

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika



Bakalářská práce

**Aplikace vývojového prostředí ANSYS pro návrh
synchronního motoru 10kW s permanentními magnety**

Vypracoval: Kryštof Topor

Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.

Rok: 2018

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

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za veškerou pomoc a rady s problematikou řešenou v této práci.

Klíčová slova

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

Key words

Synchronous motor with permanent magnets, PMSM, Ansys Electronics, Maxwell, RMxprt

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navrhnout synchronní stroj s permanentními magnety na rotoru s výkonem 10 kW, pracujícím v rozsahu otáček do 20 000 ot/min. Pro tento návrh má být použit software Ansys Electronics Desktop od společnosti Ansys. Zaměřil jsem se na moduly RMXprt, pro analytický návrh stroje a Maxwell 2D a Maxwell 3D, pro MKP simulace ve 2D resp. 3D. Zaměřuji se zejména na porovnání a omezení ztrát v železe různých materiálů pro magnetický obvod statoru.

Abstract

The main goal of this thesis is design of synchronous machine with permanent magnet on rotor with output power of 10 kW. This machine operates at speeds to 20 000 rpm. Software Ansys Electronics Desktop from Ansys is used for this design. For this purpose RMXprt, Maxwell 2D and Maxwell 3D modules are used. This thesis is mainly focused on iron core losses in stator and their limitations by usage of different materials.

Obsah

ÚVOD	8
1 ANSYS ELECTRONICS DESKTOP	9
1.1 RMaxprt	9
1.2 Výsledky v RMaxprt	11
1.3 Maxwell 2D/3D	13
2 PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE (PMSM)	16
2.1 Synchronní stroj	16
2.2 PMSM	17
3 NÁVRH STROJE	19
3.1 Obecné nastavení	19
3.2 Statorové parametry	21
3.3 Rotorové parametry	23
4 VÝBĚR MATERIÁLU MAGNETICKÉHO OBVODU STATORU	25
4.1 Ztráty v železe	25
4.2 JFE Steel	26
4.3 Měkký magnetický kompozit	26
4.4 Kobalt-železo	27
4.5 Definice materiálu v Ansys Electronics Desktop	27
4.6 Volba materiálu magnetického obvodu	31
5 VÝSLEDKY	33
5.1 Mapy polí	33
5.2 Analýza pole ztrát - Field Calculator	36
6 ZÁVĚR	38

POUŽITÁ LITERATURA	39
PŘÍLOHY	41
Příloha A – Mapy polí nastavené dle obr. 4.6, napájení DC	41
Příloha B – Design sheet RMxprt	45
Příloha C – Grafy RMxprt.....	48
Příloha D – Materiálové data Vacodur 48.....	52
Příloha E – Celkové ztráty, hysterezní ztráty, ztráty způsobené vířivými proudy všech použitých materiálů ..	55

Úvod

V této bakalářské práci se zabývám aplikací campus licence SW ANSYS pro návrh synchronního stroje s permanentními magnety na rotoru. Pro tento účel slouží moduly RMxprt, pro analytický návrh stroje a Maxwell 2D a Maxwell 3D, pro MKP simulace ve 2D resp. 3D. V první části práce se proto zabývám popisem vývojového prostředí. Dále stručně popisuji teorii synchronních strojů s permanentními magnety. Elektromagnetický návrh stroje provádím pomocí modulu RMxprt. Při volbě hlavních rozměrů vycházím z literární rešerše viz.: publikace[5]. V rámci aplikace modulu RMxprt zkoumám vliv materiálu magnetického obvodu na velikost ztrát v železe.

1 Ansys Electronics Desktop

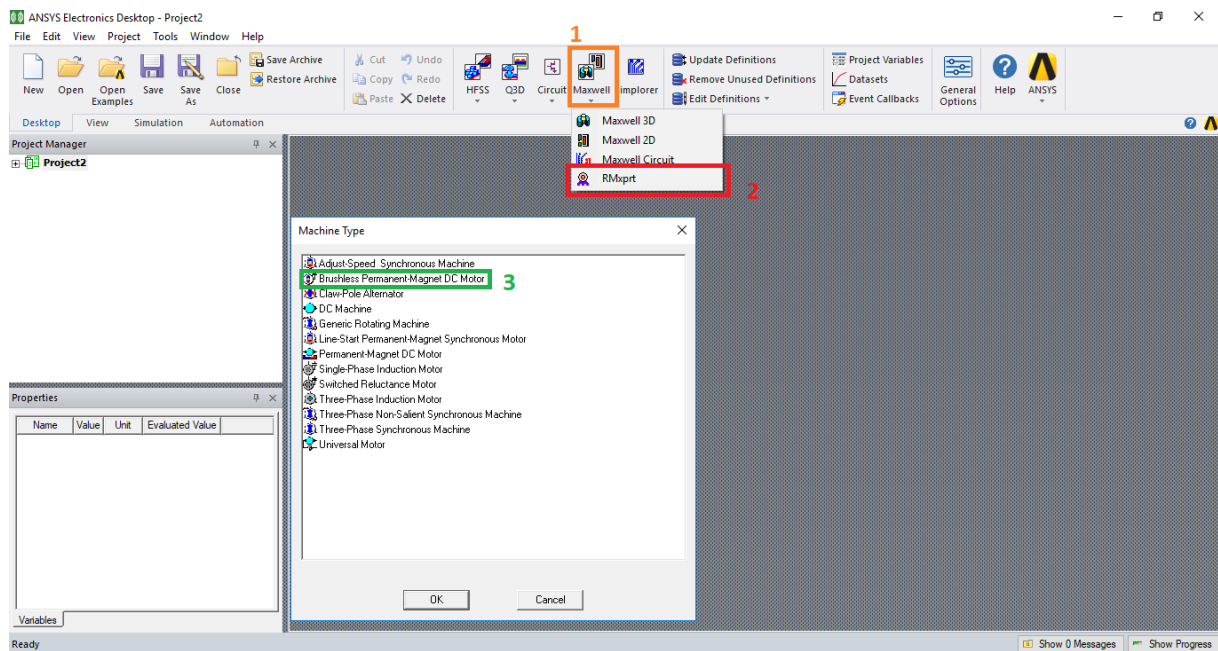
Software Ansys Electronics Suite od společnosti Ansys je velmi obsáhlý a užitečný nástroj pro návrh a simulaci nejen točivých elektrických strojů, ale celé další škály aplikací, jako jsou například simulace vysokofrekvenčních jevů v modulu HFSS, atp. Dalším velkým přínosem tohoto softwaru je možnost řešenou elektromagnetickou úlohu následně přenést do dalších sw od společnosti Ansys, jako je například Ansys Mechanical a Ansys Fluent, kde lze řešit například odvod ztrátového tepla ze stroje, resp. problematiku proudění.

V práci řeším pomocí výše uvedeného SW návrh PMSM, pro tento účel používám moduly v Electronics Suite, které jsou pro tuto nízkofrekvenční problematiku určené. Tyto moduly jsou RMXprt, Maxwell 2D, Maxwell 3D a Maxwell Circuit. Elektromagnetický návrh provádím v modulu RMXprt. RMXprt je nástroj pro analytický návrh základních druhů točivých elektrických strojů, umožňuje zároveň vygenerovat 2D popř. 3D model pro MKP simulace v modulech Maxwell 2D a Maxwell 3D. V případě PMSM je nezbytné napájení prostřednictvím PWM měniče, pro tento účel je SW vybaven modulem Maxwell Circuit, který vytvoří příslušný napájecí obvod.

1.1 RMXprt

RMXprt je dobrý nástroj na prvotní návrh točivých elektrických strojů. Umožňuje širokou škálu volby parametrů, jako jsou geometrické provedení, materiálové vlastnosti, napájení, mechanického zatížení, atp. Doba řešení je velmi krátká řádově několik sekund. Výsledkem řešení jsou základní charakteristiky stroje, ve formě tabulárně zpracovaných číselných údajů a grafických průběhů. Jedná se zejména o geometrické údaje, materiálovou spotřebu, parametry náhradního schématu a charakteristické stavy stroje (naprázdno, nakrátko a při jmenovitém zatížení). Dále se jedná o charakteristické grafické závislosti, jako je např. účinnosti jako funkce zatížení, nebo moment jako funkce otáček. Z analýzy těchto parametrů lze v několika iteracích provést návrh vyhovující zadání. Velmi cenou vlastností modulu RMXprt je skutečnost, že umožňuje automaticky vytvořit model pro simulace v MKP. Ten lze bez úprav dále řešit a podobným způsobem cestou dílčích úprav získat vyhovující řešení z hlediska sledované vlastnosti, jako je v mém případě zejména velikost ztrát.

Postup vytvoření RMxprt modelu je následovný:



Obr. 1.1 – Výběr RMxprt

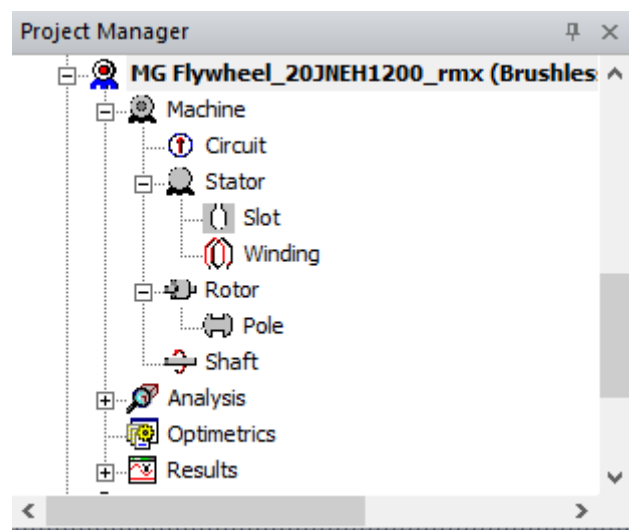
Kde:

1 – Zde je výběr nízkofrekvenčních modulů Maxwell 2D, 3D, Circuit a RMxprt.

2 – Vybereme RMxprt, po výběru se objeví tabulka Machine Type.

3 – Pro náš případ vybereme Brushless Permanent Magnet DC Motor.

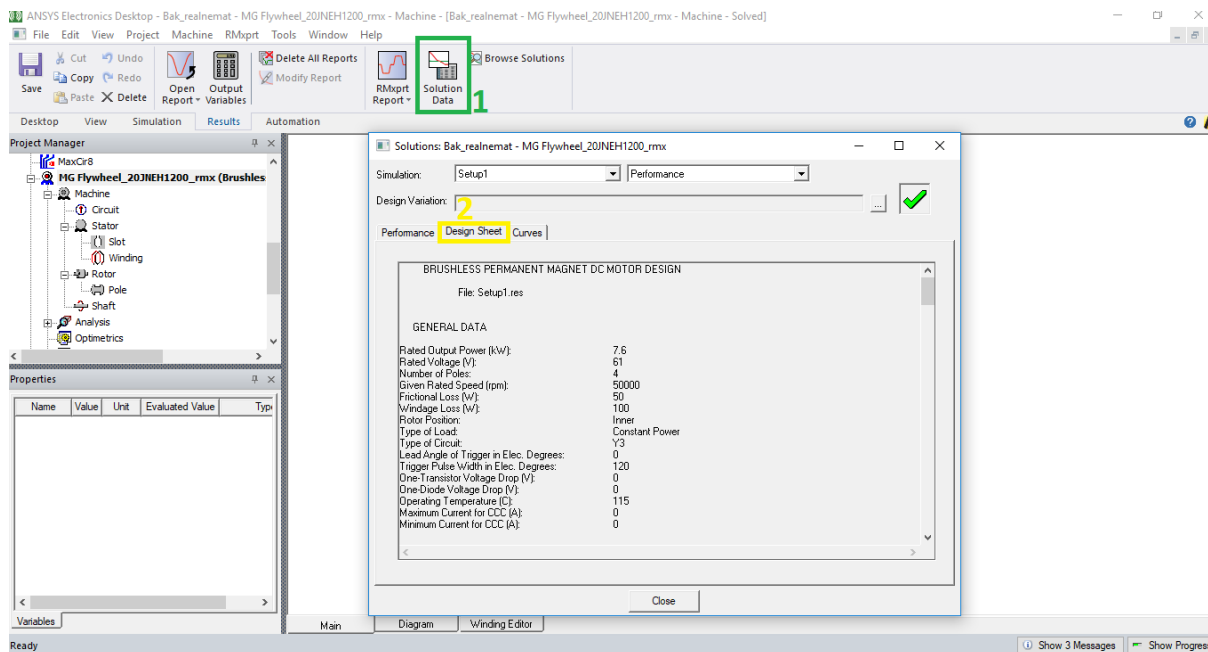
Po provedení těchto úkonů se vytvoří nová úloha v projektu, (zde MG Flywheel_20JNEH1200_rmx) viz.: Obr.1.2, ve které jsou položky s údaji k jednotlivým částem stroje.



Obr. 1.2 – Lišta s parametry stroje

1.2 Výsledky v RMXprt

Výsledkem simulace v RMXprt jsou, jak je výše uvedeno, číselné data a grafické průběhy. Ty lze editovat jednak jako textové soubory, viz.: Obr.1.3, nebo grafy viz.: Obr. 1.4. Grafické průběhy lze jednoduše sejmout do schránky a vložit do textového editoru, přičemž je možné formát jednotlivých elementů grafu rovněž upravovat. Dále jsou popsány základní možnosti.

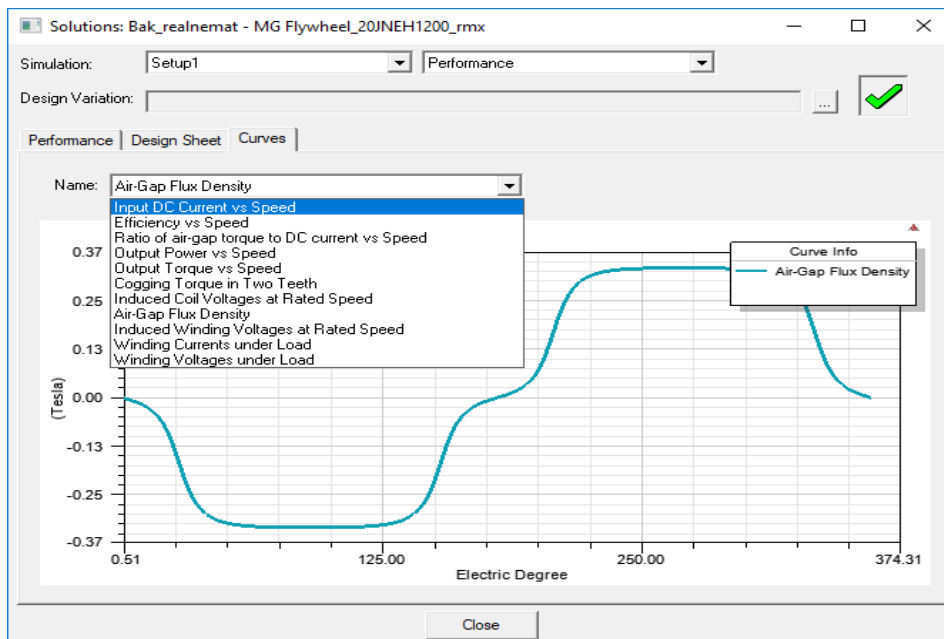


Obr. 1.3 – Výsledky simulace RMXprt

1 – Záložka Solution data, po otevření se zobrazí okno se 3 záložkami, které jsou Performance, Design Sheet, Curves.

2 – Záložka Design Sheet, v této záložce jsou číselná data pro celý návrh v RMXprt.

Grafy se nachází v záložce Curves, viz.: Obr.1.4. V této záložce se nachází pouze předvolené závislosti, které nelze změnit.

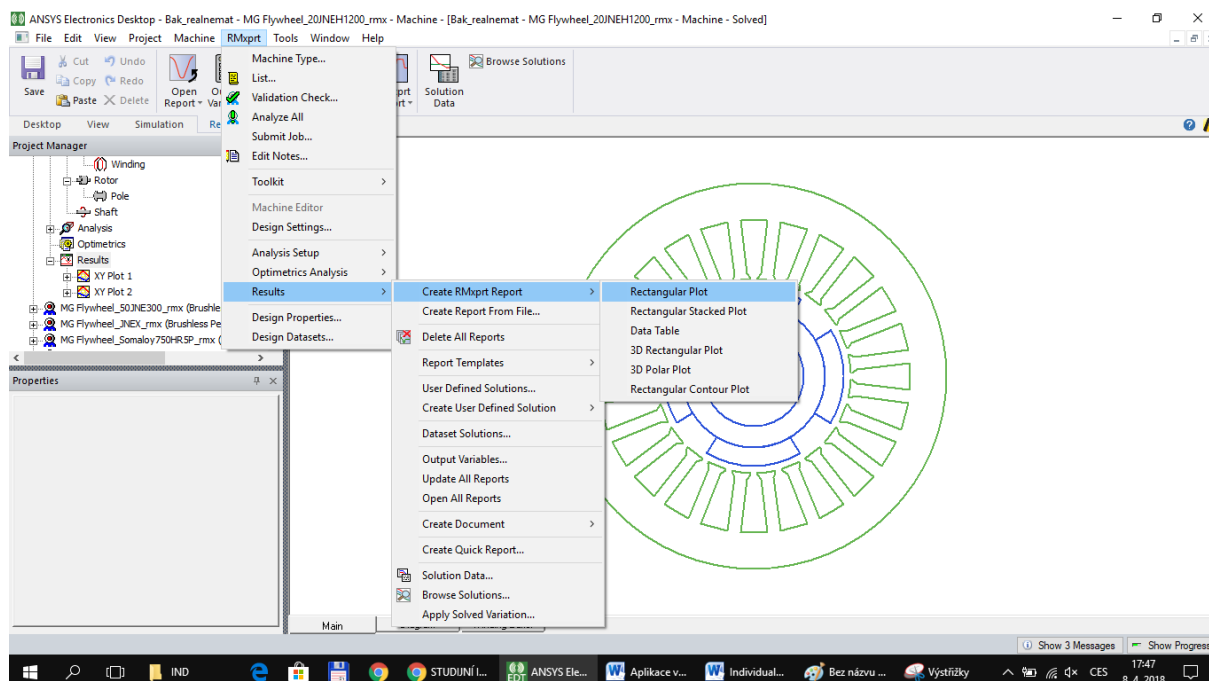


Obr. 1.4 – Výběr Curves RMxprt

Pokud je zapotřebí na základě RMxprt výpočtu zobrazit jinou závislost, je třeba přidat nový výstup, tzv. Report. Tímto způsobem lze provést volbu:

RMxprt -> Results -> Create RMxprt Report -> Rectangular Plot

Viz.: Obr. 1.5.



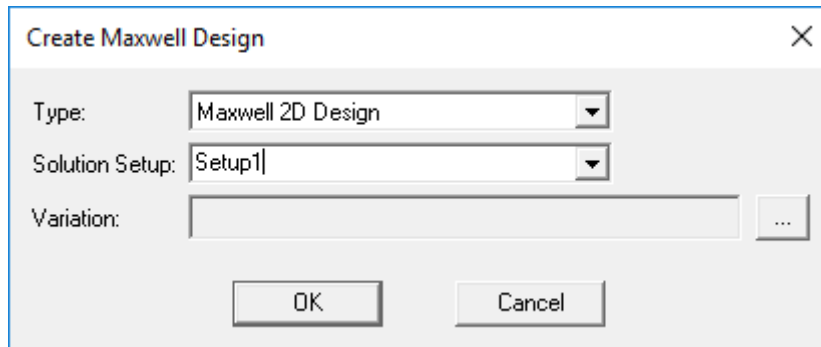
Obr. 1.5 – Tvorba libovolného grafu RMxprt

1.3 Maxwell 2D/3D

Přechod do MKP modulů Maxwell 2D/3D lze provést po úplném ukončení návrhu v RMXprt. Vytvoření modelu pro simulace v modulech Maxwell 2D/3D se provede takto:

RMXprt → Analysis Setup → Create Maxwell Design...

Viz.: Obr. 1.6.



Obr. 1.6 – Konverze RMXprt do Maxwell

Ve volbě „Type“ je možné vybrat buď dvojrozměrný, nebo trojrozměrný model, volbou „Solution Setup“ lze vybrat:

Motorový, nebo generátorový chod

Charakteristiku mechanické zátěže

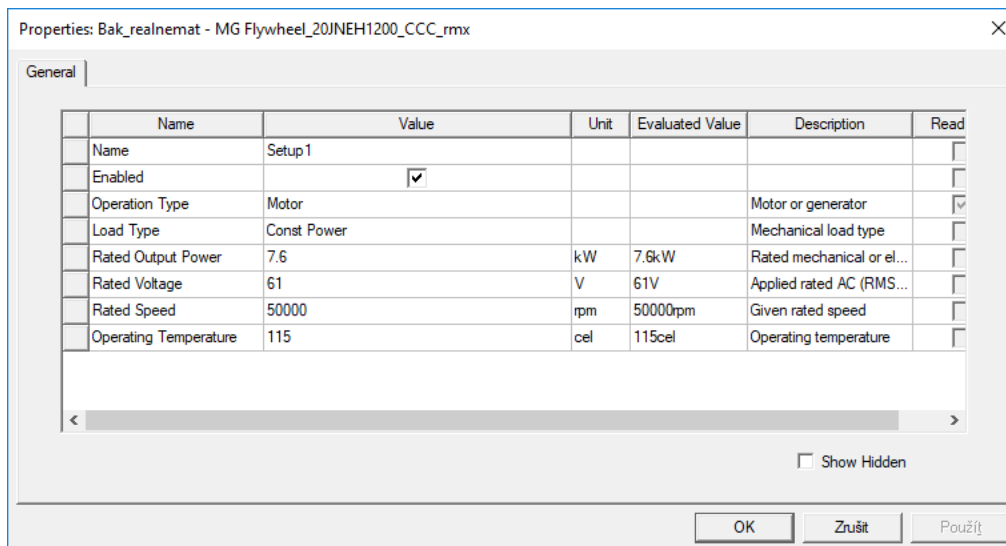
Jmenovitý výstupní výkon

Jmenovité napájecí napětí

Jmenovité otáčky

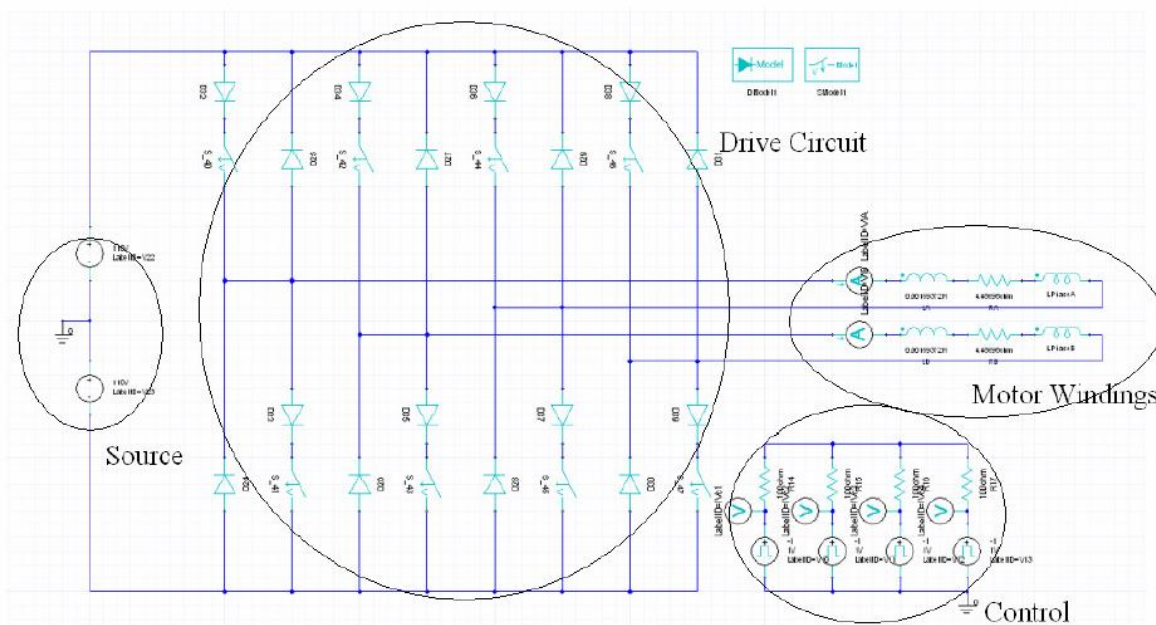
Pracovní teplotu

Viz.: Obr 1.7



Obr. 1.7 Solution setup

Součástí modelu je externí napájecí obvod (**Excitation**→ **External Circuit**), který lze editovat v programu Maxwell Circuit Editor viz.: Obr. 1.8.

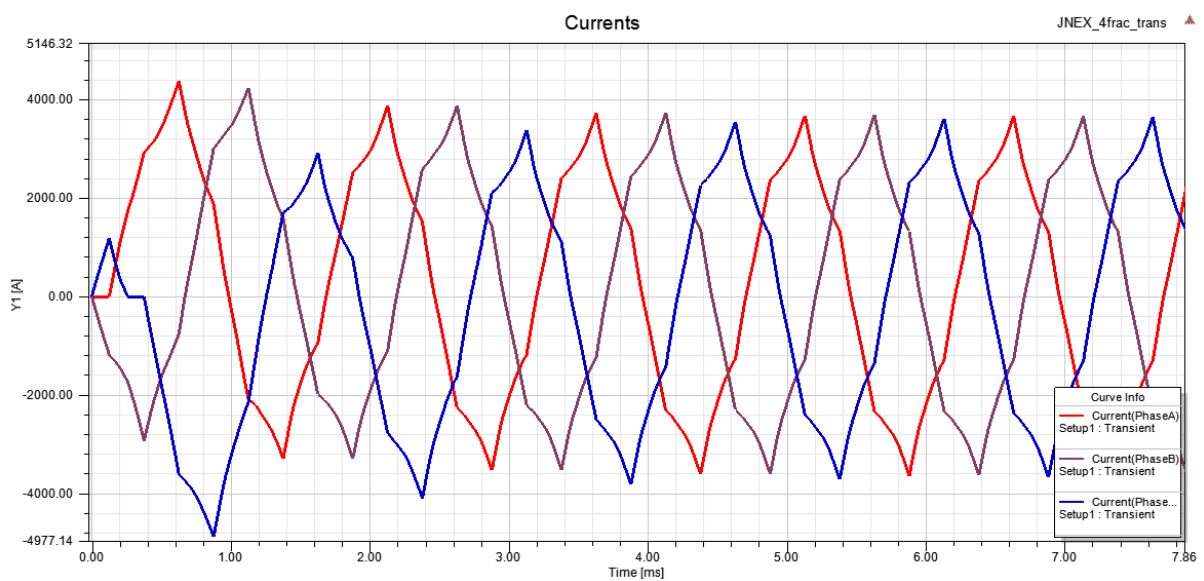


Obr. 1.8 Maxwell Circuit Editor

External Circuit zahrnuje jednak zdroj, silový obvod, řídicí obvody, modely použitých součástek a parametry přenesené z výpočtu RMxprt.

Vlastní model zahrnuje 3 typy řešičů (v originále Solver), Magnetostatic, Eddy current a Transient. Řešič Magnetostatic slouží ke statické analýze, Transient k analýze přechodných dějů a řešič Eddy current slouží ke zkoumání vlivů vířivých proudů, při buzení magnetického pole harmonickým proudem. Všechny tři řešiče používají k výpočtu metodu konečných prvků, to znamená, že numericky řeší Maxwellovy rovnice pro všechny elementy sítě (v

softwaru označené Mesh). V daném případě jsem se zaměřil na detailní výpočet velikosti jednotlivých ztrát. K tomuto účelu je vhodný transientní řešič, který umožňuje stanovit okamžité hodnoty velikosti ztrát v zadaném časovém rozsahu. Řešení této úlohy je nutné provést až po ustálení přechodného děje a hodnoty jednotlivých složek ztrátového výkonu stanovit jako střední hodnoty v několika periodách ustáleného průběhu. K tomuto účelu slouží ve složce Results položka Rectangular Plot viz.: Obr.1.9. Okamžité hodnoty ztrát lze rovněž stanovit pomocí tzv. Field Calculatoru. V tomto případě je potřeba provést integraci ztrátového výkonu ve všech elementech zkoumaného objemu, např. magnetického obvodu statoru, což představuje okamžitou hodnotu ztrátového výkonu a následně provést integraci v čase ustálení. Je ovšem nutné zvolit dostatečně malý rozsah časového řešení (start time, stop time, step time).



Obr. 1.9 – Rectangular Plot, nalezení ustáleného stavu

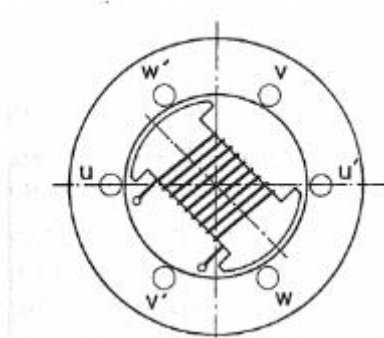
2 Permanent magnet synchronous machine (PMSM)

Pod pojmem permanent magnet synchronous machine se v technické literatuře se rozumí stroj vybavený vícefázovým vinutím na statoru, nebo rotoru a permanentními magnety na druhé části magnetického obvodu. Terminologie zatím není celosvětově ujednocená a např. pod označením BLDC lze nalézt stejně provedení strojů.

2.1 Synchronní stroj

Synchronní stroje jsou jedny ze základních typů elektrických točivých strojů. Pro klasické synchronní stroje platí, že nejčastěji jsou používány jako trojfázové generátory v elektrárnách. Jako motory se synchronní stroje používají u pohonů velkých výkonů, např. pohon velkých čerpadel, ventilátorů a kompresorů. Pro speciální provedení synchronních strojů, což je i případ mé práce, se můžeme setkat i s motory malých a středních výkonů.

Princip synchronního motoru se dá popsat na obrázku 2.1, kde na statoru je trojfázové vinutí prostorově rozloženo po 120°, které vybudí točivé magnetické pole. Na rotoru je budící vinutí (stejnoseměrně buzený elektromagnet), které je točivým magnetickým polem taženo.



Obr. 2.1 - Princip synchronního stroje [6]

Pro rychlost otáčení a moment platí následující vztahy:

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

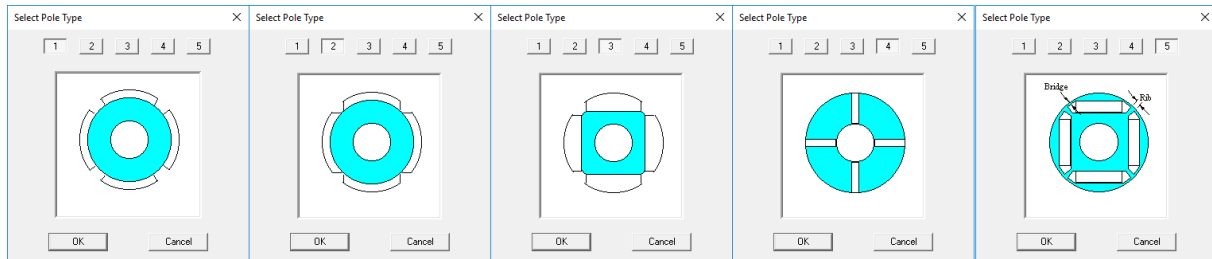
Kde:

n je rychlost otáčení [ot/min]

f je frekvence [Hz]

p_p je počet pólpárů

možno umístit na rotoru několika způsoby. Jako příklad zde uvádím topologie, které jsou možné nastavit v RMXprt.



Obr. 2.2 - Rotorové topologie

Tvar a umístění magnetu na rotoru má za následek změnu magnetické indukce B ve vzduchové mezeře. Magnety pod povrchem rotoru, tedy budou vytvářet menší B ve vzduchové mezeře. U PMSM používaném ve velkém otáčkovém rozsahu, však musíme brát v potaz i fakt, že při vysokých otáčkách na magnety působím velké odstředivé síly. V tomto případě se tedy musí magnety umístit pod povrch rotoru, nebo se musí použít zapouzdření, v anglické literatuře označované „retaining sleeve“. V [7] pro toto zapouzdření uvažují titanovou slitinu a uhlíková vlákna.

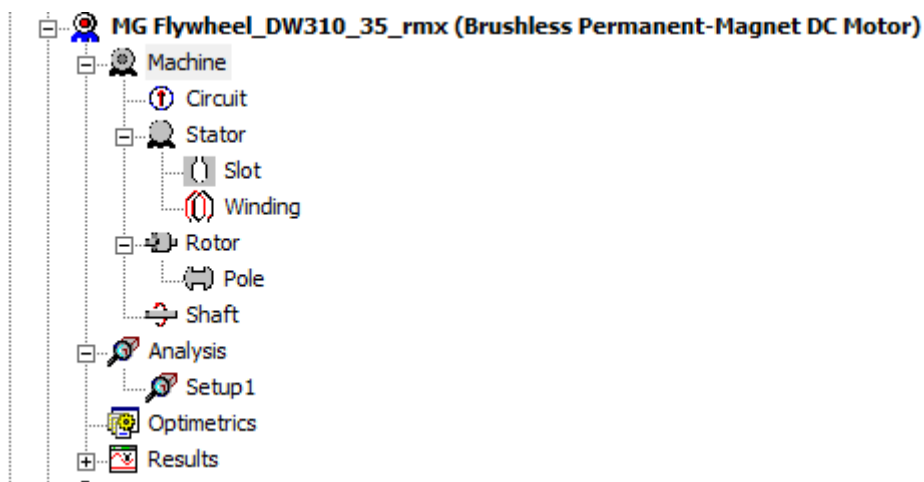
Hlavním důvodem proč použít vysokootáčkové synchronní stroje s permanentními magnety je jejich velká hustota výkonu a poměrně velká účinnost. Tyto parametry jsou vhodné pro užití v nezávislé trakci.

3 Návrh stroje

V první fázi návrhu jsem převzal parametry geometrie z publikace [5]. Nejdříve se pokusím aplikovat metodu reverse engineeringu na tento BLDC stroj, jeho jmenovité parametry jsou 7,6 kW a 50 000 ot/min. Po dosažení podobných hodnot jako známý stroj z [5], upravím tento stroj na požadované parametry.

3.1 Obecné nastavení

Po založení nového projektu a následného vytvoření nového RMXprt modelu dle podkapitoly 1.1, je nutné doplnit parametry které v [5] nejsou uvedeny. V první záložce modelu označená Machine jsou obecná nastavení motoru.



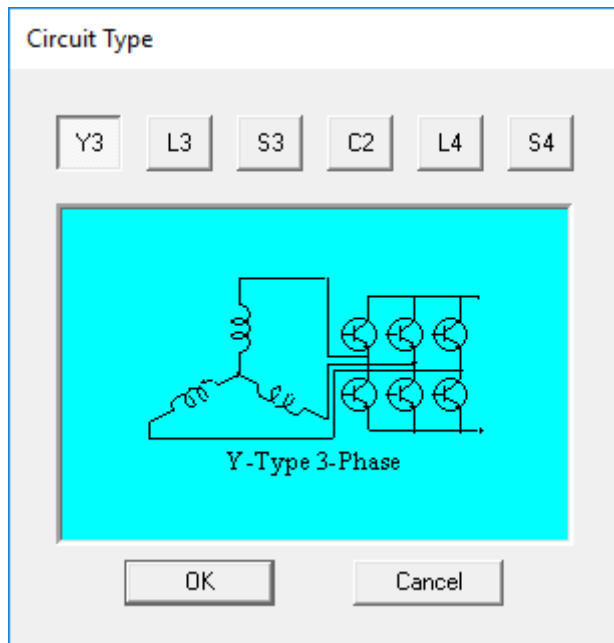
Obr. 3.1 – „Strom“ modelu

Nachází se zde následující údaje:

Name	Value	Unit	Evaluat...	Description	Read-onl
Machine Type	Brushless Permanent-Magnet DC Motor				<input checked="" type="checkbox"/>
Number of Poles	4			Number of poles of the machine	<input type="checkbox"/>
Rotor Position	Inner Rotor			Inner rotor or outer rotor	<input type="checkbox"/>
Frictional Loss	50	W	50W	The frictional loss measured at the reference speed	<input type="checkbox"/>
Windage Loss	100	W	100W	The windage loss measured at the reference speed	<input type="checkbox"/>
Reference Sp...	50000	rpm		The reference speed at which the frictional and windage losses are measured	<input type="checkbox"/>
Control Type	DC			Control Type: DC, CCC (chopped current control)	<input type="checkbox"/>
Circuit Type	Y3			Drive circuit type	<input type="checkbox"/>

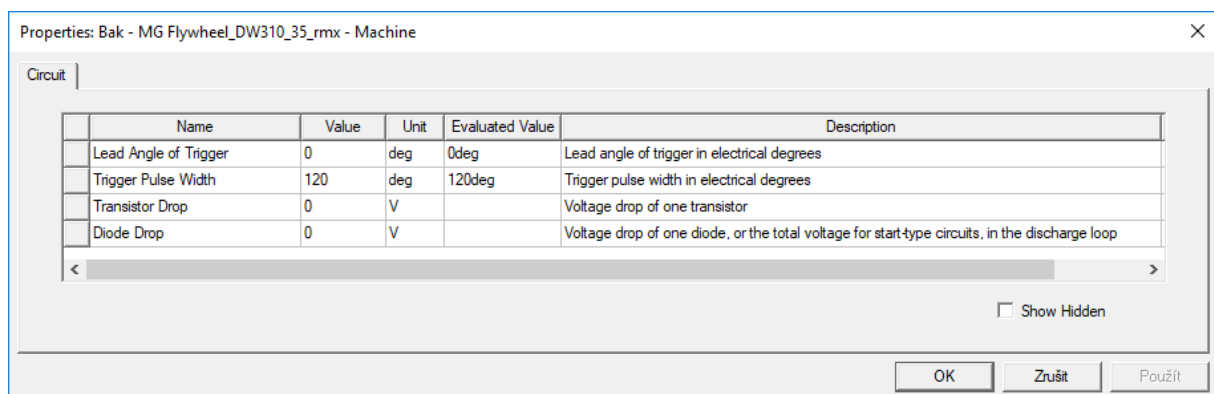
Obr. 3.2 – Machine parametry

Položky, které je třeba objasnit, jsou: „Control Type“ a „Circuit Type“. V položce „Control Type“ lze nastavit hodnoty: DC, nebo CCC. DC značí to, že motor je napájen ze zdroje bez proudového omezení. Položka CCC označuje naopak zdroj proudovým omezením. Circuit Type označuje, jak je motor zapojen, Y3 značí, že je motor spojen do hvězdy, viz.: obr. 3.3.



Obr. 3.3 - Circuit Type

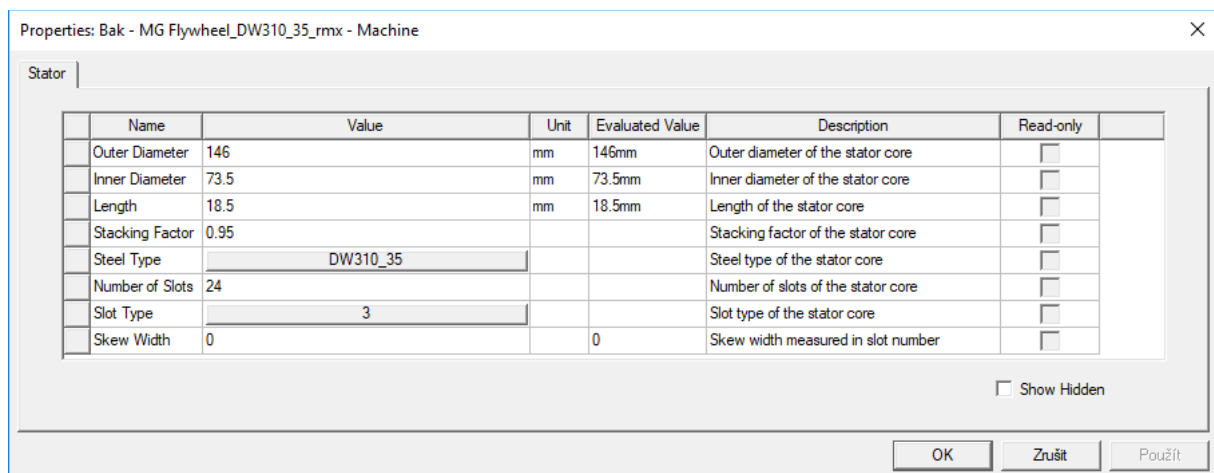
Další záložka na obr. 10 nazvaná Circuit obsahuje údaje o spínání výkonového měniče, který napájí navrhovaný motor.



Obr. 3.4 – Circuit RMxprt

Úbytky napětí na výkonových tranzistorech a diodách jsme zanedbali, protože nebereme v úvahu ztráty ve výkonovém měniči, jelikož to není cílem této bakalářské práce. Tyto ztráty mohou být ve skutečnosti vlivem protékajícího proudu podstatně vysoké, takže v reálné aplikaci by se tento aspekt neměl zanedbávat.

3.2 Statorové parametry

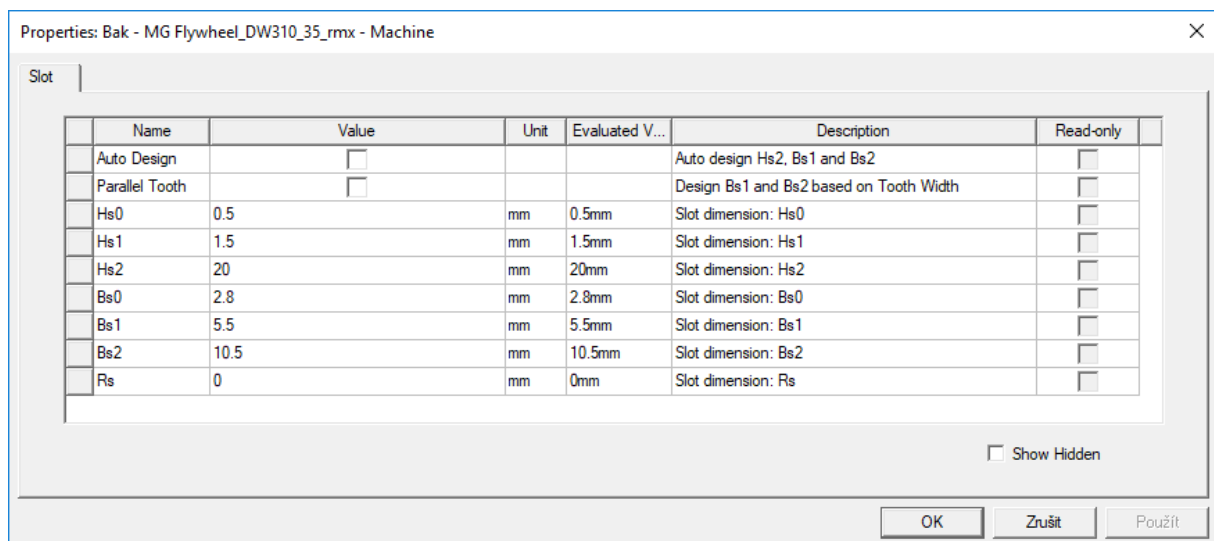


Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Outer Diameter	146	mm	146mm	Outer diameter of the stator core	<input type="checkbox"/>
Inner Diameter	73.5	mm	73.5mm	Inner diameter of the stator core	<input type="checkbox"/>
Length	18.5	mm	18.5mm	Length of the stator core	<input type="checkbox"/>
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the stator core	<input type="checkbox"/>
Steel Type	DW310_35			Steel type of the stator core	<input type="checkbox"/>
Number of Slots	24			Number of slots of the stator core	<input type="checkbox"/>
Slot Type	3			Slot type of the stator core	<input type="checkbox"/>
Skew Width	0		0	Skew width measured in slot number	<input type="checkbox"/>

Obr. 3.5 – Statorové parametry

Parametry statoru jsou vnější průměr, vnitřní průměr, délka, činitel plnění, který zohledňuje laminaci statorových plechů, typ statorového materiálu, počet drážek a šířka zešikmení. Tyto parametry dle mého názoru není nutné podrobně vysvětlovat. Materiál vybraný pro stator sloužil jako první návrh a později se budu zabývat porovnáním několika dalších materiálů.

Dalším důležitým bodem nastavení statorových parametrů je volba velikosti drážek a parametrů vinutí.

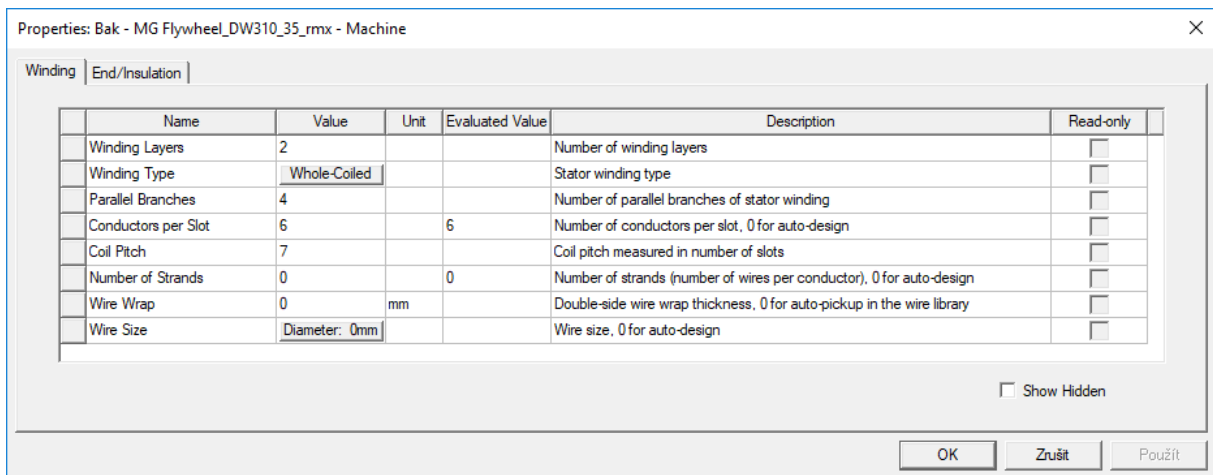


Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only
Auto Design	<input type="checkbox"/>			Auto design Hs2, Bs1 and Bs2	<input type="checkbox"/>
Parallel Tooth	<input type="checkbox"/>			Design Bs1 and Bs2 based on Tooth Width	<input type="checkbox"/>
Hs0	0.5	mm	0.5mm	Slot dimension: Hs0	<input type="checkbox"/>
Hs1	1.5	mm	1.5mm	Slot dimension: Hs1	<input type="checkbox"/>
Hs2	20	mm	20mm	Slot dimension: Hs2	<input type="checkbox"/>
Bs0	2.8	mm	2.8mm	Slot dimension: Bs0	<input type="checkbox"/>
Bs1	5.5	mm	5.5mm	Slot dimension: Bs1	<input type="checkbox"/>
Bs2	10.5	mm	10.5mm	Slot dimension: Bs2	<input type="checkbox"/>
Rs	0	mm	0mm	Slot dimension: Rs	<input type="checkbox"/>

Obr. 3.6 – Velikost drážek

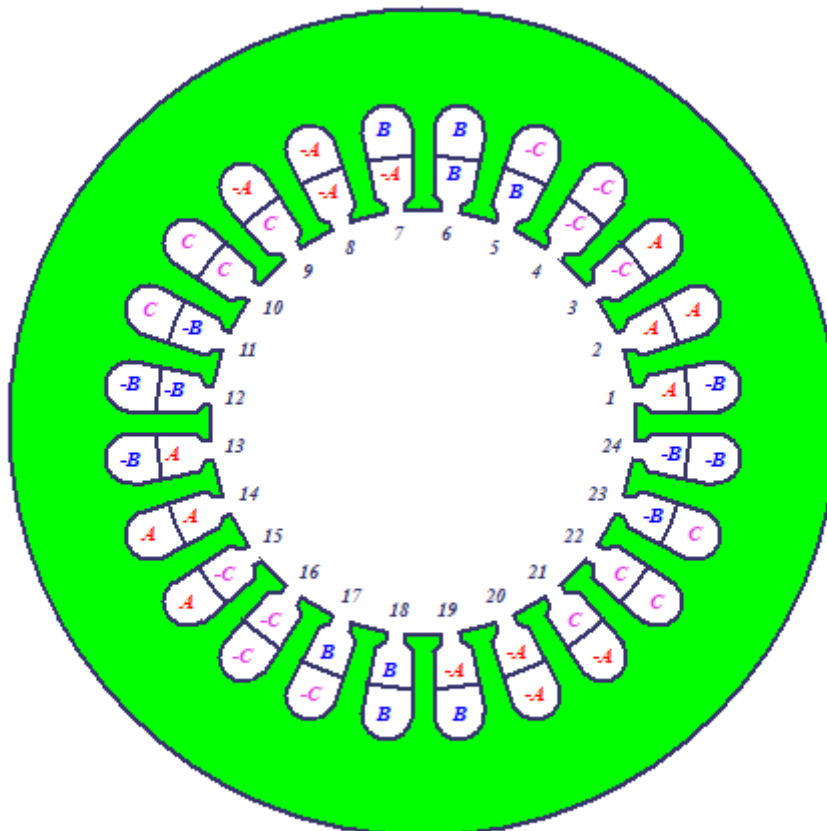
Rozměry drážek jsem odvodil podle [8], kde jsem zvolil typ drážky L a z tabulky pro tuto drážku jsem odhadl příslušné hodnoty.

Posledním nutným nastavením statoru je vinutí. Jeho parametry jsem navrhl podle [5], ačkoliv sw umožňuje provést automatický návrh. Hodnoty viz.: Obr.3.7.



Obr.3.7 – Parametry vinutí

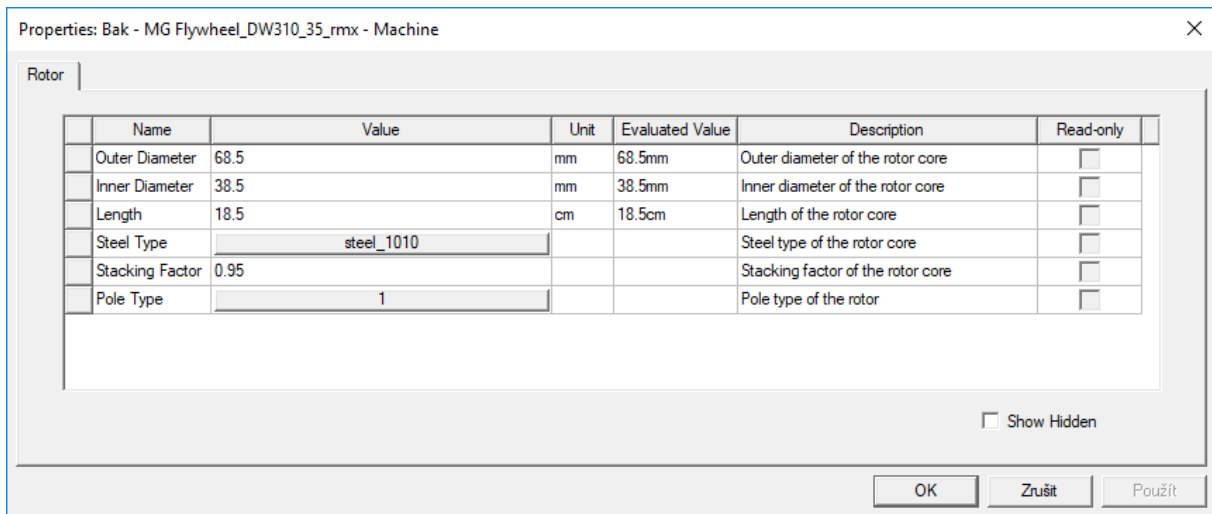
Prostorové rozložení vinutí na statoru je uvedeno na Obr.3.8 :



Obr. 3.8 – Schéma vinutí

3.3 Rotorové parametry

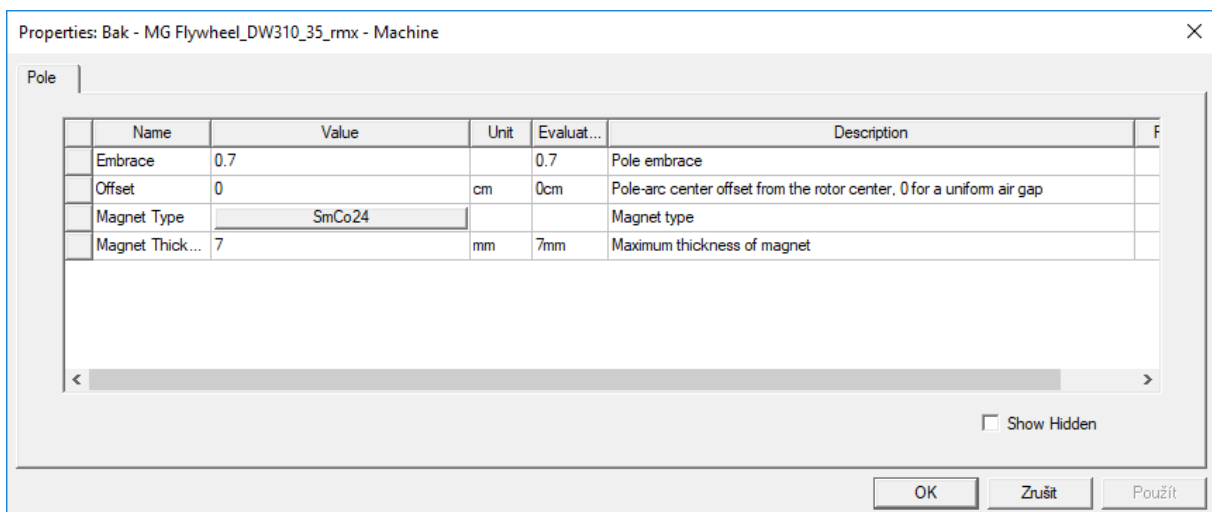
Nastavení rotorových parametrů je obdobné jako u statoru.



Obr. 3.9 – Rotorové parametry

Zde jsou parametry opět jasné, jedná se o geometrii rotoru. Vnější průměr musí být nastaven menší, než vnitřní průměr statoru, aby nedošlo k tomu, že v simulaci nevznikne vzduchová mezera. Dále zde máme nastavený jako materiál statoru ocel pod názvem steel_1010, nejsou to elektrotechnické plechy, protože předpokládáme, že rotor se točí synchronní rychlostí, proto v této oceli neuvažují vířivé proudy. Vířivé proudy budou pravděpodobně ovlivňovat pouze permanentní magnety, vlivem reakce kotvy.

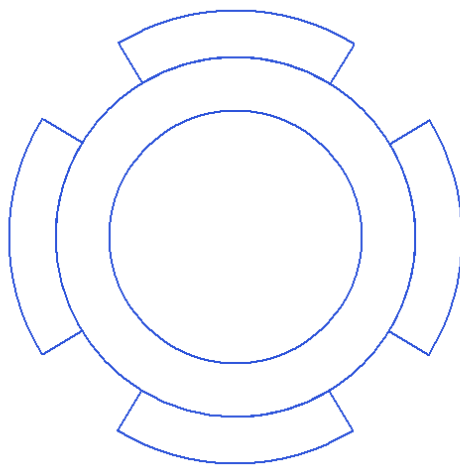
Dále je nutné nastavit pod položkou „Pole“, tj. parametry permanentních magnetů.



Obr. 3.10 – Parametry magnetu

Parametr „Embrace“ může nabývat hodnot 0 až 1, přičemž při hodnotě 1 není mezi sousedními póly žádná mezera a při hodnotě 0 permanentní magnety tvoří na rotoru

nekonečně malou část. Dále jsem vybral v prvotní fázi návrhu materiál magnetu samarium-kobalt, protože cílem simulace bylo srovnání s parametry stroje dle [5].



Obr. 3.11 – Tvar rotoru

4 Výběr materiálu magnetického obvodu statoru

Výběrem vhodného materiálu pro statorový magnetický obvod se pokusím minimalizovat ztráty v železe. Tímto přístupem nebudu už dále měnit geometrii stroje, kterou jsem popsal v kapitole 3. V této práci bych rád představil 3 druhy materiálů, plechy křemíkové oceli v několika kvalitách od firmy JFE Steel, dále perspektivní slitinu kobaltu, železa a vanadu od firmy Vacuumschmelze a jako poslední variantu měkký magnetický kompozit na bázi železných prášků od firmy Höganäs.

4.1 Ztráty v železe

Ztráty v magnetickém obvodu, „ztráty v železe“, jsou obvykle členěny na ztráty hysterezní, úměrné ploše hysterezní smyčky, ztráty způsobené vířivými proudy a ztráty dodatečné viz.: (5). V praxi se velikost měrných ztrát zjišťuje standardní metodou měřením na Epsteinově přístroji. Jednotlivé složky ztrát je třeba z těchto měření odvodit.

Ztráty v železe:

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e \quad (5)$$

kde:

P_{Fe} jsou celkové ztráty v železe [W]

P_h jsou hysterezní ztráty [W]

P_c jsou ztráty způsobené vířivými proudy [W]

P_e jsou dodatečné (v anglické literatuře excessive, nebo anomalous) ztráty [W]

Vztah (5) lze, obecně popsat pomocí Steinmetzových koeficientů [9].

$$w_{Fe} = k_h(f) f B^{\alpha(f,B)} + k_c(f, B) f^2 B^2 + k_e(f, B) f^{1.5} B^{1.5} \quad (6)$$

kde:

w_{Fe} jsou celkové ztráty v železe vztahované na jednotku hmotnosti [W/kg]

f je frekvence [Hz]

B je magnetická indukce [T]

k_h je koeficient hysterezní ztrát [-]

k_c je koeficient ztrát způsobených vířivými proudy [-]

k_e je koeficient přídavných ztrát [-]

α je exponent indukce pro hysterezní ztráty [-]

Koeficienty k_h , k_c a k_e a exponent α jsou však závislé na velikosti kmitočtu a nasycení a rovnice (6)

V simulacích RMxprt, resp. MKP je používán pro stanovení ztrát v magnetických obvodech model „CAL2“ viz.: [9], kde je exponent α ve vztahu pro hysterezní ztráty roven 2. Takto zjednodušený vztah je uveden v (7):

$$w_{Fe} = k_h f B^2 + k_c f^2 B^2 + k_e f^{1.5} B^{1.5} \quad (7)$$

V praxi výrobci elektrotechnické oceli obvykle poskytují pouze závislosti měrných ztrát w_{Fe} na nasycení magnetického obvodu B pro daný kmitočet sítě f . Pro stanovení výše uváděných koeficientů je však potřeba získat závislosti ztrát na nasycení pro různé kmitočty. Způsob jak z dat dodávaných výrobcem materiálu získat jednotlivé koeficienty je uveden v [9] a [10] a je v Ansys Electronics aplikován jak v RMxprt, tak v MKP simulacích. Způsob získání Steinmetzových koeficientů z tabulárně zadaných hodnot (f , B) je uveden v podkapitole 4.5.

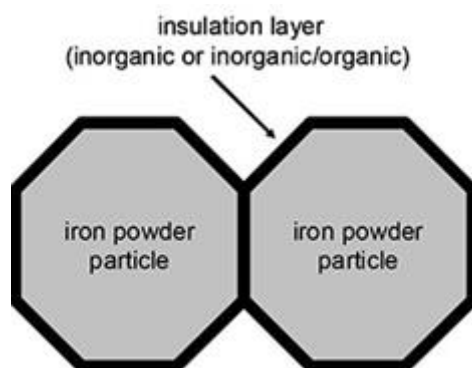
4.2 JFE Steel

Jednou ze zkoumaných skupin materiálů jsou klasické křemíkové plechy. Zvolil jsem plechy od firmy JFE Steel, jelikož nabízí množství dat ke svým produktům a dále také proto, že je v Ansys Electronics Desktop verze 19.0 knihovna s těmito plechy. Kromě toho volba těchto plechů přináší možnost kontroly dat z knihovny Ansys s údaji dostupnými na webových stránkách JFE Steel [13]. Zabýval jsem se těmito možnostmi:

- 10JNEX900 – tyto plechy firma JFE řadí do skupiny Super Cores, tyto plechy mají vysokou saturaci magnetické indukce a malé měrné ztráty na velkém rozsahu frekvencí, jedná se o neorientované plechy, tloušťka plechu je 0,1 mm
- 20JNEH1200 – tyto plechy se vyznačují malými měrnými ztrátami na velkém rozsahu frekvencí, jsou to neorientované plechy, tloušťka plechu je 0,2 mm
- 50JNE300 – tyto plechy mají nízké měrné ztráty, avšak ne na velkém rozsahu frekvencí jako JNEH, tloušťka plechu je 0,5mm, neorientované plechy

4.3 Měkký magnetický kompozit

Jedním z perspektivních materiálů pro výrobu magnetického obvodu elektrických strojů jsou měkké magnetické kompozity (dále SMC, z anglického Soft-magnetic composite). SMC jsou materiály na bázi částic železných prášků, které jsou od sebe elektricky izolované. Tímto se dosahuje toho, že elektrická vodivost toho materiálu klesne o několik řádů a tím se výrazně omezí vliv vířivých proudů na ztráty v železe.



Obr. 4.1 – Princip SMC

Pro mou práci jsem zvolil SMC od firmy Höganäs, konkrétně materiál Somaloy 700HR 5P, kvůli jeho malým měrným ztrátám ve srovnání s ostatními Somaloy produkty [14].

Hlavními přínosem použití měkkých magnetických kompozitů jsou snížení hmotnosti a velikosti stroje. Dále toto provedení stroje umožňuje minimalizovat ztráty způsobené vířivými proudy, které u klasických křemíkových plechů tvoří při vysokých frekvencích dominantní část celkových ztrát v železe.

4.4 Kobalt-železo

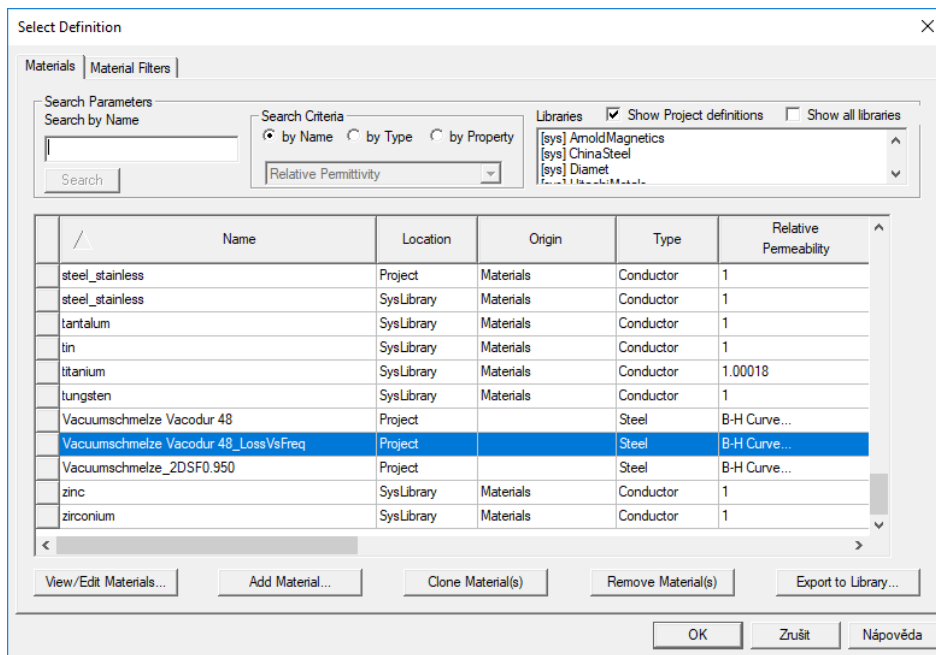
Dalším velmi zajímavým materiálem pro laminaci mg. obvod statoru je slitina kobaltu a železa. Tento materiál má dle [11] velmi vysokou hodnotu saturace (okolo 2,3 T) a měrné ztráty srovnatelné s nejlepšími plechy z křemíkové oceli. Nejčastěji je používán v aplikacích, kde je požadována vysoká hustota výkonu.

Pro svou práci jsem zvolil materiál Vacodur 48 od firmy Vacuumschmelze, která mi poskytla B-H křivky a křivky měrných ztrát pro frekvence v rozsahu 50-5000 Hz a magnetické indukce v rozsahu 0,5-2T pro plech tloušťky 0,35mm. Z těchto dat jsem následně vypočetl Steinmetzovy koeficienty dle podkapitoly 4.1 a poté jsme tento materiál zkoumali v RMxprt a Maxwell 2D.

4.5 Definice materiálu v Ansys Electronics Desktop

Pro materiál Somaloy 700HR 5P a Vacodur 48 jsem byl nucen definovat v sw Ansys nový materiál, protože na rozdíl od plechů JNEX, JNEH a JNE nebyly uvedené v přednastavených knihovnách.

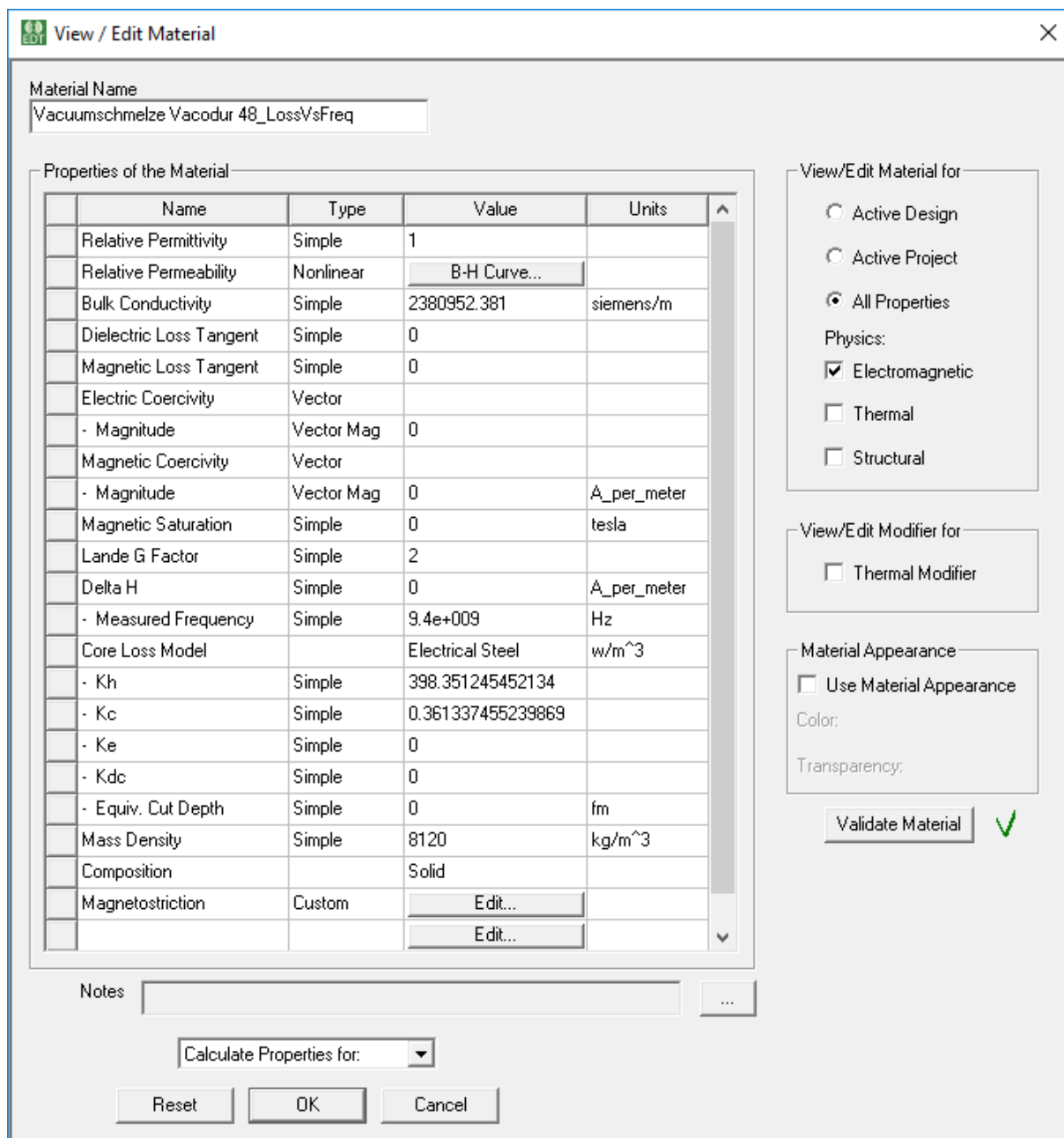
Nastavení materiálových parametrů je dostupné v záložce Steel type viz.: Obr. 3.5 – Statorové parametry.



Obr. 4.2 – Okno s výběrem materiálu

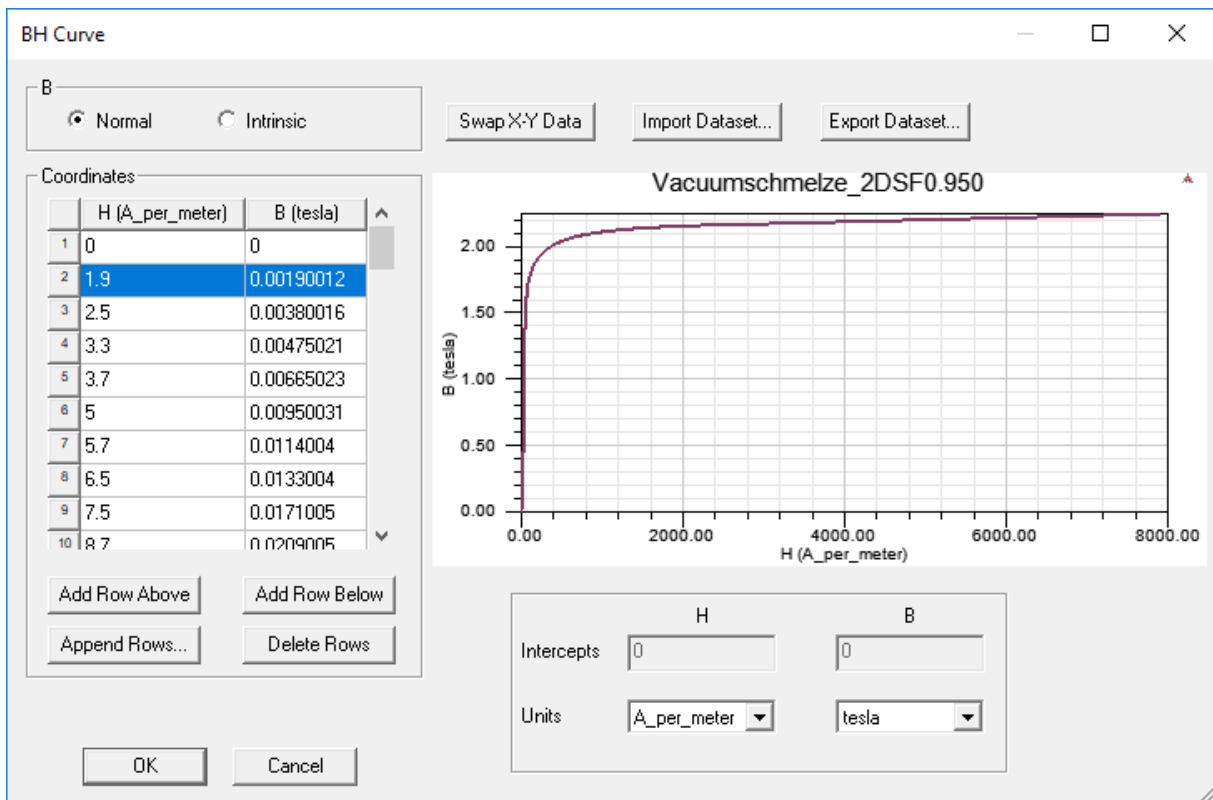
V tomto okně jsou důležité následující položky:

- Karta *Libraries*, ve které se nachází knihovny s materiály, zde je obsažena i knihovna pro materiály od firmy JFE Steel.
- Položka *View/Edit Materials...* v levém dolním rohu, která otevře vybraný materiál a umožní nahlédnout na jednotlivé údaje, nebo je popřípadě změnit.
- Položka *Add Material...*, tato položka umožní definovat nový materiál, v daném případě Somaloy 700HR 5P a Vacodur 48.



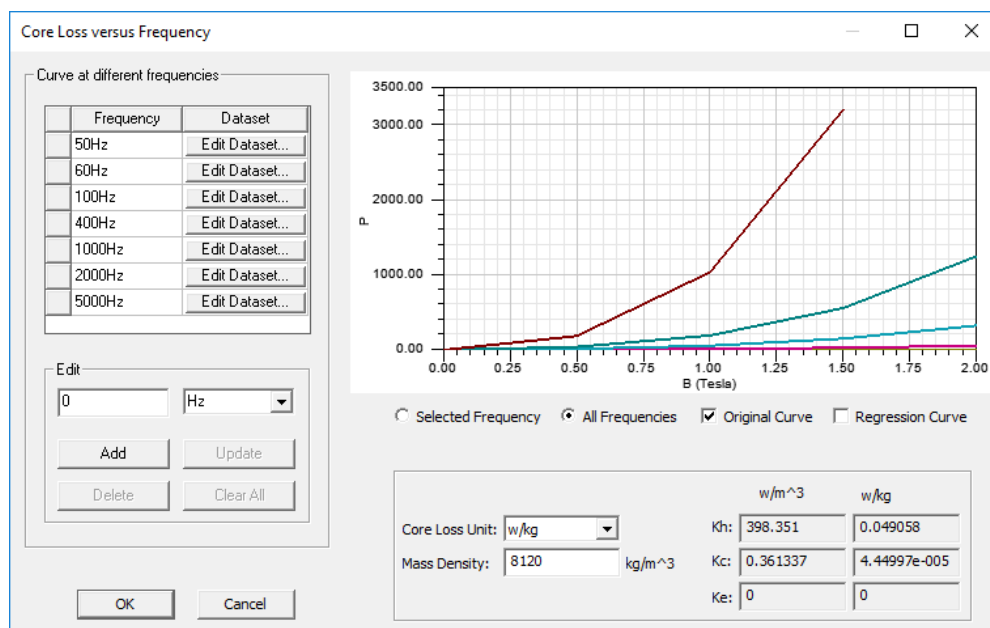
Obr. 4.3 – Materiálové parametry, Vacodur 48

Při editaci nově vytvořeného materiálu je nutné vyplnit jeho parametry viz.: Obr. 4.3. V mém případě to tedy znamenalo zadat všechny známe vlastnosti, jako měrná vodivost, měrná hustota, atp. Dále je nutné změnit řádek „Relative permeability“ **Simple -> Nonlinear**. Po provedení této změny se změní údaj ve sloupci „Value“ na „B-H Curve“. Po otevření „B-H Curve“ musíme následně vyplnit tabulku „Coordinates“ B-H křivky:



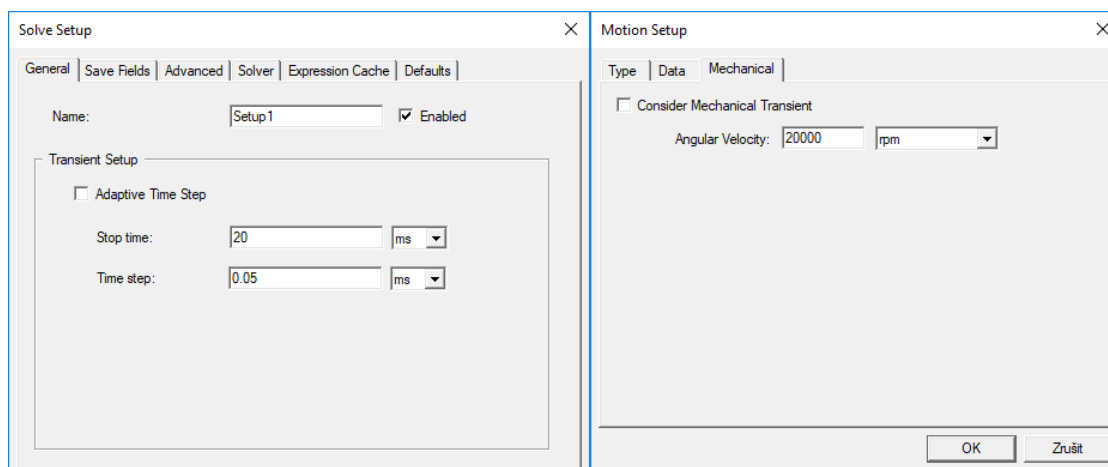
Obr. 4.4 – Parametry BH křivky, Vacodur 48

Poté je nutno změnit hodnotu řádku „Core Loss Model” z **None** -> **Electrical Steel**. Poté musíme vyplnit Steinmetzovy koeficienty, pokud je známe, nebo je popřípadě určíme viz.: podkapitola 4.1. Pokud koeficienty přímo nemáme k dispozici, ale jsou známy hodnoty měrných ztrát v závislosti na frekvenci a magnetické indukci, je možné zadat tyto hodnoty a koeficienty dopočítat. Tato možnost je pod záložkou „**Calculate properties for:**” viz.: Obr. 4.3. Nejprve zvolíme funkci „**Calculate loss versus Frequency**”, výsledek procesu viz.: Obr. 4.5.



4.6 Volba materiálu magnetického obvodu

V této podkapitole se zabývám posouzením velikosti ztrát materiálů uvedených v kapitole 4. Srovnání je provedeno na základě simulací v modulu Maxwell 2D(solver Transient). Protože mým cílem byl odhad mezní velikosti ztrát, volil jsem ustálenou rychlost otáčení 20 000 ot/min. Takto vlastně simuluji stav, kdy v čase 0 je na statorové vinutí stroje připojen zdroj (PWM měnič) pracující s kmitočtem odpovídajícím rychlosti rotoru 20 000 ot/min. Po odeznění elektromagnetického přechodového děje, tedy bude motor pracovat při konstantních otáčkách a s konstantním zatížením. Délku simulace jsem zvolil 20 ms s časovým krokem 0.05 ms. Frekvence zdroje činí 667 Hz, vycházím ze vztahu (1) a nastavených parametrů, počet pólpárů stroje je 2 a synchronní rychlost 20000 ot/min. Doba periody je tedy 1,5ms, v jedné periodě je tedy provedeno 30 výpočetních operací. Časový krok vzhledem k frekvenci zdroje je tedy dostatečně malý.



Obr. 4.6 – Nastavení řešiče Transient

Po vypočtení takto nastavené simulace porovnám střední hodnotu ztrát v železe, kterou jsem vynesl, jako funkci okamžitých hodnot v čase („Rectangular Plot“). Střední hodnotu počítám až v ustáleném stavu, v mém případě jsem vzal hodnoty mezi 10 – 20 ms.

Material Type	Somaloy 750HR 5P	50JNE300	10JNEX900	20JNEH1200	Vacodur 48
PFe [W]	282.7	308	69.8	136.3	262,8/265,7*

Tab. 1 – Porovnání střední hodnoty ztrát při napájení DC

Material Type	Somaloy 750HR 5P	50JNE300	10JNEX900	20JNEH1200	Vacodur 48
PFe [W]	67.1	115.5	17.2	43.1	106.4

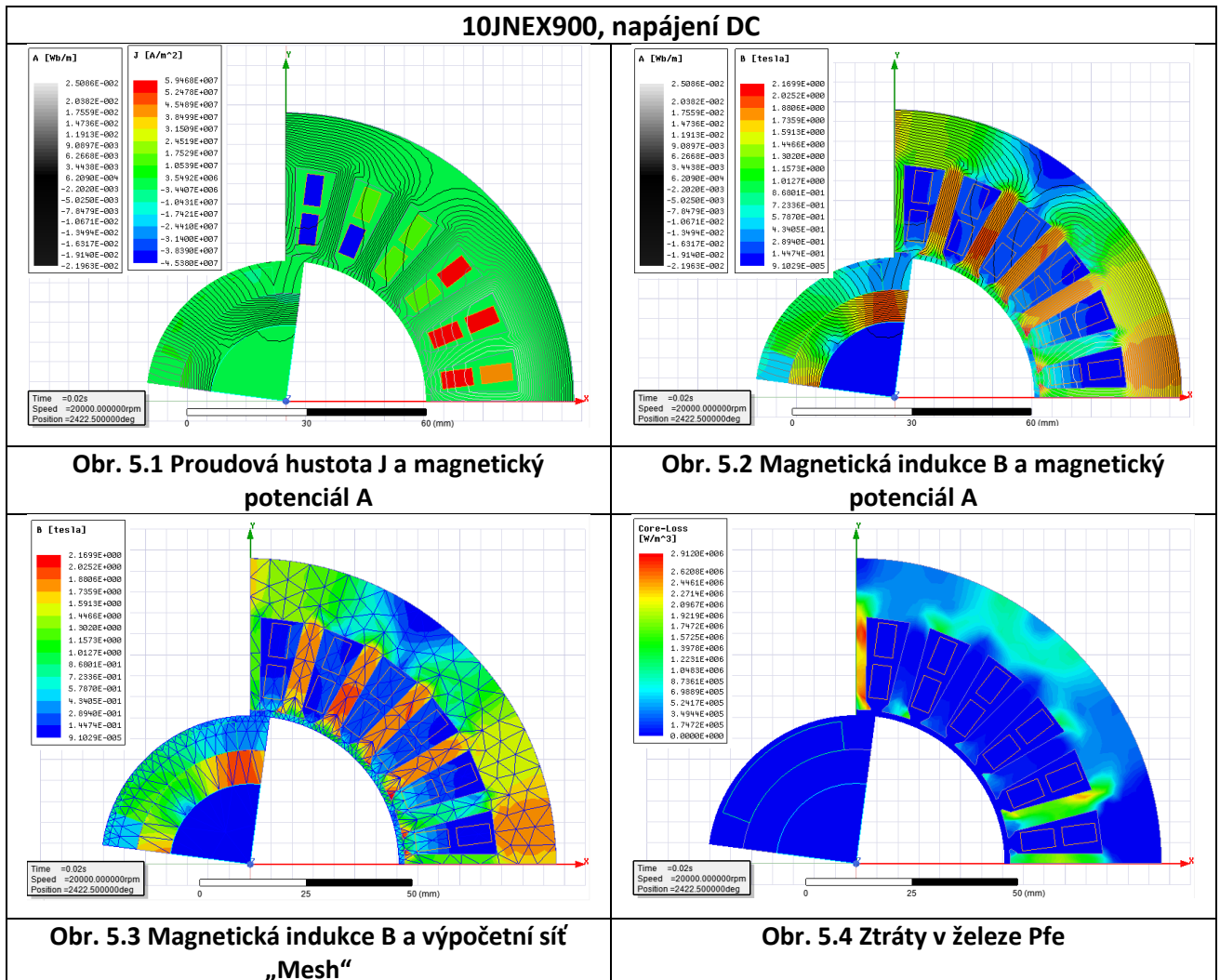
Tab. 2 – Porovnání střední hodnoty ztrát při napájení CCC ($I_{\max}=250\text{A}$, $I_{\min}=100\text{A}$)

**v definici materiálu byly použity koeficienty vypočtené pomocí metodiky dle podkapitoly 4.1*

5 Výsledky

V této kapitole jsou uvedeny a popsány mapy polí jednotlivých charakteristických veličin. Pomocí funkce *Field Calculator* jsou vypočteny hodnoty ztrát v železe, které jsou porovnány s hodnotami vyneseny v grafu $P_{fe}=f(t)$. Ten je vytvořen pomocí výše zmíněné funkce *Rectangular Plot*. V kapitole 5.1 je jako příklad tohoto postupu zvolena simulace s materiálem 10JNEX900. Tento materiál považuji za nejvhodnější ze všech posuzovaných variant viz.: tab. 1 a tab. 2. Ostatní materiály jsou uvedeny v Příloze A.

5.1 Mapy polí



Mapy polí na obrázcích 5.1 a 5.2 odpovídají teorii elektromagnetického pole. Na obr. 5.1 se siločáry magnetického pole uzavírají okolo cívek, které v tom daném okamžiku protéká proud. Na obr. 5.2 je znázorněna magnetická indukce, ta dosahuje největších hodnot v místech, kde je největší hustota siločar. Na obr. 5.3 je zobrazena magnetická indukce a výpočetní síť, toto zobrazení zde ilustruje fakt, proč má rozložení magnetické indukce B určitá „horká místa“. Můžeme si povšimnout, že většinou se tato horká místa nacházejí na přechodech mezi jednotlivými elementy sítě. V těchto místech by bylo vhodné nastavit větší

hustotu sítě, ta je však v řešiči Transient stejná v celém rozsahu časového řešení., Tento problém jde řešit zvětšením parametru „Residuum“ v nastavení řešiče, to by zpřesnilo výsledky, avšak také by to zvětšilo výpočetní čas. Obr. 5.4 na první pohled neodpovídá výpočtu pomocí matematického modelu ztrát v magnetickém obvodu, popsaném v podkapitole 4.1. Očekávali bychom, že dle rovnice (7) budou ztráty největší v místech, kde je největší hodnota magnetické indukce. Výpočet respektuje skutečnost, že velikost ztrát v železe je závislá na časové změně indukce, metodika je podrobně popsána v literatuře [12]. To znamená, že v modulu Maxwell 2D/3D se užívá pro výpočet ztrát metoda časové změny indukce dB/dt , pro které platí následující sada rovnic:

$$p_h(t) = H_{irr} \frac{dB}{dt} \quad (8)$$

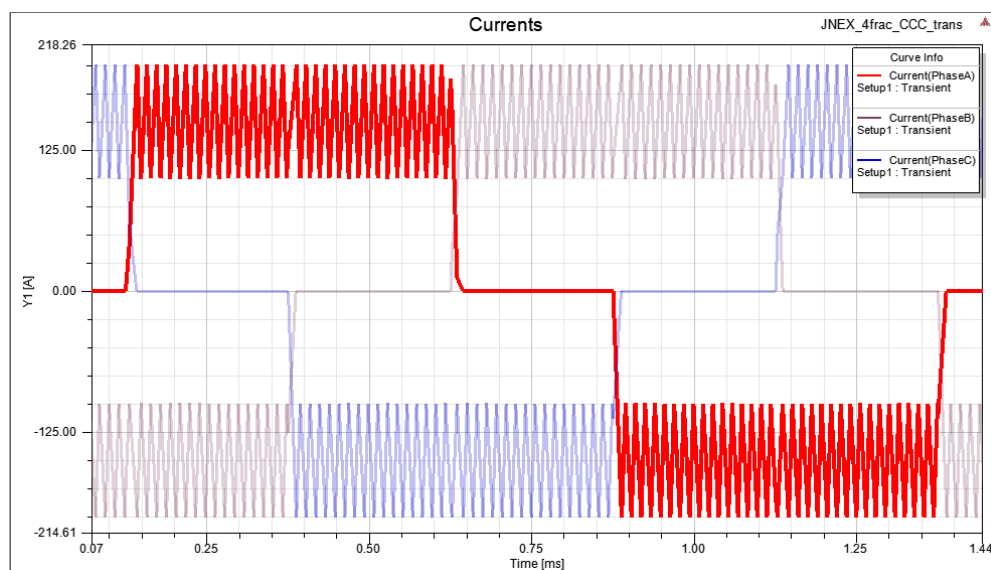
kde:

$$H_{irr} = \frac{1}{\pi} k_h \cdot B_m \cos(\theta) \quad (8)$$

$$p_c(t) = \frac{1}{2\pi^2} k_c \cdot \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 \quad (9)$$

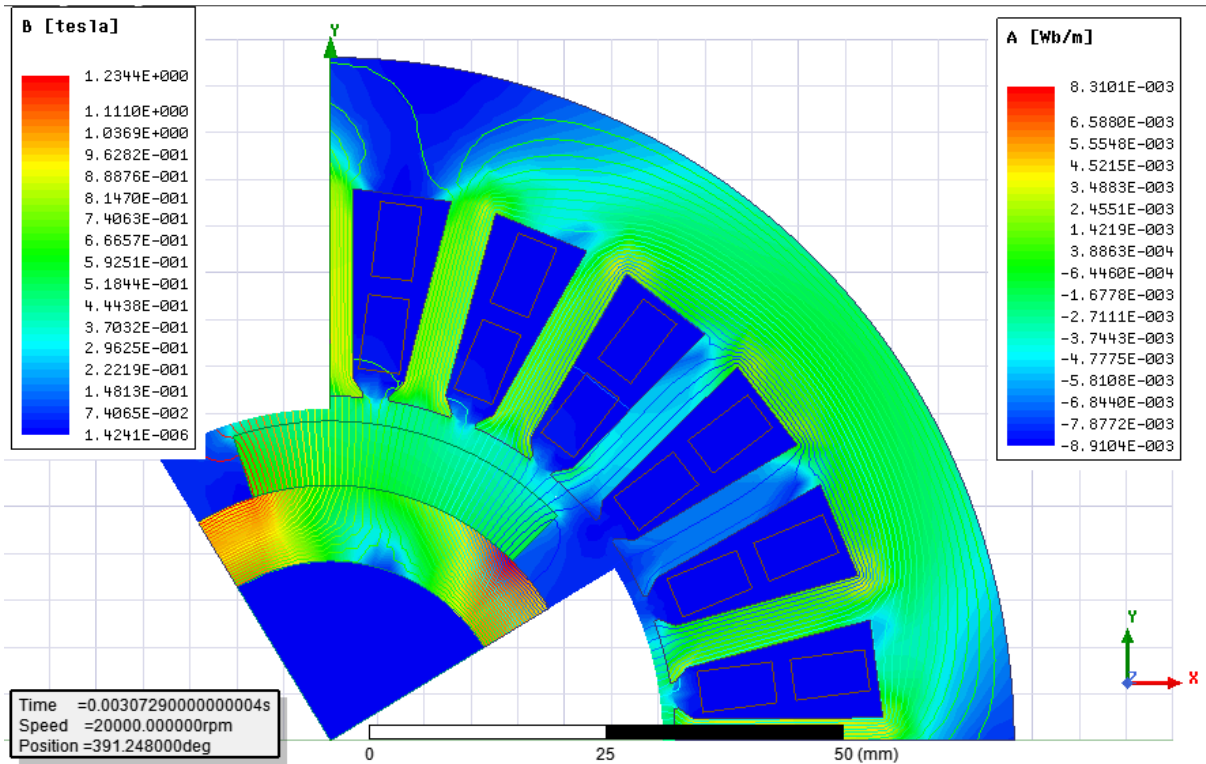
$$p_e = \frac{1}{C_e} \cdot k_e \cdot \left|\frac{dB}{dt}\right|^{1.5} \quad (10)$$

Na obrázcích 5.6-5.8 je zobrazen stav, kdy je motor napájen PWM měničem bez proudového omezení. To má za následek, že protékající proud v jedné fázi vinutí dosahuje maximálních hodnot 4 kA. Pokud by tento stav nastal v reálném provozu, s největší pravděpodobností by došlo ke zničení stroje, v lepším případě vybavení ochran. Proto jsem dále doplnil simulace, které používají tzv. CCC řízení (viz.: podkapitola 3.1). Proudové omezení jsem volil v modulu **RMxprt** → **Machine** → **Circuit** : $I_{max}=250A$, $I_{min}=100A$.

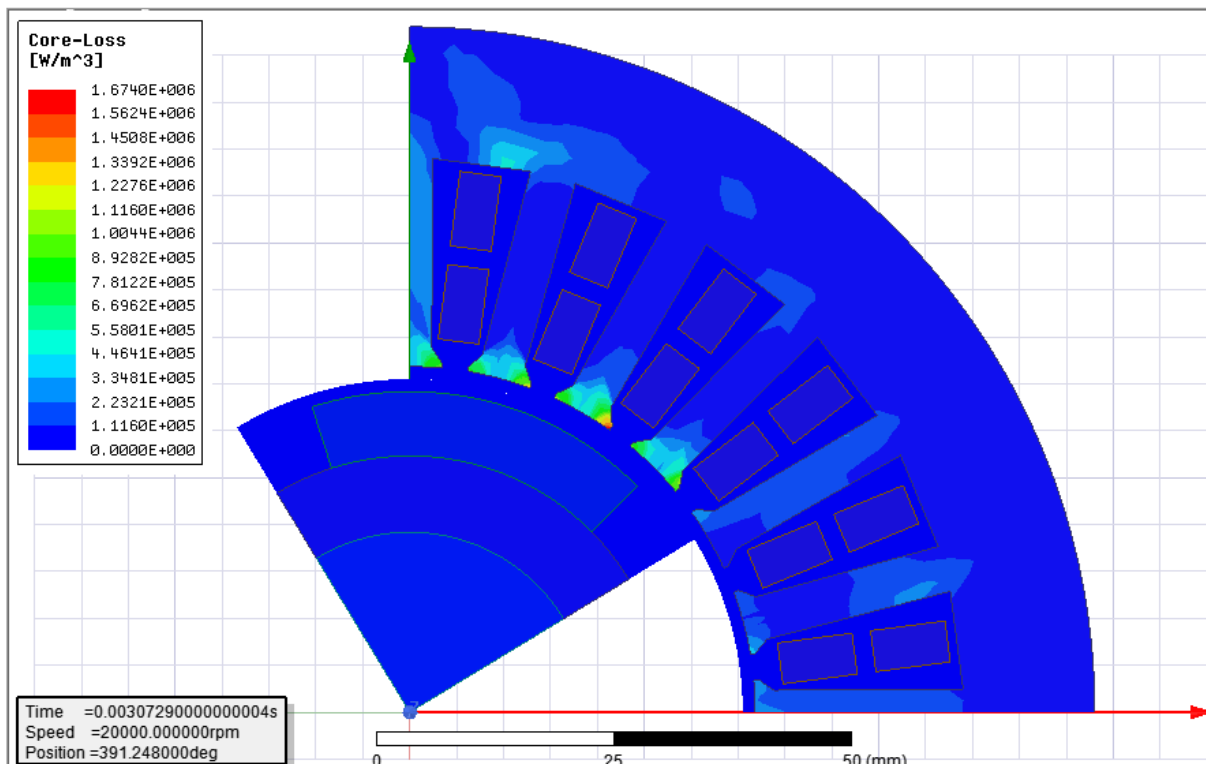


Obr. 5.5 – Proud v 1 fázi vinutí s proudovým omezením

Toto proudové omezení způsobí ve fázi rozběhu snížení velikosti magnetické indukce ve stroji a to má dle vztahu (7) dále vliv na snížení ztrát v železe viz.: obrázky 5.6 a 5.7.



Obr. 5.6 – Mag. Indukce B a silokřivky mag. potenciálu A při napájení dle obr. 5.5



Obr. 5.7 – Ztráty v železe P_{fe} při napájení na obr. 5.5

Změna napájení způsobí výrazný pokles ztrát v železe u všech materiálů viz.: tab. 2. Velký vliv na kvalitativní posouzení materiálů to však nemá. Jediná výrazná změna nastala u materiálu Somaloy 750HR 5P. U tohoto materiálu klesly ztráty tak výrazně, že je nyní tento materiál prakticky srovnatelný s plechy 20JNEH1200 ve srovnání velikosti středních ztrát.

5.2 Analýza pole ztrát - Field Calculator

V této kapitole se zabývám posouzením shody okamžitých hodnot ztrát v železe vypočítaných pomocí "Field Calculatoru" a okamžitých hodnot zjištěných pomocí "Rectangular Plot" odečtem z grafu $P_{fe}=f(t)$.

Výpočet pro výše uvedený čtvrtinový řez můžeme popsat následující rovnicí:

$$P_{Fe}(t) = p_r \cdot \iiint_V p_{fe}(t) dV \quad (11)$$

Kde: $P_{fe}(t)$ – okamžitá hodnota ztrát v železe v okamžiku t [W]

p_r – počet symetrických řezů [-]

$p_{fe}(t)$ – okamžitá hodnota měrných ztrát v železe v elementu výpočetní sítě [W/m³]

V – objem [m³]

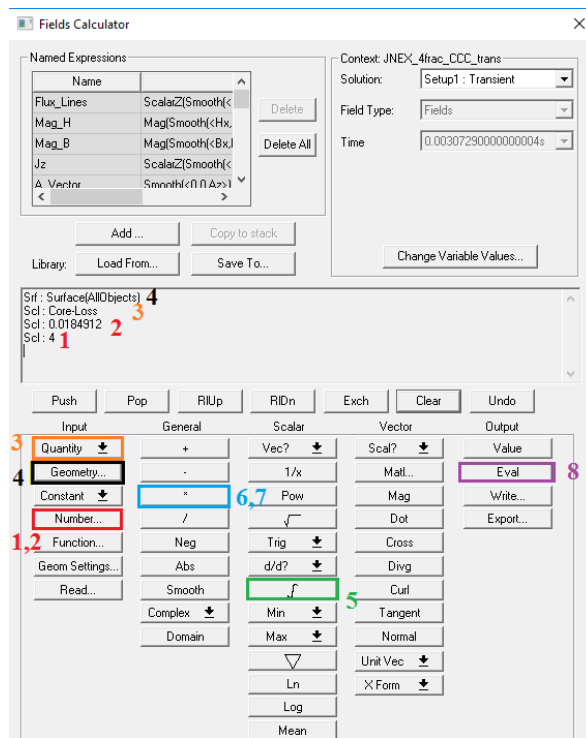
Vzhledem k tomu, že se v daném případě jedná o 2D model je třeba reálnou délku aktivních částí stroje v rovnici (11):

$$P_{Fe}(t) = p_r \cdot l \cdot \iint_S p_{fe}(t) dS \quad (12)$$

Kde: l – délka stroje [m]

S – obsah [m²]

Postup zadání této rovnice do „Field Calculator“ je popsán v krocích 1 až 8 viz.: Obr.5.8:



Obr. 5.8 – Field Calculator

Kde:

1,2 – v těchto krocích se zadají hodnoty počtu symetrických řezů a délky stroje (v metrech)

3 – zadání integrované výrazu, v tomto případě $p_{fe}(t)$

4 – výběr geometrie, přes kterou se integruje. Tedy plocha celého modelu

5 – funkce integrace

6,7 – funkce násobení

8 – vyhodnocení zadaného příkazu

Po provedení popsaného příkazu je vypočtena okamžitá hodnota ztrát v železe v určitém čase.

	Pfe[W]	
Typ napájení	Rectangular Plot	Field Calculator
DCC (t=3,07ms)	90	85,0405
CCC (t=20ms)	14,86	14,8625

Tab.3 – Porovnání Rectangular plot vs. Field Calculator

Z tabulky 3 vyplývá, že hodnoty z „Rectangular Plot“ a „Field Calculator“ jsou prakticky totožné.

6 Závěr

Cílem práce bylo zejména seznámení se, osvojení dovedností práce s vývojovým prostředím Ansys a jeho následná aplikace pro návrh točivých elektrických strojů. Konkrétní návrh byl zaměřen na synchronní motory s permanentními magnety o výkonu cca 10kW. V práci jsem měl vycházet z literární a patentové rešerše aktuálního stavu techniky tohoto typu motorů. V tomto smyslu jsem vycházel z publikace [5], která popisuje vývoj PMSM stroje 8 kW, 50000 rpm. K návrhu jsem přistupoval metodou reverse-engineeringu a modifikoval jsem stroj na požadované parametry (10 kW, 20000 rpm). Modifikovanou částí stroje je například tvar drážek, materiál magnetického obvodu, typ permanentních magnetů, atp.

Z MKP simulací přechodného děje po připojení PWM měniče provedených až do ustáleného stavu jsem získal mapy polí okamžitých hodnot základních elektromagnetických veličin. Zabýval jsem se zejména lokální velikostí indukce a průběhem silokřivek v jednotlivých částech magnetického obvodu stroje. Konstatuji, že geometrii stroje by bylo možné dále optimalizovat, to však není cílem této bakalářské práce.

Dále jsem zkoumal možnosti omezení ztrát v železe v závislosti na výběru materiálu pro magnetický obvod statoru. Z porovnání zkoumaných materiálů vyplývá, že nejvýhodnější materiál s ohledem na ztráty v železe je válcovaná elektrotechnická ocel typového označení 10JNEX900, který má oproti ostatním posuzovaným materiálům minimální ztráty viz.: tab.1 a tab.2.

Stroj který jsem navrhl dosahuje v rozsahu otáček 7500-20000 rpm účinnosti 95%, což považuji za dostatečné vzhledem k tomu, že stroj, který jsem použil jako vzor dle [5], dosahuje účinnosti 98%.

Použitá literatura

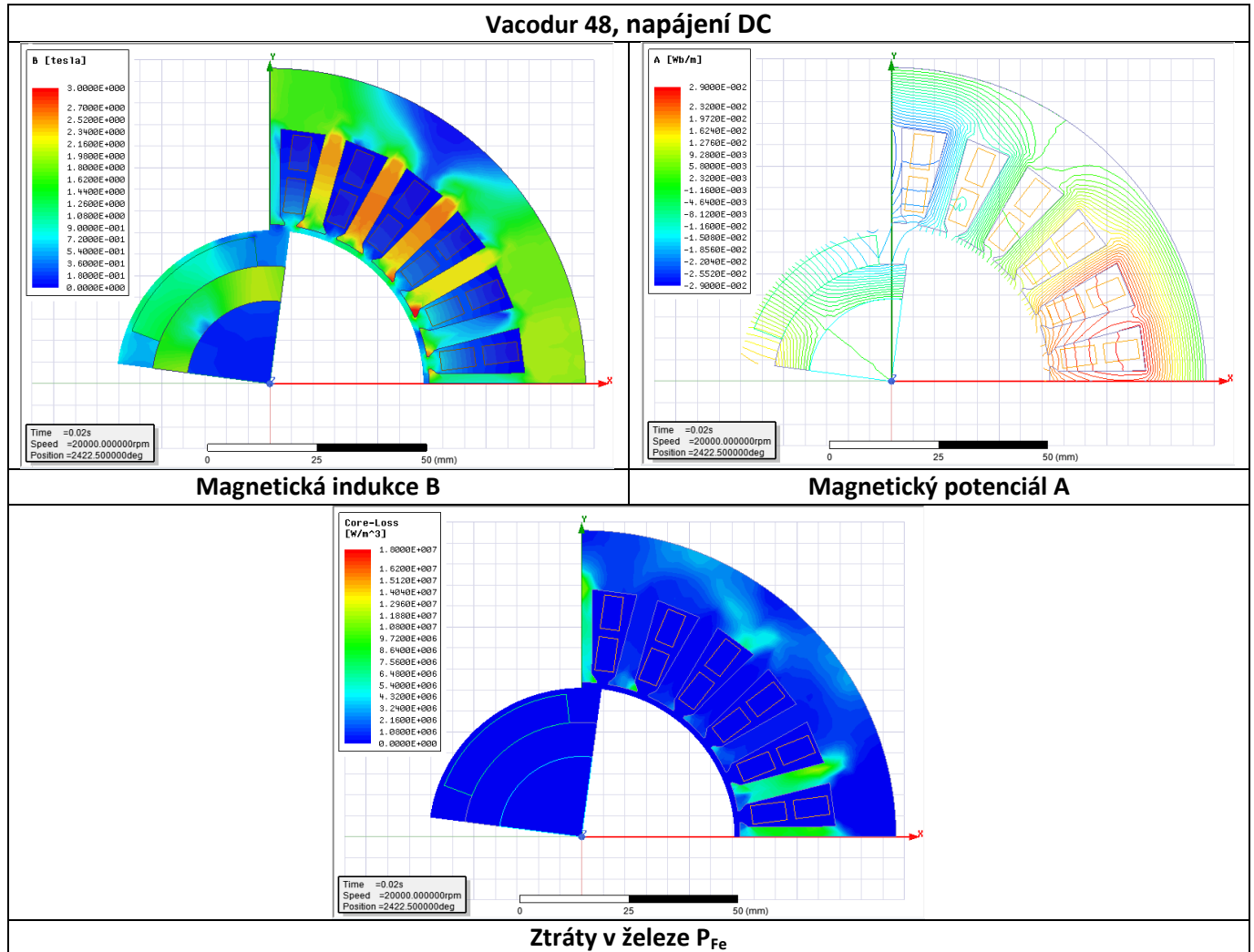
- [1] Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcová V., *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons 2014
- [2] Hrabovcová V., Janoušek L., Rafajdus P., Ličko M., *Moderné elektrické stroje*, Zilina, 2001
- [3] Unnewehr L.E., Nasar S.A., *Electric Vehicle Technology*, John Willey & Sons, 2002
- [4] *Manuály ANSYS RMXprt, Maxwell 3D*, Techsoft-engineering 2017
- [5] A. S. Nagorny, N. V. Dravid, R. H. Jansen and B. H. Kenny, "Design aspects of a high speed permanent magnet synchronous motor / generator for flywheel applications," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, San Antonio, TX, 2005
- [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] H. C. Lahne, D. Gerling, D. Staton and Y. C. Chong, "Design of a 50000 rpm high-speed high-power six-phase PMSM for use in aircraft applications," *2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte Carlo, 2016
- [8] KOTAL, Miroslav, Petr VOŽENÍLEK, Petr NOVOTNÝ. Příklady výpočtu elektrických strojů točivých. 4. vydání. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1988.
- [9] D. M. Ionel, M. Popescu, M. I. McGilp, T. J. E. Miller, S. J. Dellinger and R. J. Heideman, "Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 6, pp. 1554-1564, Nov.-dec. 2007.
- [10] D. M. Ionel, M. Popescu, S. J. Dellinger, T. J. E. Miller, R. J. Heideman and M. I. McGilp, "On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 3, pp. 658-667, May-June 2006.
- [11] M. Cossale, A. Krings, J. Soulard, A. Boglietti and A. Cavagnino, "Practical Investigations on Cobalt–Iron Laminations for Electrical Machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 4, pp. 2933-2939, July-Aug. 2015.
- [12] Iron loss calculation of an internal permanent magnet synchronous machine for a fuel cell car, <https://www.ansys.com/resource-library/conference-paper/iron-loss-calculation-of-an-internal-permanent-magnet-synchronous-machine-for-a-fuel-cell-car>
- [13] <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/index.php>
- [14] <https://www.hoganas.com/en/products/somaloy-5p/>

- [15] A. Kreim and U. Schäfer, "An approach to an optimal design of permanent magnet synchronous machines for battery electric vehicles," *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Barcelona, 2013, pp. 1-11
- [16] X. Li, N. Erd and A. Binder, "Design and calculation of a 130 kW high-speed permanent magnet synchronous machine in flywheel energy storage systems for urban railway application," *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Santa Margherita Ligure, 2017, pp. 452-459
- [17] N. Bernard, R. Missoum, L. Dang, N. Bekka, H. Ben Ahmed and M. E. H. Zaïm, "Design Methodology for High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 477-485, June 2016
- [18] F. Zhang, Ye Hao, G. Liu and Fengyi Qiu, "Design and analysis of 100kW high speed permanent magnet synchronous motor," *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Busan, 2016, pp. 843-847
- [19] N. Bernard, L. Dang, J. C. Olivier, N. Bracikowski, G. Wasselynck and G. Berthiau, "Design Optimization of High-Speed PMSM for Electric Vehicles," *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Montreal, QC, 2015, pp. 1-6

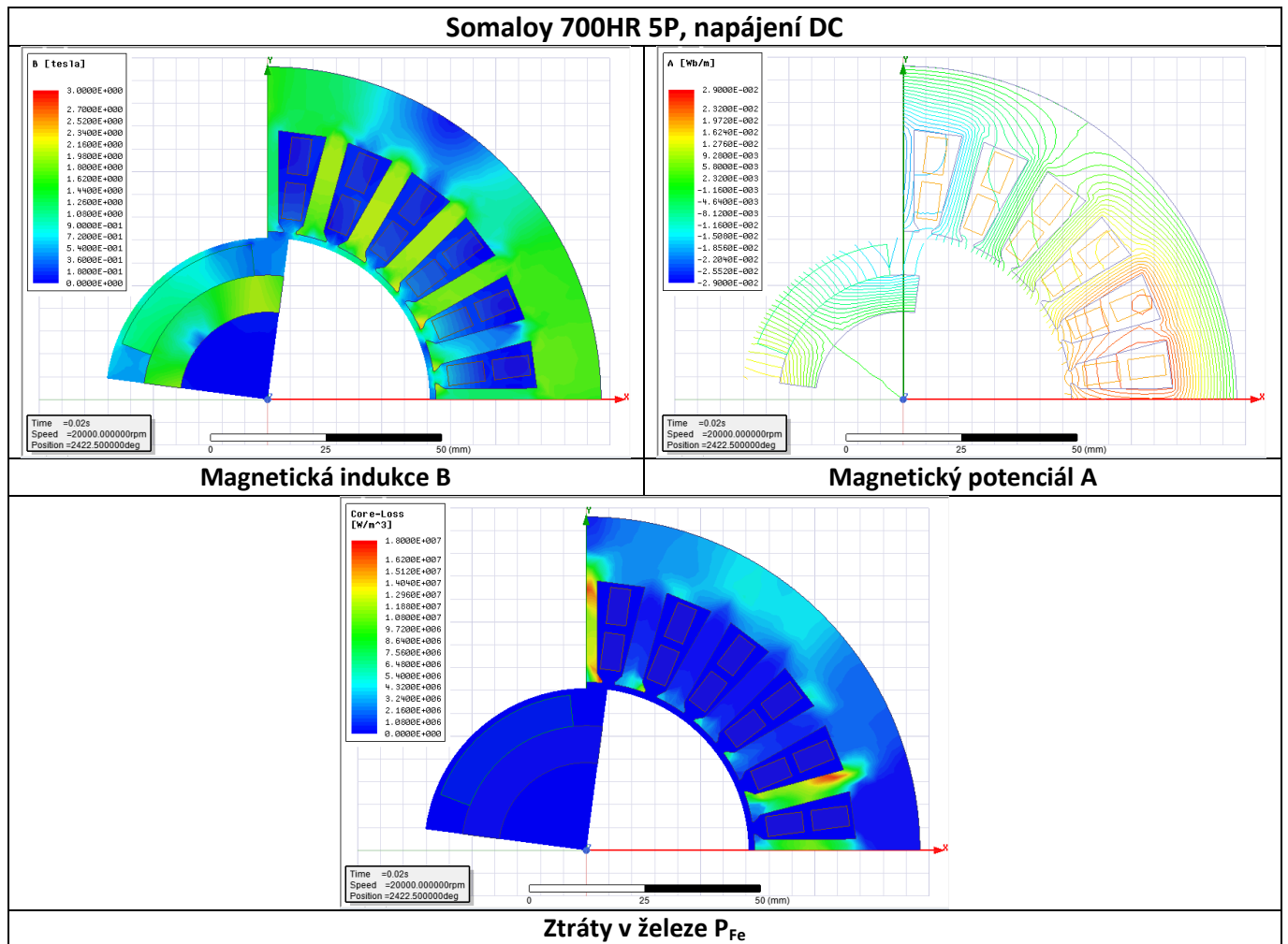
Přílohy

Příloha A – Mapy polí nastavené dle obr. 4.6, napájení DC

A) Vacodur 48

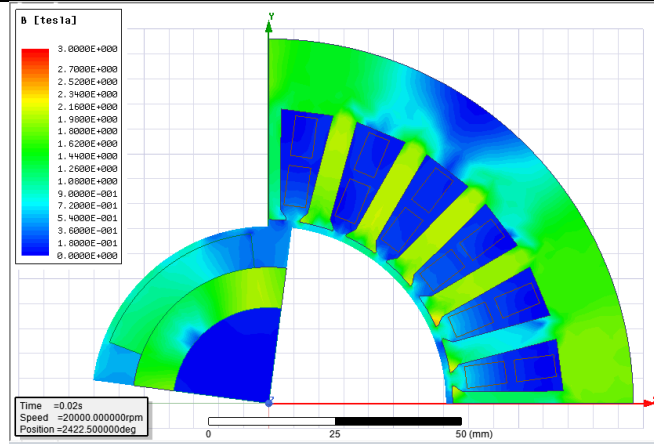


B) Somaloy 700HR 5P

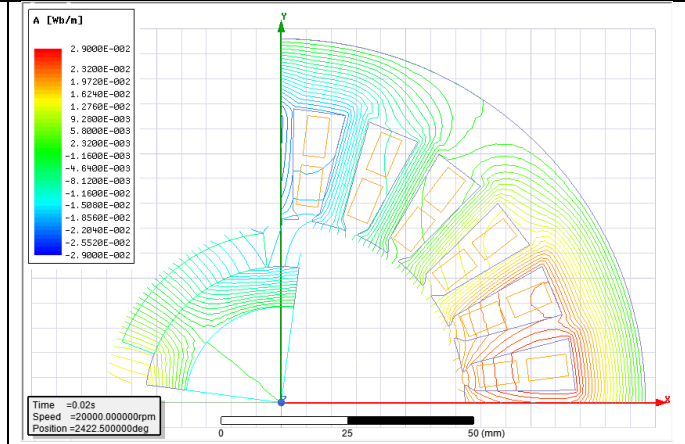


C) 50JNE300

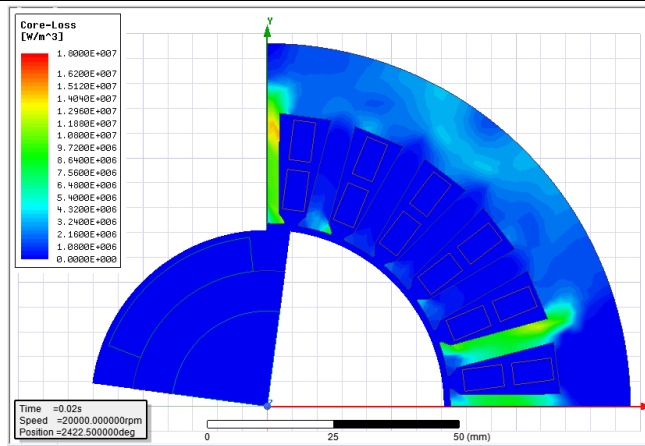
50JNE300, napájení DC



Magnetická indukce B



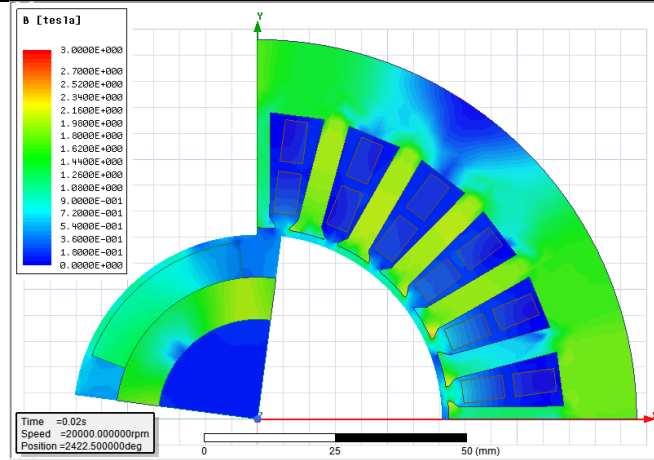
Magnetický potenciál A



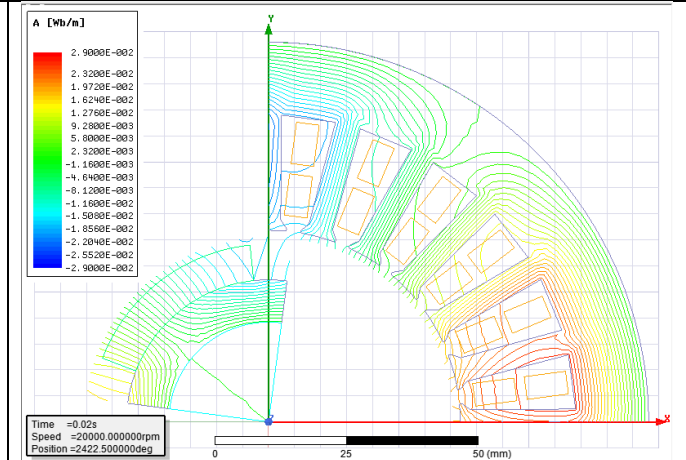
Ztráty v železe P_{Fe}

D) 20JNEH1200

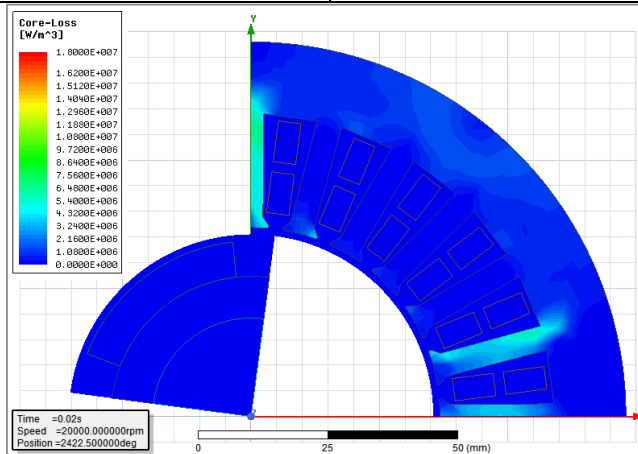
20JNEH1200, napájení DC



Magnetická indukce B



Magnetický potenciál A



Ztráty v železe P_{Fe}

Příloha B – Design sheet RMxprt

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): 0
One-Diode Voltage Drop (V): 0
Operating Temperature (C): 115
Maximum Current for CCC (A): 250
Minimum Current for CCC (A): 100

STATOR DATA

Number of Stator Slots: 24
Outer Diameter of Stator (mm): 146.05
Inner Diameter of Stator (mm): 73.66
Type of Stator Slot: 3
Stator Slot
hs0 (mm): 0.5
hs1 (mm): 1.5
hs2 (mm): 20
bs0 (mm): 2.8
bs1 (mm): 5.5
bs2 (mm): 10.5
rs (mm): 0
Top Tooth Width (mm): 4.67677
Bottom Tooth Width (mm): 4.94059
Skew Width (Number of Slots) 0
Length of Stator Core (mm): 18.5
Stacking Factor of Stator Core: 0.95
Type of Steel: JFE_Steel_SuperCore_10JNEX900
Designed Wedge Thickness (mm): 1.50002
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: 11
Wire Diameter (mm): 1.29
Wire Wrap Thickness (mm): 0
Slot Area (mm²): 167.625
Net Slot Area (mm²): 160
Limited Slot Fill Factor (%): 75
Stator Slot Fill Factor (%): 68.6442
Coil Half-Turn Length (mm): 123.55

ROTOR DATA

Minimum Air Gap (mm): 2.667
Inner Diameter (mm): 38.354
Length of Rotor (mm): 18.5
Stacking Factor of Iron Core: 0.95
Type of Steel: steel_1010
Polar Arc Radius (mm): 34.163
Mechanical Pole Embrace: 0.7

Electrical Pole Embrace: 0.695015
Max. Thickness of Magnet (mm): 6.858
Width of Magnet (mm): 33.7938
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/m³): 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: 4

MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m³): 8900
Permanent Magnet Density (kg/m³): 8300
Armature Core Steel Density (kg/m³): 7490
Rotor Core Steel Density (kg/m³): 7872
Armature Copper Weight (kg): 2.27645
Permanent Magnet Weight (kg): 0.142346
Armature Core Steel Weight (kg): 1.11478
Rotor Core Steel Weight (kg): 0.16421
Total Net Weight (kg): 3.69778
Armature Core Steel Consumption (kg): 2.92443
Rotor Core Steel Consumption (kg): 0.459173

STEADY STATE PARAMETERS

Stator Winding Factor: 0.933013
D-Axis Reactive Inductance Lad (H): 1.3154e-006
Q-Axis Reactive Inductance Laq (H): 1.3154e-006
D-Axis Inductance L1+Lad(H): 3.34018e-006
Q-Axis Inductance L1+Laq(H): 3.34018e-006
Armature Leakage Inductance L1 (H): 2.02479e-006
Slot Leakage Inductance Ls1 (H): 7.68671e-007
End Leakage Inductance Le1 (H): 1.2438e-006
Harmonic Leakage Inductance Ld1 (H): 1.231e-008
Zero-Sequence Inductance L0 (H): 1.73062e-006
Armature Phase Resistance R1 (ohm): 0.000631638
Armature Phase Resistance at 20C (ohm): 0.000460193
D-Axis Time Constant (s): 0.00208252
Q-Axis Time Constant (s): 0.00208252
Ideal Back-EMF Constant KE (Vs/rad): 0.00920664
Start Torque Constant KT (Nm/A): 0.00920065
Rated Torque Constant KT (Nm/A): 0.00985506

NO-LOAD MAGNETIC DATA

Stator-Teeth Flux Density (Tesla): 1.47953
Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 0.994896
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 1.71215
Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.510431
Magnet Flux Density (Tesla): 0.788034
Stator-Teeth By-Pass Factor: 0.00661154
Stator-Yoke By-Pass Factor: 3.06211e-006
Rotor-Yoke By-Pass Factor: 0.000307246
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): 93.6478
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 1.62648
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): 54.1508
Air-Gap Ampere Turns (A.T): 1201.09
Magnet Ampere Turns (A.T): -1351.17
Armature Reactive Ampere Turns

at Start Operation (A.T): 105.921
Leakage-Flux Factor: 1
Correction Factor for Magnetic
Circuit Length of Stator Yoke: 0.682599
Correction Factor for Magnetic
Circuit Length of Rotor Yoke: 0.421175
No-Load Speed (rpm): 63819.7
Cogging Torque (N.m): 0.0259277

FULL-LOAD DATA

Average Input Current (A): 134.56
Root-Mean-Square Armature Current (A): 117.502
Armature Thermal Load (A^2/mm^3): 37.3502
Specific Electric Loading (A/mm): 18.2796
Armature Current Density (A/mm^2): 2.04327
Frictional and Windage Loss (W): 197.623
Iron-Core Loss (W): 387
Armature Copper Loss (W): 26.1627
Transistor Loss (W): 0
Diode Loss (W): 0
Total Loss (W): 610.785
Output Power (W): 7597.4
Input Power (W): 8208.19
Efficiency (%): 92.5588
Rated Speed (rpm): 56132.2
Rated Torque (N.m): 1.29248
Locked-Rotor Torque (N.m): 1.57581
Locked-Rotor Current (A): 0.56772

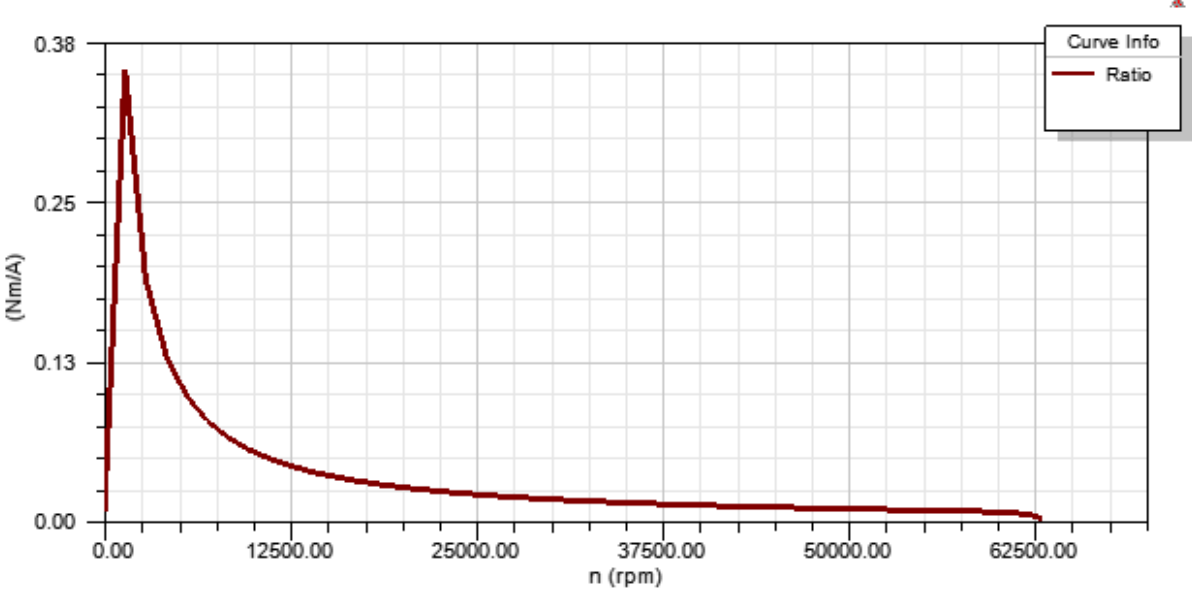
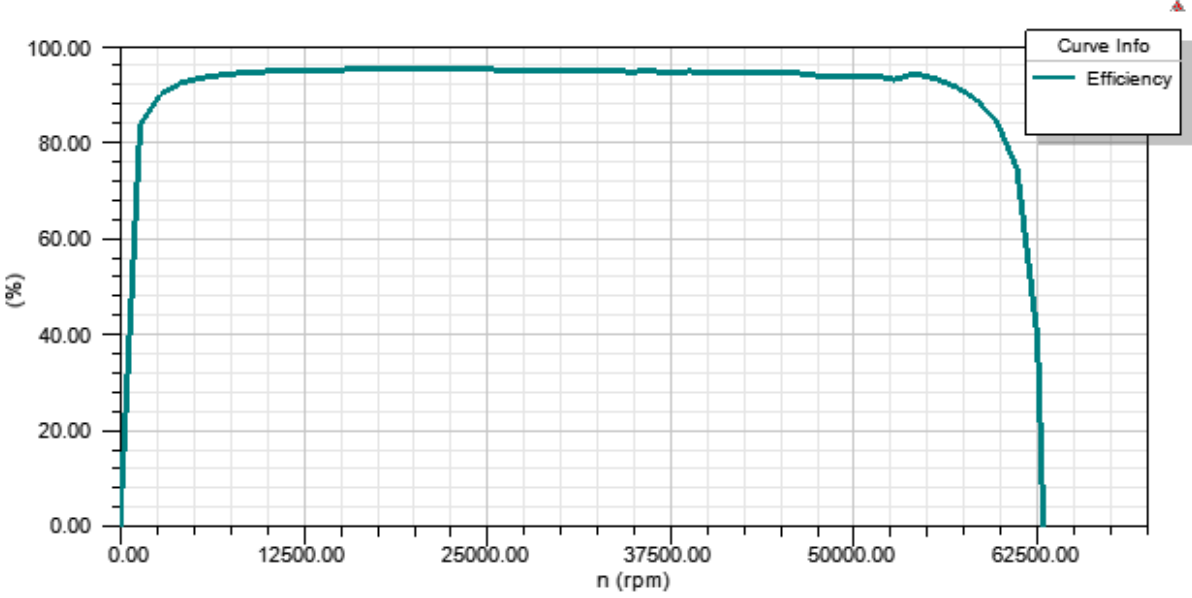
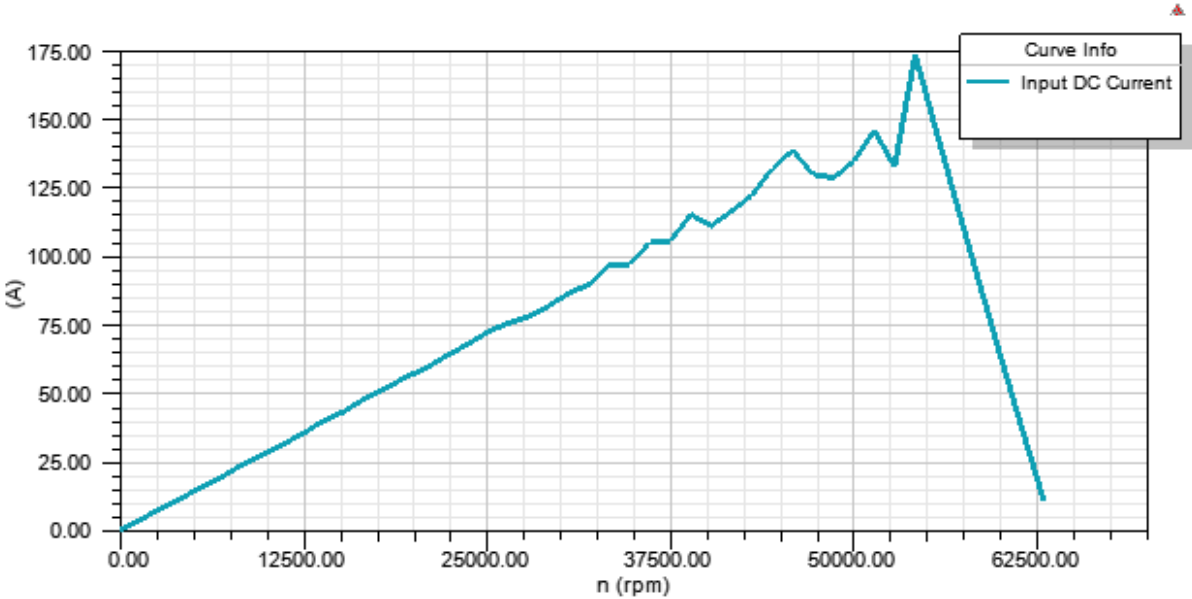
WINDING ARRANGEMENT

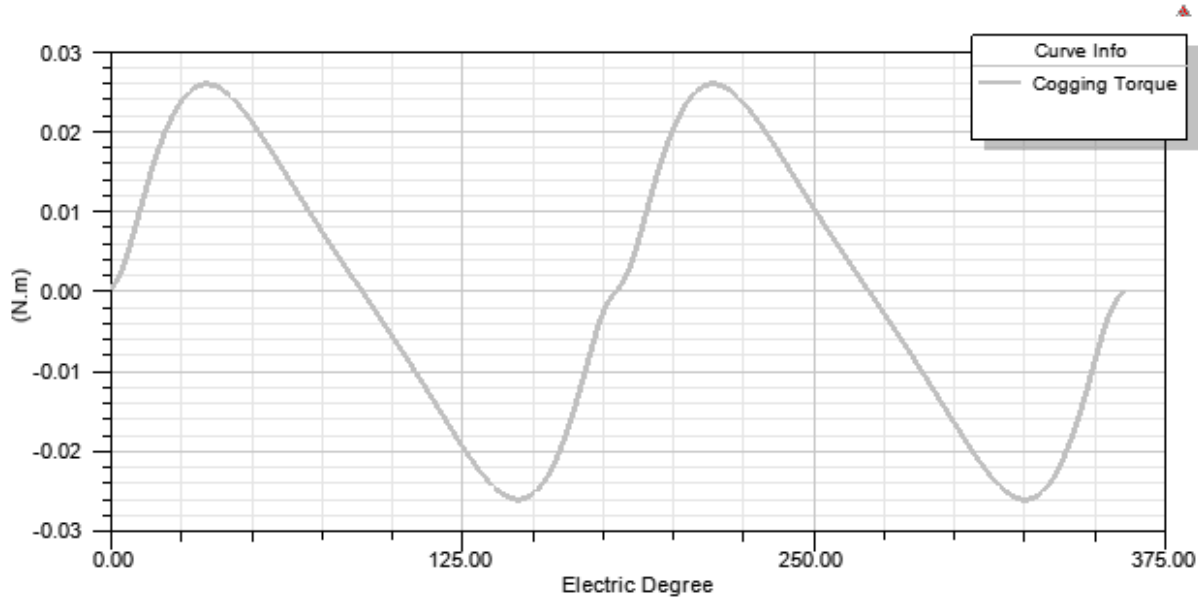
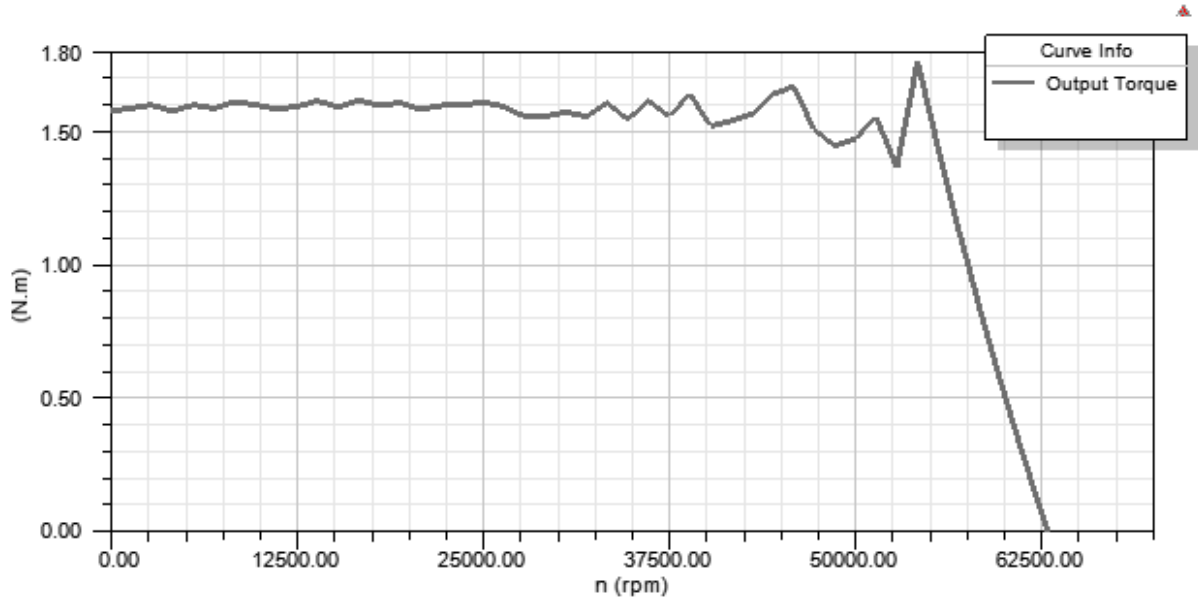
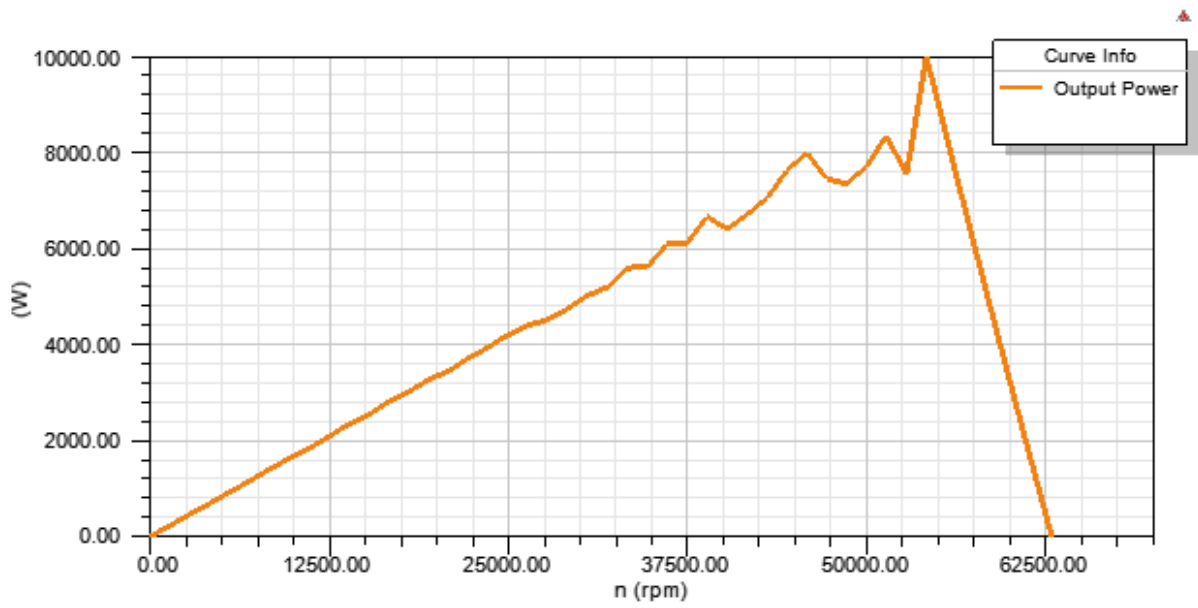
The 3-phase, 2-layer winding can be arranged in 6 slots as below:
AAZZBB
Angle per slot (elec. degrees): 30
Phase-A axis (elec. degrees): 120
First slot center (elec. degrees): 0

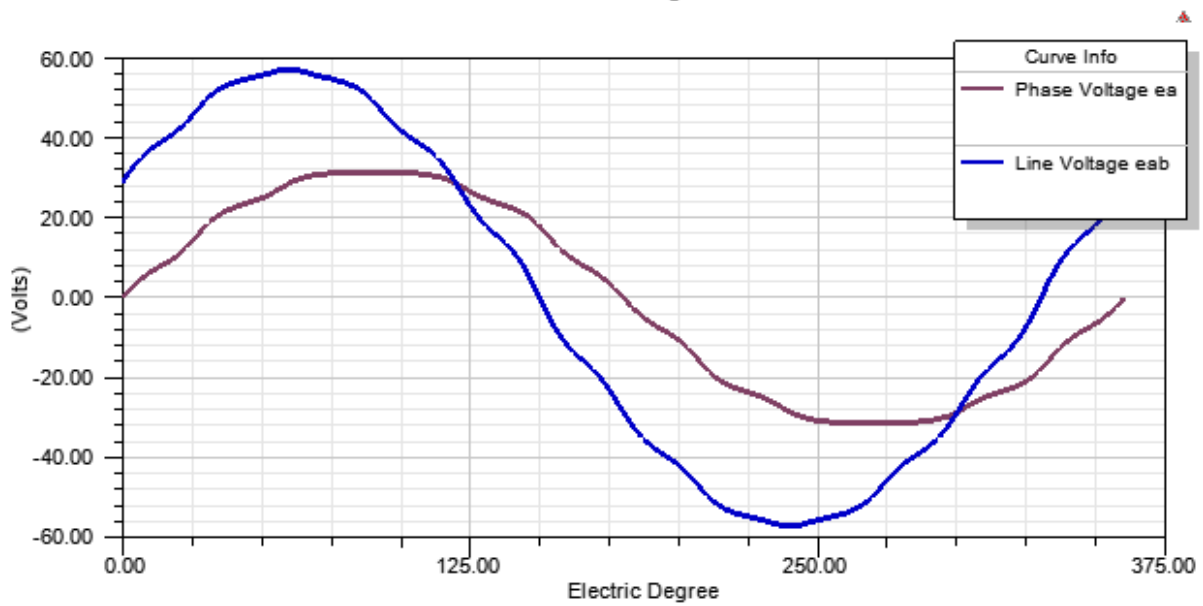
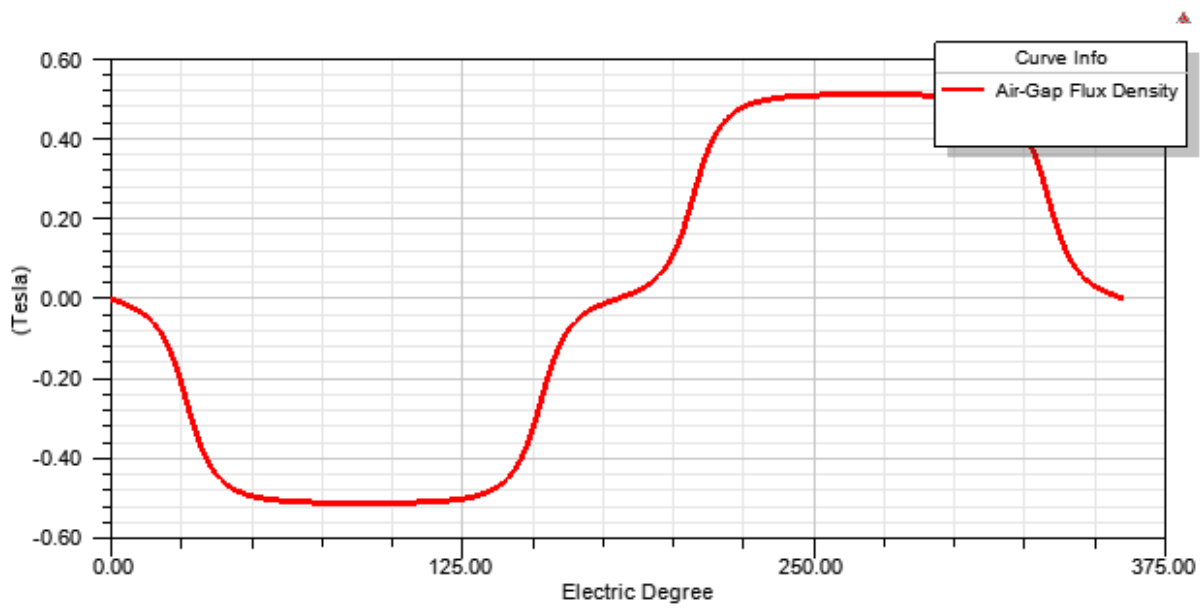
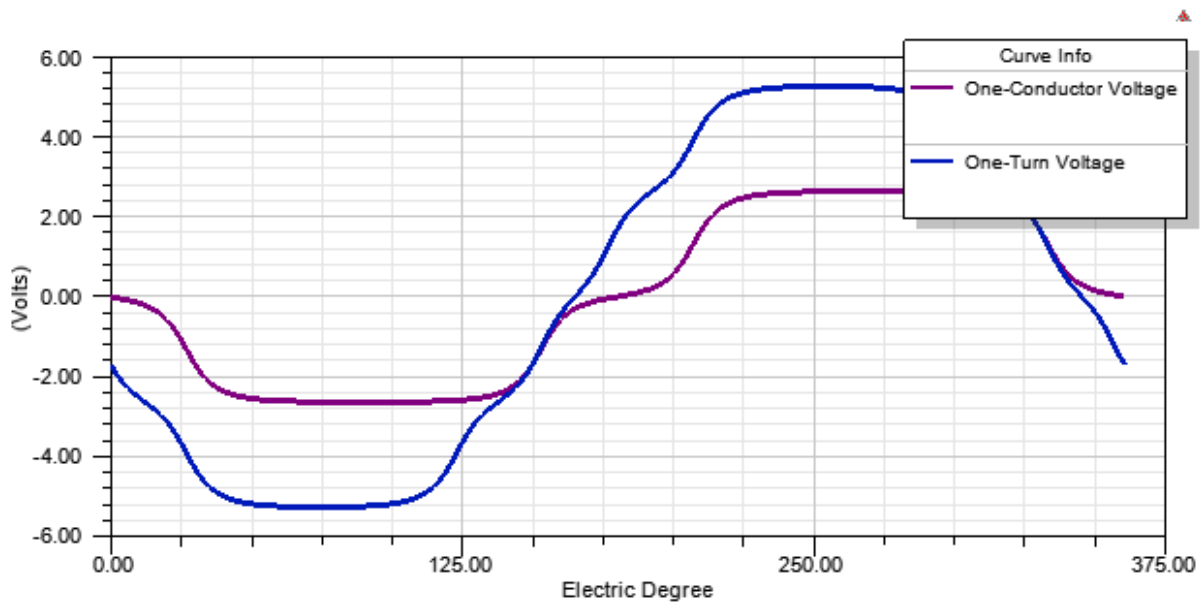
TRANSIENT FEA INPUT DATA

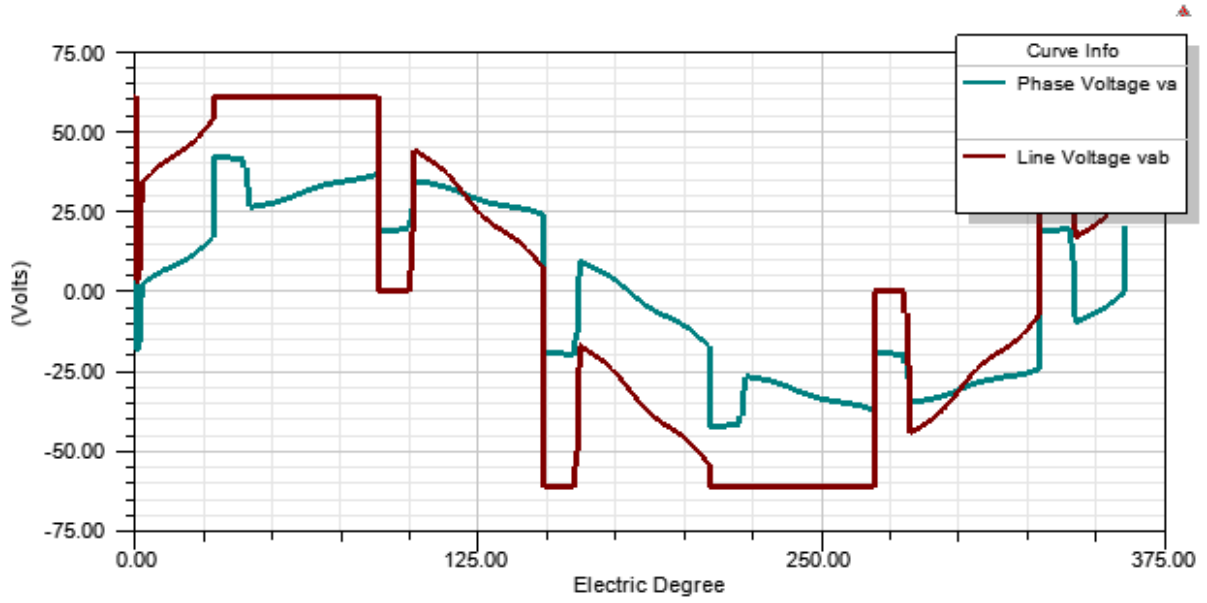
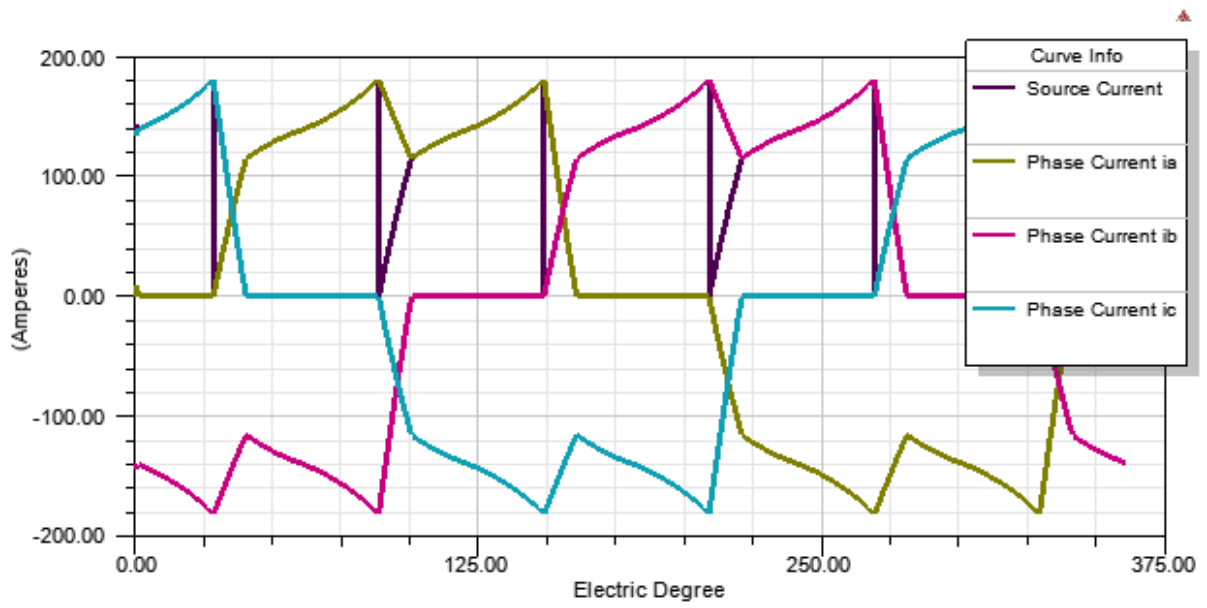
For Armature Winding:
Number of Turns: 24
Parallel Branches: 4
Terminal Resistance (ohm): 0.000631638
End Leakage Inductance (H): 1.2438e-006
2D Equivalent Value:
Equivalent Model Depth (mm): 18.5
Equivalent Stator Stacking Factor: 0.95
Equivalent Rotor Stacking Factor: 0.95
Equivalent B_r (Tesla): 1.0526
Equivalent H_c (kA/m): 783.872

Příloha C – Grafy RMxprt









Příloha D – Materiálové data Vacodur 48

Alloy	Vacoflux 48
Measurement	Static Initial Curve
Material	strip 0.35 mm
Batch	74 / 4172-2
Density	8.12 g/cm ³
Issue	VX48-035-prerelease (01/2010)
Issued By	VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG http://www.vacuumschmelze.com
Disclaimer	laboratory data, not part of specification
Sample Type	stamped rings
Dimension	28.5 mm x 20.0 mm x 0.35 mm
Annealing	10h 880°C / H ₂
Sample Weight	15.46 g
Magnetic Cross Section	0.2499 cm ²
Magnetic Path	7.62 cm
Sample Winding	
N1/N2	20 / 5
Comments	Measurement acc. to IEC 60404-4 / ASTM A 773-M01 no air flux correction typical electrical resistivity 0.40 μΩm coercivity of this sample 0.3 A/cm

Measurement Data
(49 values)

Field Strength H in A/cm	Induction B in T	Polarisation J in T	Permeability μ
0,019	0,002	0,002	1028
0,025	0,004	0,004	1165
0,033	0,005	0,005	1273
0,037	0,007	0,007	1447
0,050	0,010	0,010	1545
0,057	0,012	0,012	1623
0,065	0,014	0,014	1704
0,075	0,018	0,018	1862
0,087	0,022	0,022	2061
0,100	0,028	0,028	2273
0,115	0,037	0,037	2560
0,132	0,048	0,048	2880
0,151	0,063	0,063	3306
0,174	0,104	0,104	4748
0,200	0,127	0,127	5042
0,230	0,198	0,198	6836
0,265	0,305	0,305	9159
0,305	0,458	0,458	11961
0,350	0,692	0,692	15716
0,403	0,997	0,997	19690
0,463	1,329	1,329	22825
0,533	1,505	1,505	22475
0,613	1,617	1,617	20999
0,705	1,697	1,696	19162
0,810	1,761	1,760	17291
0,932	1,816	1,816	15513
1,07	1,860	1,860	13818
1,19	1,880	1,880	12596
1,37	1,916	1,916	11162
1,57	1,948	1,948	9865
1,81	1,980	1,980	8719
2,08	2,004	2,003	7673
2,39	2,032	2,031	6764
2,75	2,055	2,055	5950
3,16	2,079	2,079	5234
3,64	2,099	2,098	4595
4,18	2,118	2,118	4033
4,81	2,138	2,138	3539
5,53	2,154	2,153	3100
6,36	2,173	2,172	2721
7,31	2,189	2,188	2383
8,40	2,200	2,199	2084
9,66	2,215	2,214	1825
11,1	2,226	2,225	1596
12,8	2,237	2,236	1395
14,7	2,248	2,246	1220
16,8	2,255	2,253	1066
19,3	2,265	2,263	932
20,0	2,265	2,263	902

Alloy Vacoflux 48
Measurement Core Loss
Material strip 0.35 mm
Density 8.12 g/cm³

Issue VX48-035-prerelease (01/2010)
Issued By VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG
<http://www.vacuumschmelze.com>
Disclaimer laboratory data, not part of specification

Sample Type stamped rings
Dimension 28.5 mm x 20.0 mm x 0.35 mm
Annealing 10h 880°C / H₂
Sample Weight 23.97 g
Magnetic Cross Section 0.3874 cm²
Magnetic Path 7.618 cm
Sample Winding
N1/N2 50/20

Comments Measurement acc. to IEC 60404-4 / ASTM A 773-M01
typical electrical resistivity 0.40 μΩm

Measurement Data
(27 values)

Induction B in T	Frequency f in Hz	Form Factor U_{ff}	Core Loss P_{fe} in W/kg
0,5	50	1,075	0,27
0,5	60	1,085	0,33
0,5	100	1,102	0,61
0,5	400	1,110	3,71
0,5	1000	1,111	14,1
0,5	2000	1,111	41,4
0,5	5000	1,113	186
1,0	50	1,103	0,8
1,0	60	1,106	0,96
1,0	100	1,109	1,84
1,0	400	1,111	13,0
1,0	1000	1,111	57,2
1,0	2000	1,111	193
1,0	5000	1,110	1034
1,5	50	1,109	1,39
1,5	60	1,109	1,74
1,5	100	1,110	3,51
1,5	400	1,111	30,1
1,5	1000	1,111	152
1,5	2000	1,110	558
1,5	5000	1,107	3199
2,0	50	1,113	2,23
2,0	60	1,112	2,84
2,0	100	1,112	5,83
2,0	400	1,111	57,7
2,0	1000	1,111	325
2,0	2000	1,110	1248

Příloha E – Celkové ztráty, hysterezní ztráty, ztráty způsobené vířivými proudy všech použitých materiálů

