr. 3.6). Nastavili jsme tak výpočet ztráty v železe ve statoru a výpočet ztrát vířivými proudy v permanentních magnetech a rotoru. Příslušné objekty (stator, rotor, Mag\_0 – Mag\_3) musí být předem označeny, dále je třeba vybrat typ ztrát (*Eddy Effects* resp. *Core Loss*).



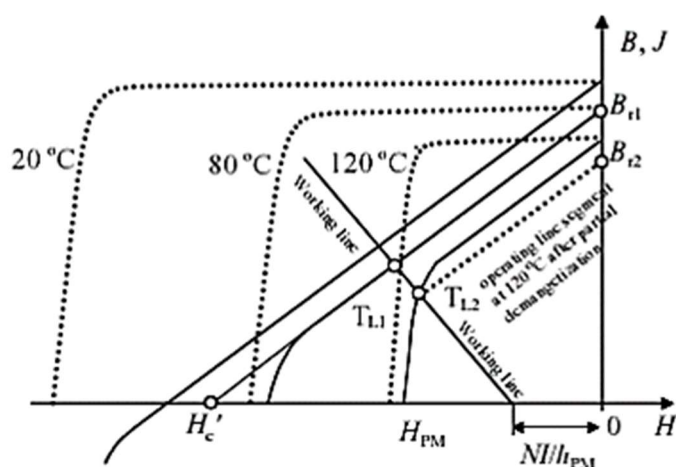
Obr. 3.6 - Nastavení ztrát



Obr. 3.7 - Nastavení ztrát vířivými proudy

## 4 Ztráty v permanentních magnetech

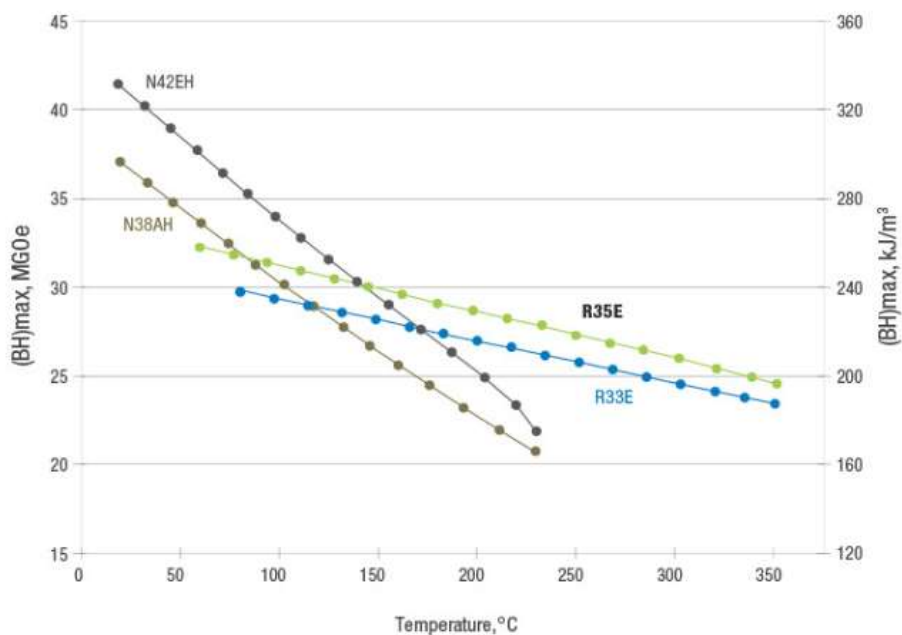
Ztrátami v permanentních magnetech se zde rozumí ztráty na povrchu magnetu způsobené vířivými proudy. Je nutné se jimi podrobně zabývat, protože chlazení rotoru je obtížné a příliš velké ztráty by mohly způsobit ohřátí magnetů natolik, že by mohlo dojít k jejich demagnetizaci. Na obr. 4.1 můžeme sledovat příklad demagnetizace způsobené ohřátím magnetů z 80 °C na 120 °C. Za konstantní zátěže motoru se pracovní bod změní z  $T_{L1}$  na  $T_{L2}$ . Tím se sníží remanentní magnetická indukce a koercitivní intenzita magnetického pole.



Obr. 4.1 - Demagnetizace způsobené ohřátím magnetu [1]

Pro náš model jsme zvolili SmCo magnety, které mají v porovnání s NdFeB vyšší teplotní stabilitu a mohou pracovat při vyšších teplotách. Knihovny *Ansysu* obsahují magnety od firmy *Arnold Magnetic Technologies*, kterých jsme v našem modelu využili. Na firemních stránkách této společnosti jsou uvedeny vlastnosti různých typů magnetů a také porovnání teplotní závislosti výše zmíněných magnetů (Obr 4.2). SmCo magnety mají v toto grafu označení R35E a R33E a NdFeB jsou označeny N42EH a N38AH. Dále popisované simulace jsou provedeny s magnety SmCo s označením R35E.





Obr. 4.2 - Porovnání teplotní závislosti NdFeB a SmCo magnetů [9]

Charakteristické vlastnosti permanentního magnetu R35E jsou uvedené v následující tabulce (Obr. 4.3). Nejdůležitějším parametrem v souvislosti se ztrátami vířivými proudy je měrná vodivost, která je v našem případě 1111110 S/m.

Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	1.06858	
Bulk Conductivity	Simple	1111110	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	-783872	A_per_meter
- R Component	Unit Vector	1	
- Phi 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		None	w/m^3
Mass Density	Simple	8300	kg/m^3
Composition		Solid	
Magnetostriction	Custom	<input type="button" value="Edit..."/>	
Inverse Magnetostriction	Custom	<input type="button" value="Edit..."/>	

Obr. 4.3 - Vlastnosti SmCo magnetů

Vířivé proudy vznikají v časově proměnném magnetickém poli ve vodivém materiálu. Ztráty způsobené vířivými proudy můžeme vypočítat dle [4] jako:

$$P = \int_{Vol} \frac{J \times J^*}{2\sigma} dVol \quad (1)$$

- $J$  je proudová hustota
- $J^*$  je komplexně sdružená proudová hustota
- $\sigma$  je vodivost.

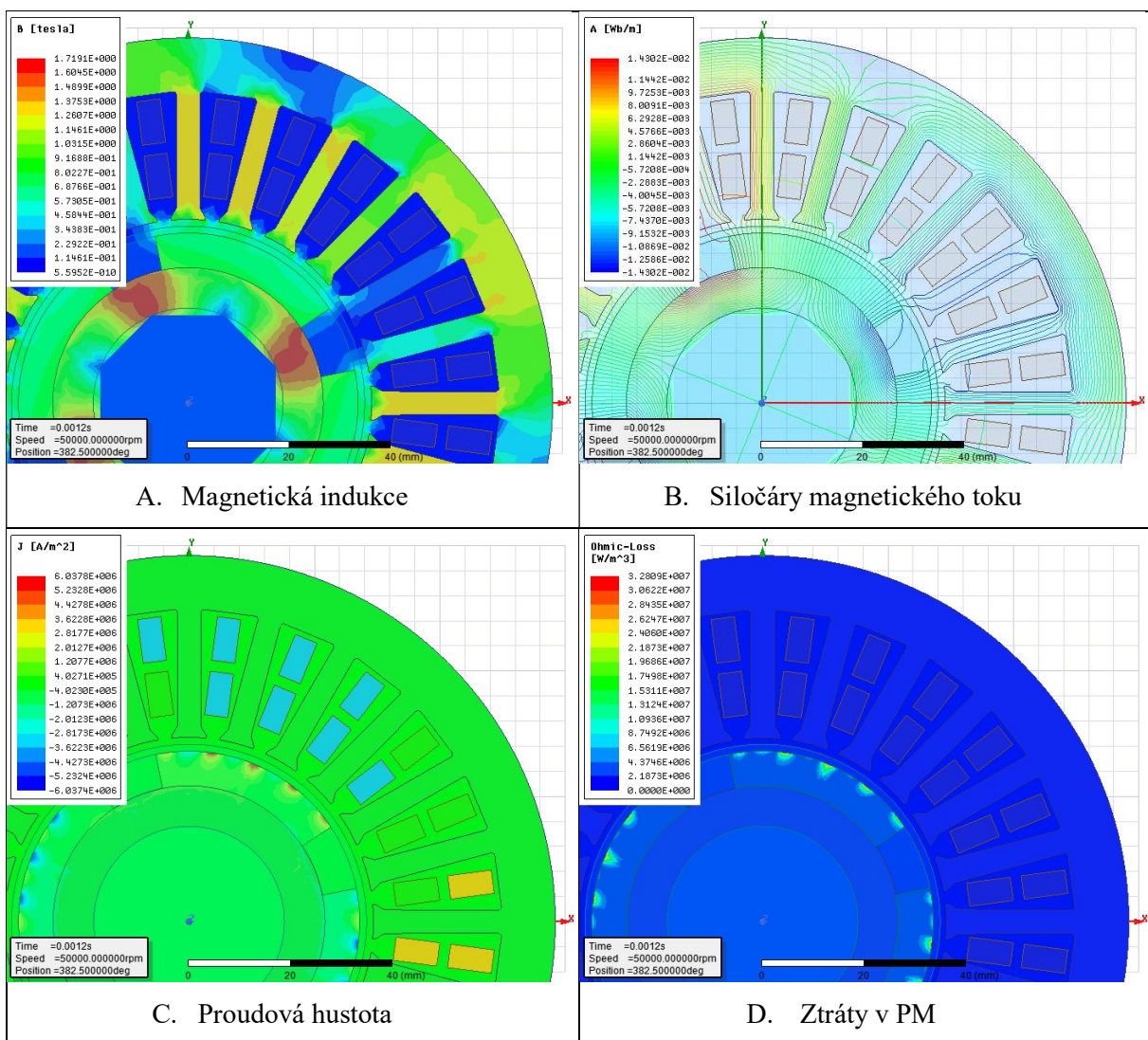
Lze předpokládat, že na mapě ztrát budou nejvyšší ztráty způsobené vířivými proudy v místech (elementech) s nejvyšší proudovou hustotou.

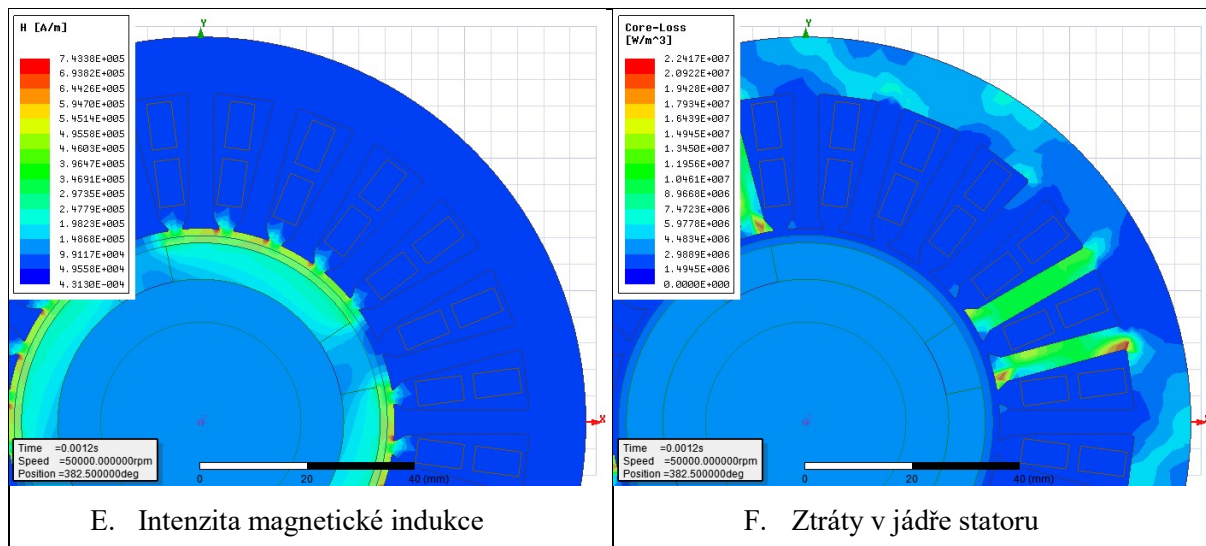
Je možné provést takové úpravy geometrie rotoru, aby došlo ke snížení lokální hodnoty proudové hustoty, která se výrazně projeví na velikosti ztrát v magnetech. Vliv má rovněž velikost vzduchové mezery, ale také je možné umístit na magnety vodivý materiál, který bude fungovat jako stínění, a vířivé proudy se uzavřou v něm, namísto v magnetech. Dále je vhodné použít ochranný rukáv, který má zachytit odstředivé síly, které jsou u těchto vysokootáčkových motorů značné. Tento rukáv může být např. z nemagnetického kovu nebo z karbonových vláken. Výhodou karbonových vláken je, že také snižují ztráty vířivými proudy v magnetech. [6] My se zaměříme pouze na vliv rozložení magnetů na rotoru a jejich tvaru na povrchových ztrátách.

## 5 Výsledky simulací v Maxwell 2D

V této kapitole budeme porovnávat pomocí simulací v modulu Maxwell tři základní rozložení permanentních magnetů a v následujících tabulkách sledovat magnetickou indukci, siločivky magnetického toku, proudovou hustotu, Jouelovy ztráty, intenzitu magnetického pole a ztráty v jádře statoru. Výsledky jsou ovlivněny hustotou výpočetní sítě, proto některé oblasti nemusí odpovídat našim předpokladům, například v prostoru hřídele. Kruhová hřídel je zde nahrazena pouze osmiúhelníkem, takže dochází k viditelné nepřesnosti. Toto je možné vyřešit změnou nastavení Meshingu, ale to by zvýšilo náročnost výpočtu. Přesnost dosavadních výsledků je pro nás dostačující.

### 5.1 1. typ rozložení magnetů





Tab. 5.1 - Porovnání map, 1. typ rozložení magnetů

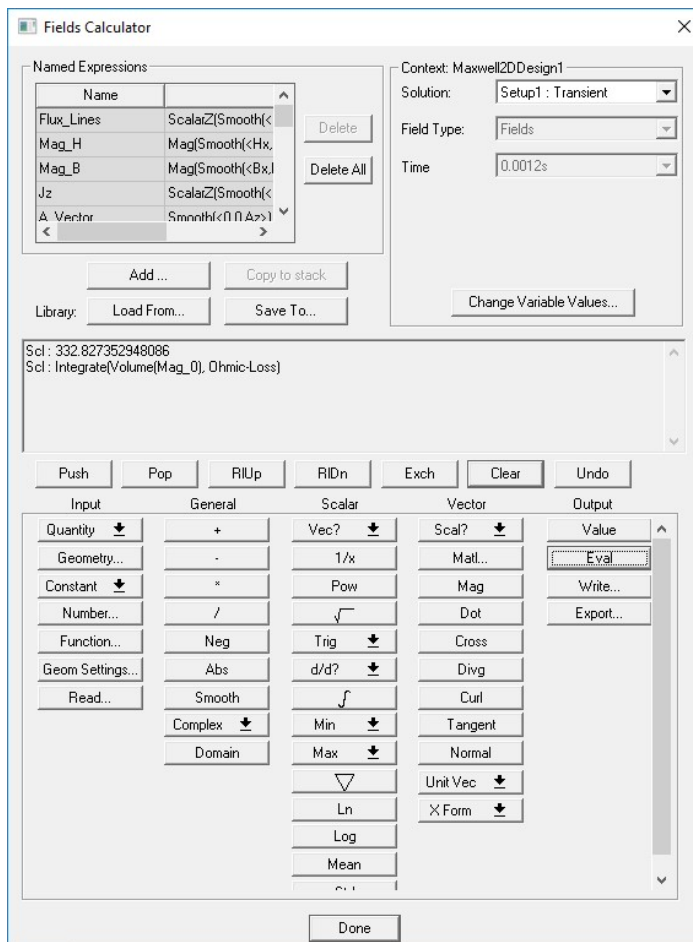
Mapa rozložení magnetické indukce (Tab. 5.1, A) barevně znázorňuje velikost této veličiny v řezu motoru. Nejvyšší hodnoty dosahuje v rotoru mezi magnety, kde se hodnota pohybuje okolo 1,7 T a ve statoru je nejvyšší indukce 1,3 T v zubu. V místech nejvyšší magnetické indukce ve statoru v daném okamžiku by měly být i nejvyšší ztráty, ale s mapou ztrát v jádře statoru (Tab. 5.1, F) se výsledky podle našeho předpokladu neshodují. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobeno tím, že ztráty v železe jsou počítány z vypočtených hodnot, které předcházejí zobrazenému okamžiku. V obrázku (Tab. 5.1, B) je zobrazeno, jak se uzavírají siločáry magnetického toku v řezu našeho modelu. Silokřivky odpovídají místům nejvyšší magnetické indukce. Dále je zde mapa intenzity magnetického pole (Tab. 5.1, E), která je důležitá při kontrole, jestli nedosáhne hodnot, při kterých by hrozilo odmagnetování.

Velice důležité je pro nás rozložení ztrát v magnetech (Tab. 5.1, D), které odpovídá našemu předpokladu a shoduje se s proudovou hustotou (Tab. 5.1, C). Nevyšších hodnot dosahuje proudová hustota, a tedy i ztráty, v místě pod vstupem drážky na povrchu magnetu, kde nabývají hodnoty až  $3,2 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$ . Velikost vstupu drážky zřejmě souvisí s velikostí oblasti, kde se indukují vířivé proudy, proto je výhodné vstup drážky navrhnout co nejmenší, ale aby umožňoval instalaci vinutí.

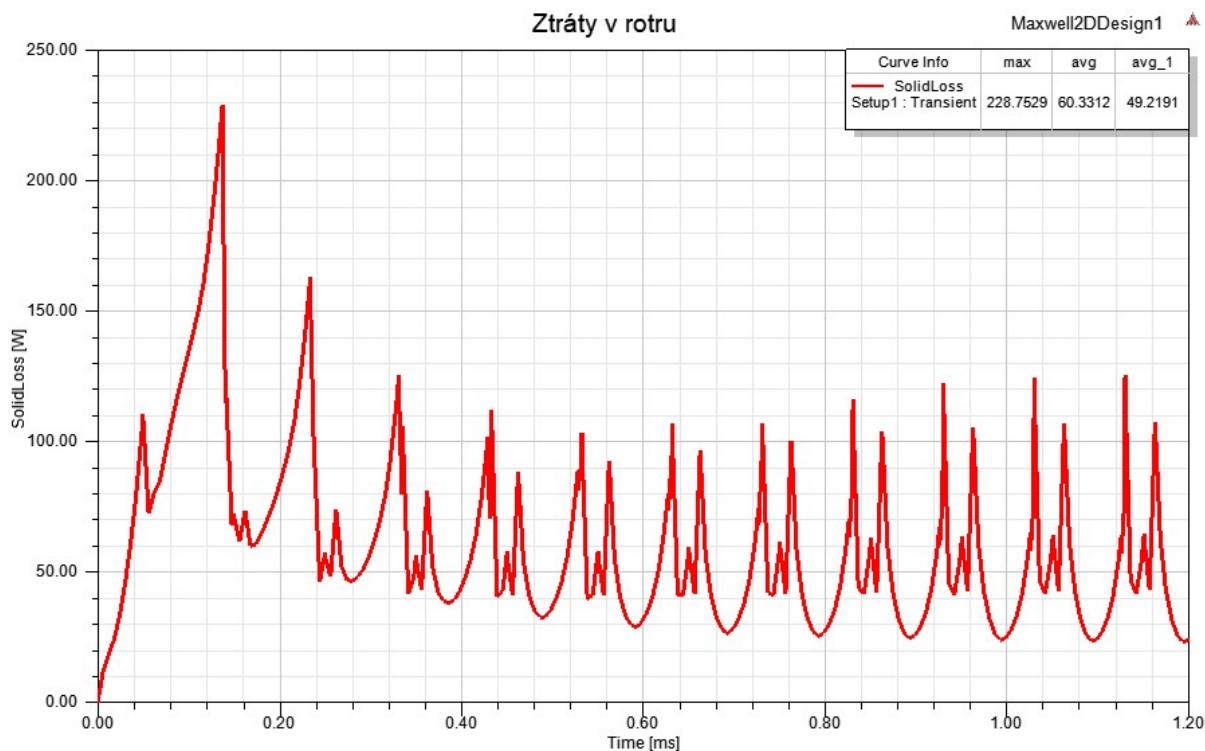
Abychom mohli vyhodnotit velikost ztrát v celém objemu materiálu, použili jsme *Field Calculator* (Obr. 5.1), který umožňuje provádět mnohé matematické operace týkající se magnetického pole a jeho veličin. Při práci ve 2D modelu, kalkulačtor dává výsledky na metr délky, proto musíme hodnotu násobit délkou našeho modelu. Pro výpočet ztrát v jednom magnetu jsme zadali integraci ohmických ztrát v objemu Magnetu\_0. Po vynásobení šířkou magnet 0,0185 m jsme získali velikost ztrát v jednom magnetu o velikosti 6,16 W. Obdobným způsobem jsme vypočítali ztráty v celém rotoru včetně magnetů: 25,19 W.

Stejně tak, jako je to u map polí, jedná se zde o okamžitou hodnotu, u nás konkrétně v čase 1,2 ms, kde už

neprobíhají přechodové děje a motor je v ustáleném stavu. Jestliže chceme pozorovat průběh ztrát v závislosti na čase, můžeme pomocí *Rectangular Plot* znázornit veličinu graficky. V následujícím grafu (Obr. 5.2) můžeme sledovat, že velikost ztrát v čase 1,2 ms, který jsme použili pro výpočet ve *Field Calculatoru*, je po ustálení ve svém minimu, proto jsme si nechali zobrazit ještě střední hodnotu v celém průběhu (avg) a v ustáleném stavu (avg\_1). Pro porovnání je lepší brát střední hodnotu po ustálení, která je 49,21 W. Maximální hodnota je 228,75 W, ta nabývá na začátku simulace, kdy dochází k velkému nárůstu proudu ve vinutí statoru. Hodnota vypočtená ve *Field Calculatoru* v čase 1,2 ms se přibližně shoduje výsledkem *Rectangular Plotu*.



Obr. 5.1 - Field Calculator



Obr. 5.2 - Průběh ztrát v čase v rotoru, 1. typ rozložení magnetů

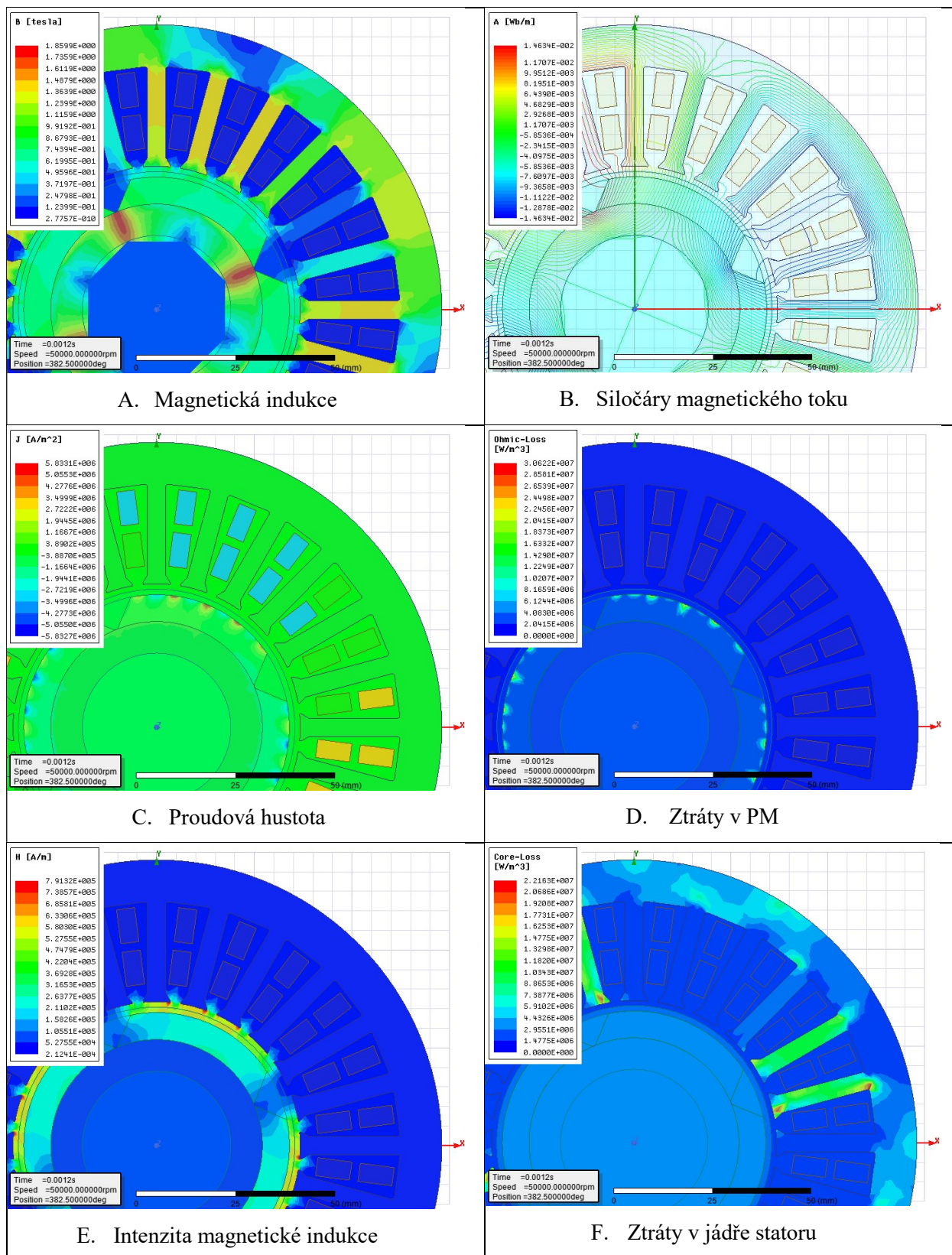
## 5.2 2. typ rozložení magnetů

Ze stejných hledisek budeme posuzovat i druhé rozložení magnetů, které je velice podobné jako to první, jen okraje magnetů nejsou na rotor kolmé. I výsledky provedených simulací ve stejném čase (Tab. 5.2) nejsou příliš rozdílné. Velikost magnetické indukce dosahuje v zubu statoru okolo 1,4 T, oblast nejvyšších ztrát v magnetech je opět jako v předchozím případě nejvyšší pod vstupem drážky, kde se pohybuje kolem  $2,9 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$ , což je o trochu méně než u prvního rozložení.

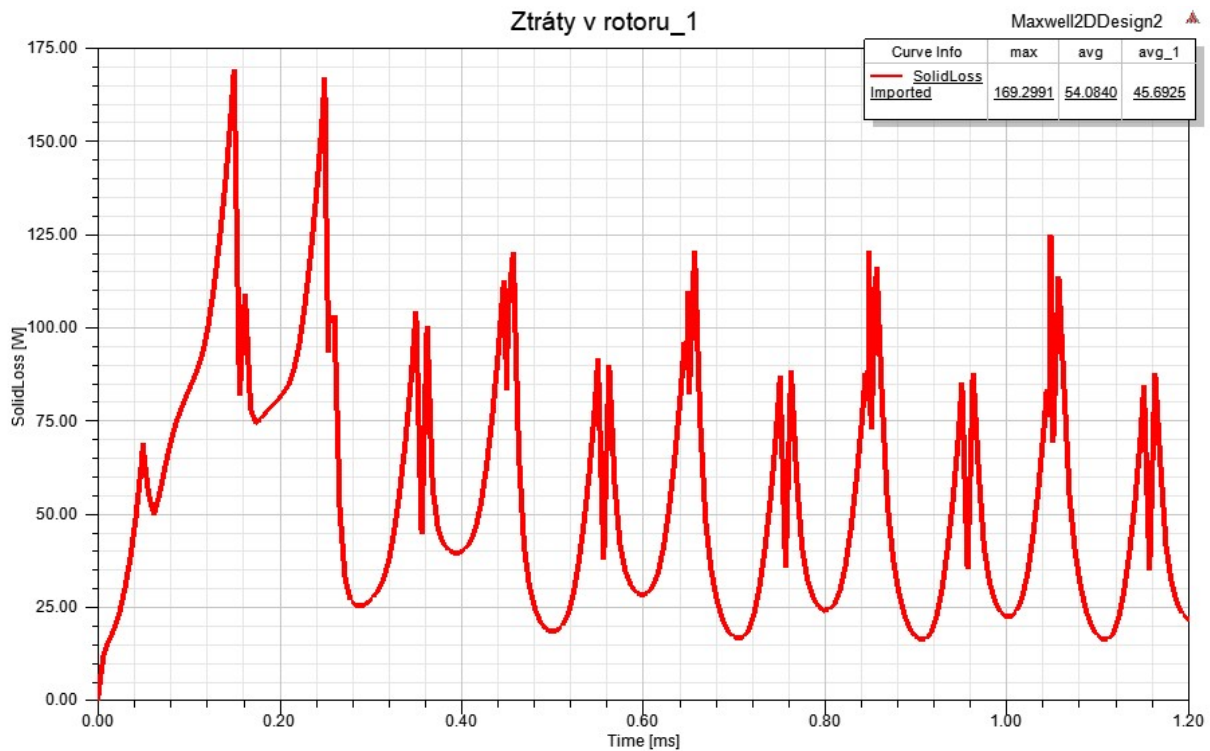
Pomocí *Field Calculatoru* jsme opět vypočítali velikost ztrát v jednom magnetu a celém rotoru v čase 1,2 ms. Velikost ztrát v celém objemu jednoho magnetu je 5,4 W a v celém rotoru 22,5 W.

Stejně jako u prvního rozložení jsou ztráty vypočtené pomocí *Field Calculatoru* v čase 1,2 ms přibližně ve svém minimu. Nechali jsme si zobrazit průběh ztrát v rotoru v čase a jeho střední a maximální hodnotu (Obr. 5.3). Průběh ztrát se od prvního typu liší, což je způsobeno tím, že i průběh napájecího proudu je pro tento typ odlišný. Maximální hodnota ztrát dosahuje 163,9 W a střední hodnota je 45,69 W.





Tab. 5.2 -- Porovnání map, 2. typ rozložení magnetů

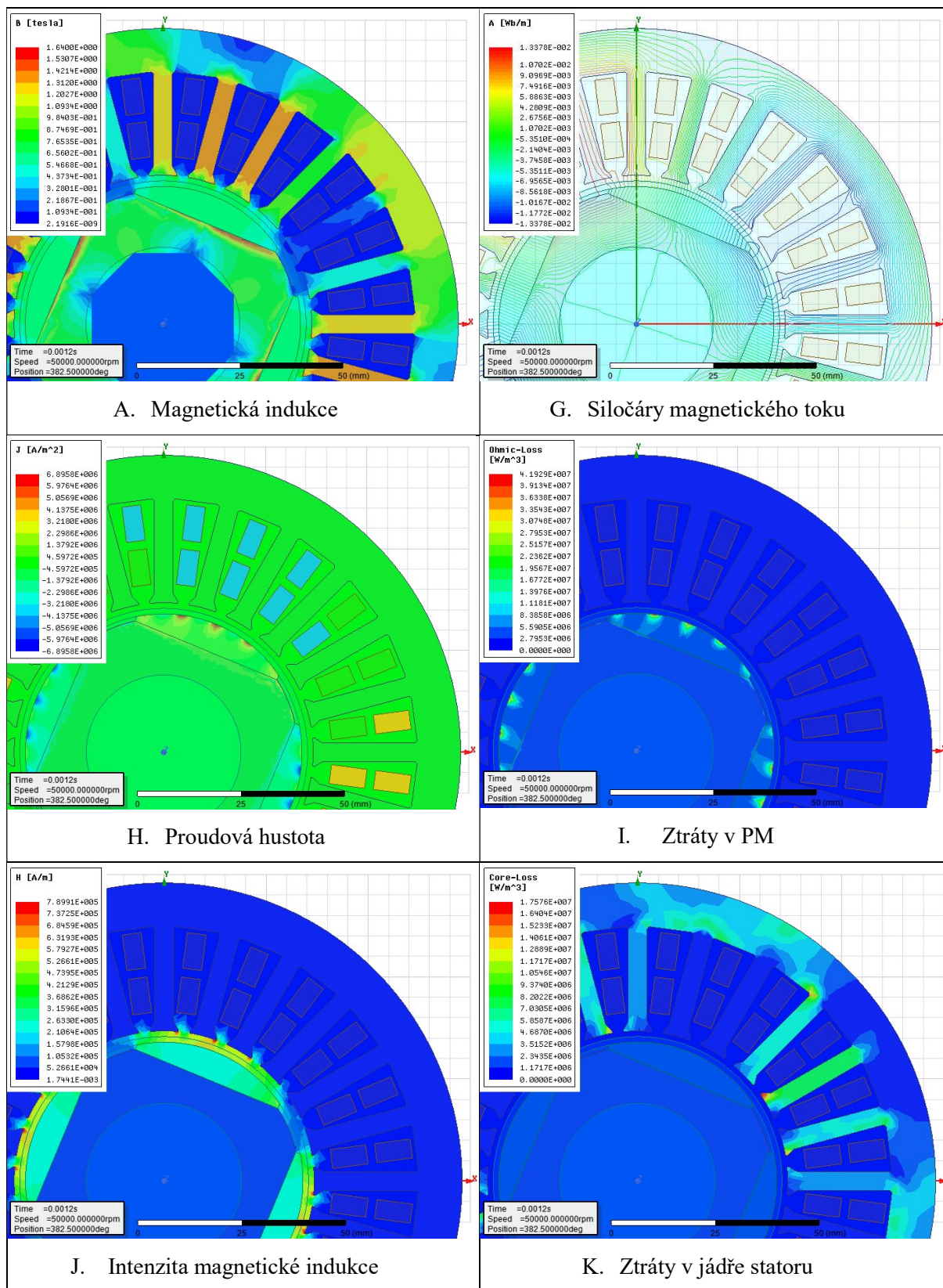


*Obr. 5.3 - Průběh ztrát v čase v rotoru, 2. typ rozložení magnetů*

### 5.3 3. typ rozložení magnetů

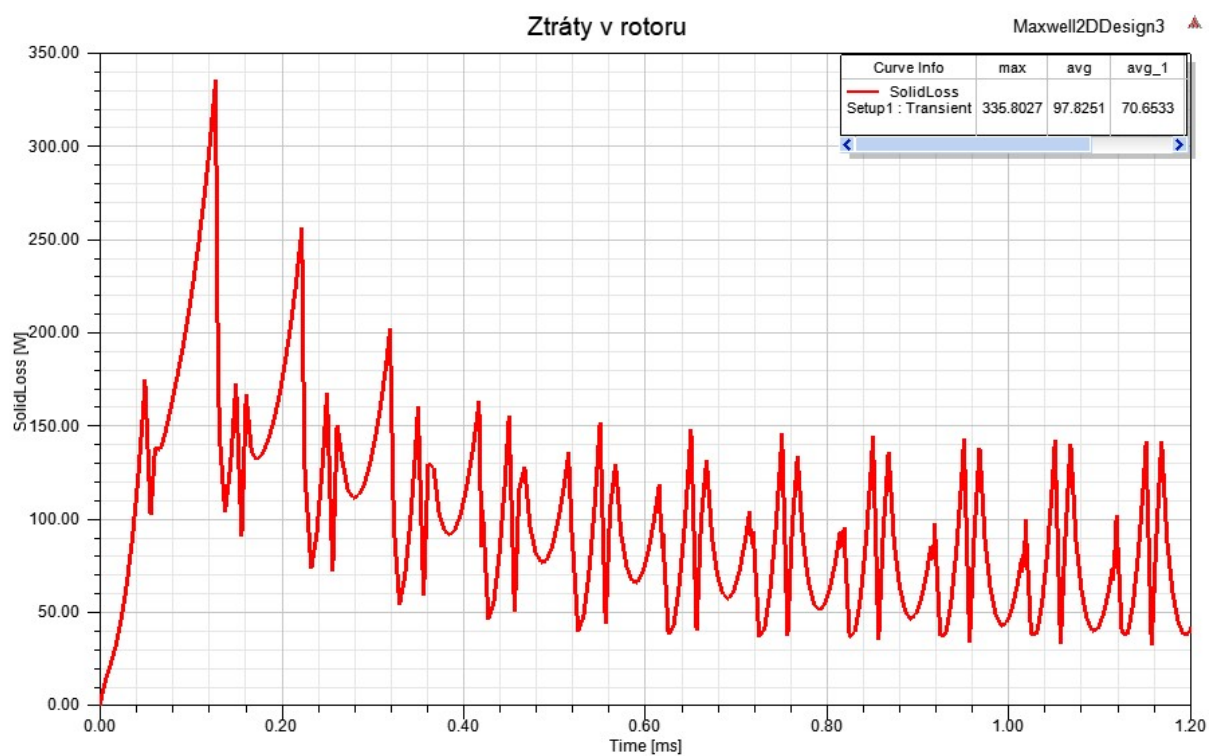
Třetí typ rozložení magnetů se od předchozích dvou tvarem liší více a i vypočítané simulace jsou rozdílnější (Tab. 5.3). Magnetická indukce (Tab. 5.3, A) dosahuje maxima v části pod magnetem, kde se pohybuje okolo 1,6 T a v zubu okolo 1,37 T. Maximální okamžitá hodnota ztrát je v porovnání s předešlými typy značně vyšší a dosahuje  $4,7 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$ . Mohli jsme předpokládat, že i ztráty v celém rotoru budou vyšší, a pomocí *Field Calculatoru* jsme vypočítali, že ztráty v jednom magnetu v daném okamžiku jsou 9,98 W a v celém rotoru 43,3 W.





Tab. 5.3 - Porovnání map, 3. typ rozložení magnetů

Podle očekávání i střední a maximální hodnota ztrát vypočtená z průběhu ztrát v čase (Obr. 5.4) se zvýšila. Maximální hodnota v tomto případě dosahuje až 335,8 W a střední hodnota je 70,65 W.



*Obr. 5.4 - Průběh ztrát v čase v rotoru, 3. typ rozložení magnetů*

## 6 Porovnání výsledků simulací

Abychom mohli porovnat předchozí tři použité geometrie rotoru, uvádím v tabulce 6.1 okamžitou velikost ztrát v jednom magnetu a v celém rotoru v čase 1,2 ms vypočtené pomocí *Field Calculator*. Dále je zde pro porovnání uvedena okamžitá hodnota z časového průběhu ze stejného okamžiku. Hodnoty se přibližně shodují.

V tabulce 6.2 jsou střední a maximální hodnoty z časového průběhu ztrát vytvořených pomocí *Rectangular Plot*. Z obou tabulek je patrné, že nejmenší ztráty vznikají v druhém typu rozložení magnetů a nejhorší z tohoto hlediska je třetí typ, který má přibližně o polovinu větší ztráty v rotoru než typ druhý.

Typ rozložení	Field Calculator		Rectangular Plot
	Ztráty v jednom magnetu [W]	Ztráty v celém rotoru [W]	Ztráty v celém rotoru [W]
1	6,16	25,19	24,88
2	5,4	22,5	21,94
3	9,98	43,3	42,38

*Tab. 6.1 - Porovnání velikosti ztrát v různých typech rozložení magnetů v čase 1,2 ms*

Typ rozložení	Střední hodnota ztrát v celém průběhu [W]	Střední hodnota ztrát v ustáleném stavu [W]	Maximální hodnota ztrát v rotoru [W]
1	60,33	49,22	228,75
2	54,08	45,69	163,9
3	97,7	70,65	335,8

*Tab. 6.2 - Porovnání středních a maximálních hodnot ztrát časového průběhu*

## Závěr

Po seznámení s programem *Ansys Electronics* jsme pomocí jeho modulu *RMxpert* navrhli synchronní motor s permanentními magnety, u kterého jsme dále prováděli simulace v *Maxwell 2D*. Pro náš motor jsme zvolili samarium kobaltové magnety pro jejich větší teplotní stálost a porovnávali jsme vliv jejich rozložení na vlastnosti stroje, které jsme znázornili v tab. 5.1 – 5.3. Detailně jsme se zaměřili na vliv geometrie rotoru na velikost povrchových ztrát vířivými proudy v magnetech. U tří typů rozložení magnetů jsme pozorovali maximální ztráty v mapě Jouleových ztrát v řezu modelu, dále jsme pomocí *Field Calculatoru* vypočítali okamžitou hodnotu ztrát v objemu magnetu a celého rotoru, jehož výsledky jsme porovnali s časovým průběhem ztrát v rotoru. Výsledky *Field Calculatoru* v daném čase odpovídají grafickému znázornění ztrát. Výsledky pro všechny tři rozložení jsme uvedli do tab. 6.1 a 6.2, z kterých je patrné, že nejnižší ztráty jsou v druhém typu rozložení, kde střední hodnota je okolo 45,69 W, a nejvyšší ve třetím typu, kde střední hodnota je 70,65 W. Z hlediska ztrát v rotoru je tedy nejvhodnější 2. typ.

## Literatura

- [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] Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S., Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, IEEE Press, 2013
- [4] Manuály ANSYS RMXprt, Maxwell 3D, Techsoft-engineering 2017
- [5] KOTAL Miroslav, Petr VOŽENÍLEK, Petr NOVOTNÝ. Příklady výpočtu elektrických strojů točivých. 4. vydání. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1988
- [6] Rui Dai, Fengge Zhang, Member, IEEE, Guangwei Liu, and Ye Hao. Eddy Current Loss Analysis of High Speed Permanent Magnet Motor with Partial Shielding, IEEE PEDS 2017
- [7] Aleksandr Nagorny. High speed Permanent magnet synchronous motor/generator design for flywheel applications, National Research Council, 2005
- [8] John M. Miller. Electric Motor R&D, Oak Ridge National Laboratory, 2013
- [9] <http://www.arnoldmagnetics.com/products/recoma-samarium-cobalt-magnets/>

# Přílohy

## Příloha 1 - Designe Sheet

### BRUSHLESS PERMANENT MAGNET DC MOTOR DESIGN

File: Setup1.res

#### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW): 7.6  
Rated Voltage (V): 61  
Number of Poles: 4  
Given Rated Speed (rpm): 50000  
Frictional Loss (W): 50  
Windage Loss (W): 100  
Rotor Position: Inner  
Type of Load: Constant Power  
Type of Circuit: Y3  
Lead Angle of Trigger in Elec. Degrees: 0  
Trigger Pulse Width in Elec. Degrees: 120  
One-Transistor Voltage Drop (V): 2  
One-Diode Voltage Drop (V): 2  
Operating Temperature (C): 115  
Maximum Current for CCC (A): 200  
Minimum Current for CCC (A): 100

#### STATOR DATA

Number of Stator Slots: 24  
Outer Diameter of Stator (mm): 146  
Inner Diameter of Stator (mm): 73.5

Type of Stator Slot: 3  
Stator Slot  
hs0 (mm): 0.5  
hs1 (mm): 1.7  
hs2 (mm): 22.5  
bs0 (mm): 2.8  
bs1 (mm): 5.5  
bs2 (mm): 11.5  
rs (mm): 0.7

Top Tooth Width (mm): 4.70808  
Bottom Tooth Width (mm): 4.63309  
Skew Width (Number of Slots) 0

Length of Stator Core (mm): 18.5  
Stacking Factor of Stator Core: 0.95  
Type of Steel: DW310\_35

Designed Wedge Thickness (mm): 2.98751  
Slot Insulation Thickness (mm): 0  
Layer Insulation Thickness (mm): 0  
End Length Adjustment (mm): 0  
Number of Parallel Branches: 4  
Number of Conductors per Slot: 6  
Type of Coils: 21  
Average Coil Pitch: 7  
Number of Wires per Conductor: 13  
Wire Diameter (mm): 1.29  
Wire Wrap Thickness (mm): 0  
Slot Area (mm<sup>2</sup>): 207.545  
Net Slot Area (mm<sup>2</sup>): 191.787  
Limited Slot Fill Factor (%): 75  
Stator Slot Fill Factor (%): 67.679  
Coil Half-Turn Length (mm): 129.052

#### ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm): 2.75  
Inner Diameter (mm): 38  
Length of Rotor (mm): 18.5  
Stacking Factor of Iron Core: 1  
Type of Steel: steel\_1008  
Polar Arc Radius (mm): 34  
Mechanical Pole Embrace: 0.75  
Electrical Pole Embrace: 0.741132  
Max. Thickness of Magnet (mm): 6.9  
Width of Magnet (mm): 35.9909  
Type of Magnet: Arnold\_Magnetics\_Recoma  
Type of Rotor: 1  
Magnetic Shaft:No

#### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla): 1.0526  
Coercive Force (kA/m):501.492  
Maximum Energy Density (kJ/m<sup>3</sup>): 195.932  
Relative Recoil Permeability: 1.06861  
Demagnetized Flux Density (Tesla): 0.698347  
Recoil Residual Flux Density (Tesla): 1.0526  
Recoil Coercive Force (kA/m): 783.872

#### USER DEFINED DATA

Fractions: 1

#### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m<sup>3</sup>): 8900  
Permanent Magnet Density (kg/m<sup>3</sup>): 8300

Armature Core Steel Density (kg/m<sup>3</sup>): 7650  
Rotor Core Steel Density (kg/m<sup>3</sup>): 7872

Armature Copper Weight (kg): 2.81016  
Permanent Magnet Weight (kg): 0.152529  
Armature Core Steel Weight (kg): 1.01073  
Rotor Core Steel Weight (kg): 0.170841  
Total Net Weight (kg): 4.14426

Armature Core Steel Consumption (kg): 2.9849  
Rotor Core Steel Consumption (kg): 0.170841

#### STEADY STATE PARAMETERS

Stator Winding Factor: 0.933013  
D-Axis Reactive Inductance L<sub>ad</sub> (H): 1.29638e-006  
Q-Axis Reactive Inductance L<sub>aq</sub> (H): 1.29638e-006  
D-Axis Inductance L<sub>1</sub>+L<sub>ad</sub>(H): 3.58939e-006  
Q-Axis Inductance L<sub>1</sub>+L<sub>aq</sub>(H): 3.58939e-006  
Armature Leakage Inductance L<sub>1</sub> (H): 2.29302e-006  
Slot Leakage Inductance L<sub>s1</sub> (H): 9.44325e-007  
End Leakage Inductance L<sub>e1</sub> (H): 1.33658e-006  
Harmonic Leakage Inductance L<sub>d1</sub> (H): 1.21082e-008  
Zero-Sequence Inductance L<sub>0</sub> (H): 1.91549e-006  
Armature Phase Resistance R<sub>1</sub> (ohm): 0.000558265  
Armature Phase Resistance at 20C (ohm): 0.000406736  
D-Axis Time Constant (s): 0.00232215  
Q-Axis Time Constant (s): 0.00232215

Ideal Back-EMF Constant K<sub>E</sub> (Vs/rad): 0.00410925  
Start Torque Constant K<sub>T</sub> (Nm/A): 0.00416638  
Rated Torque Constant K<sub>T</sub> (Nm/A): 0.00995434

#### NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla): 1.52603  
Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 1.34132  
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 1.74358  
Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.508915  
Magnet Flux Density (Tesla): 0.794202

Stator-Teeth By-Pass Factor: 0.0031303  
Stator-Yoke By-Pass Factor: 2.02125e-005  
Rotor-Yoke By-Pass Factor: 2.82234e-005

Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): 47.1902  
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 9.39398  
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): 37.5433  
Air-Gap Ampere Turns (A.T): 1234.56  
Magnet Ampere Turns (A.T): -1327.75

Armature Reactive Ampere Turns



at Start Operation (A.T): 84.1494  
Leakage-Flux Factor: 1  
Correction Factor for Magnetic  
Circuit Length of Stator Yoke: 0.441846  
Correction Factor for Magnetic  
Circuit Length of Rotor Yoke: 0.32055

No-Load Speed (rpm): 57711.4  
Cogging Torque (N.m): 0.0401983

#### FULL-LOAD DATA

Note:

This motor cannot offer the given rated output power.  
The following results are of the maximum output.

Average Input Current (A): 144.608  
Root-Mean-Square Armature Current (A): 124.185  
Armature Thermal Load ( $A^2/mm^3$ ): 34.8105  
Specific Electric Loading (A/mm): 19.2054  
Armature Current Density ( $A/mm^2$ ): 1.81253  
Frictional and Windage Loss (W): 151.291  
Iron-Core Loss (W): 622.302  
Armature Copper Loss (W): 25.4144  
Transistor Loss (W): 572.859  
Diode Loss (W): 35.7136  
Total Loss (W): 1407.58  
Output Power (W): 7413.49  
Input Power (W): 8821.07  
Efficiency (%): 84.043

Rated Speed (rpm): 50183.9  
Rated Torque (N.m): 1.41069

Locked-Rotor Torque (N.m): 1.41555  
Locked-Rotor Current (A): 10.1742

#### WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 2-layer winding can be arranged in 6 slots as below:

AAZZBB

Angle per slot (elec. degrees): 30  
Phase-A axis (elec. degrees): 120  
First slot center (elec. degrees): 0

#### TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:

Number of Turns: 24  
 Parallel Branches: 4  
 Terminal Resistance (ohm): 0.000558265  
 End Leakage Inductance (H): 1.33658e-006

2D Equivalent Value:

Equivalent Model Depth (mm): 18.5  
 Equivalent Stator Stacking Factor: 0.95  
 Equivalent Rotor Stacking Factor: 1  
 Equivalent Br (Tesla): 1.0526  
 Equivalent Hc (kA/m): 783.872

## Příloha 2 – Vlastnosti elektrické oceli DW310\_35

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	
- Equiv. Cut Depth	Simple	0.001	meter
Mass Density	Simple	7650	kg/m^3
Composition		Lamination	
- Stacking Factor	Simple	0.95	
- Stacking Direction		V(3)	
Magnetostriction	Custom	Edit...	
Inverse Magnetostriction	Custom	Edit...	

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

View/Edit Modifier for:  
 Thermal Modifier

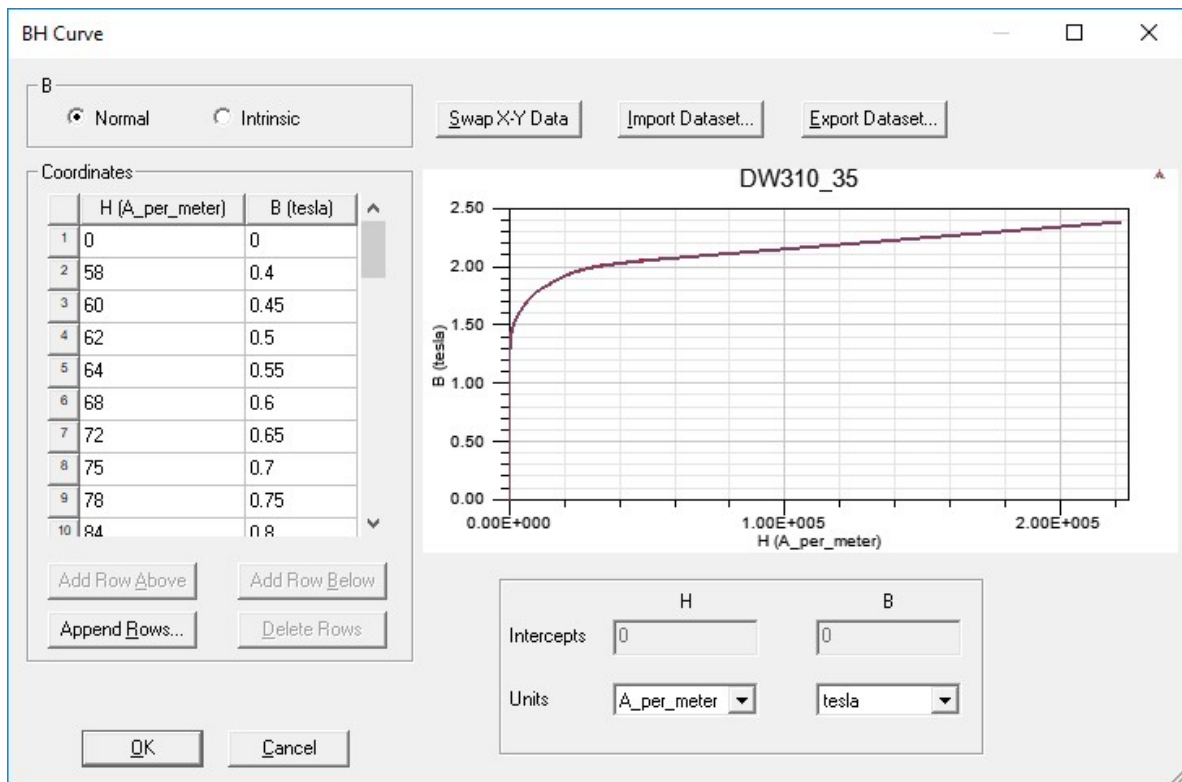
Material Appearance:  
 Use Material Appearance  
 Color:  
 Transparency:

Validate Material

Notes:

Calculate Properties for:

Reset OK Cancel



### Příloha 3 – Vlastnosti elektrické oceli Steel\_1008

View / Edit Material

Material Name: steel\_1008

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	2000000	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
Thermal Conductivity	Simple	45	W/m-C
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		None	w/m^3
Mass Density	Simple	7872	kg/m^3
Composition		Solid	
Specific Heat	Simple	481	J/kg-C
Young's Modulus	Simple	200000000000	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0.25	
Thermal Expansion Coefficient	Simple	1.26e-005	1/C
Magnetostriction	Custom	Edit...	
Inverse Magnetostriction	Custom	Edit...	
Thermal Material Type		Solid	

View/Edit Material for:

- Active Design
- Active Project
- All Properties

Physics:

- Electromagnetic
- Thermal
- Structural

View/Edit Modifier for:

- Thermal Modifier

Material Appearance:

- Use Material Appearance
- Color:
- Transparency:

Notes:

Calculate Properties for:

