

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra elektrických pohonů a trakce**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony



**Návrh indukčního trakčního motoru 15 kW s vnějším rotorem v SW prostředí ANSYS Electronics ver. 17.0**

**Design of Traction Motor with Outer Rotor in ANSYS**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vypracoval: Bc. Jan Petřík

Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.

Rok: 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petřík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **406204**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh indukčního trakčního motoru 15 kW s vnějším rotorem v SW prostředí ANSYS Electronics ver. 17.0**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of Traction Motor with Outer Rotor in ANSYS**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s vývojovým prostředím ANSYS
- 2) Pro návrh stroje aplikujte sw multilicenci CVUT - ANSYS 17.0
- 3) Navrhněte ve zvoleném CAD programu 3D model
- 4) Proveďte simulace funkce stroje v ANSYS Maxwell 3D.
- 5) Analyzujte vypočtená data.

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.06.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **Prohlášení**

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

V Praze dne

Jan Petřík

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za odborné vedení a poskytnuté konzultace v průběhu zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Petru Voženílkovi, CSc. za cenné rady týkající se návrhu asynchronního motoru. Velký dík také patří mé rodině za obrovskou mentální podporu v průběhu mého studia.

## **Abstrakt**

Práce je zaměřena na možnost analýzy asynchronních motorů s vnějším rotorem v trakční aplikaci. Návrh stroje zadaného typového výkonu je proveden v SW prostředí ANSYS Electronics, který je v rámci studentské free licence přístupný studentům a akademickým pracovníkům ČVUT. Stručný popis vývojového prostředí programu je uvedeno v úvodní kapitole. V dalších kapitolách je popsán návrh stroje pomocí návrhového modulu RMXprt, ten však pro asynchronní motor s vnějším rotorem nevytvoří soubor dat analytického výpočtu (Solution Data) s parametry stroje. Tyto výpočty jsem tedy provedl dle [3]. Modul RMXprt umožňuje vytvoření 2D i 3D modelů pro simulace metodou konečných prvků (MKP) v programu Maxwell 3D, atypické konstrukce jako je IM s vnějším rotorem však nezahrnuje. Proto jsem dále vytvořil 3D model pomocí tzv. uživatelsky definovaných primitiv (UDP) modulem Draw v programu Maxwell 3D. Vzhledem k nárokům na výpočetní výkon a paměťový prostor se moje HW vybavení ukázalo, jako nedostatečné pro 3D simulace. Proto jsem ve většině řešených úloh využil možnost konverze 3D na 2D. Získaná data jsou uvedena v grafické a tabelární formě v kapitolách 2.2, 4.5, 4.5.5 a 4.6. V závěru práce jsou zhodnocené výsledky získané ze simulací.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, vnější rotor, ANSYS, 3D model, Maxwell, Electronics, Simploter.

## **Abstract**

The thesis is focused on the possibility of analysis of asynchronous motors with external rotor in traction application. The design of the machine of specified type performance is done in the SW environment ANSYS Electronics, which is accessible to students and academic staff of ČVUT within the student free license. A brief description of the program development environment is provided in the introductory chapter. In the following chapters is described the machine design using the design module RMxpvt, but it does not produce data file of analytic computation (Solution Data) with machine parameters for inductance motors with external rotor. These calculations are therefore performed per [3]. The RMxpvt module allows creation of 2D and 3D models for simulations using Finite Element (FEM) in Maxwell 3D, but it does not include atypical constructions such as IM with the external rotor. That's why I've also created a 3D model using the so-called User Defined Primitive (UDP) module Draw in Maxwell 3D. Due to the demands on computing power and memory space, my HW equipment has proven to be inadequate for 3D simulations. That's why I've used 3D conversion to 2D in the most of my work. The obtained data are presented graphically and tabularly in chapters 2.2, 4.5 and 4.6. At the end of the thesis are evaluated results obtained from simulations.

## **Key words**

Induction motor, outer rotor, ANSYS, 3D model, Maxwell, Electronics, Simplorer.

## Obsah:

Úvod.....	- 1 -
1 SW prostředí ANSYS.....	- 2 -
1.1 ANSYS Electronics .....	- 3 -
1.1.1 Vývojové prostředí ANSYS Electronics 17.0.....	- 5 -
1.1.1.1 Vytváření a úprava modelů v Electronics .....	- 9 -
2 Návrh asynchronního motoru s vnějším rotorem.....	- 14 -
2.1 Třífázový asynchronní motor .....	- 14 -
2.1.1 Napěťové rovnice asynchronního motoru.....	- 15 -
2.1.2 Náhradní zapojení asynchronního motoru .....	- 16 -
2.1.3 Výkonová bilance a moment asynchronního stroje .....	- 18 -
2.2 Vypočet asynchronního motoru.....	- 18 -
2.3 Návrh pomocí RMXprt.....	- 22 -
2.3.1 Parametry stroje „Machine Data“ .....	- 25 -
2.3.2 Parametry statoru.....	- 26 -
2.3.2.1 Magnetický obvod statoru.....	- 27 -
2.3.2.2 Vinutí statoru .....	- 29 -
2.3.3 Návrh rotoru .....	- 32 -
2.3.3.1 Magnetický obvod rotoru.....	- 32 -
2.3.3.2 Klec rotoru .....	- 33 -
2.3.4 Návrh hřídele.....	- 36 -
2.3.5 Parametry řešení „Solution Setup“ .....	- 37 -
3 Návrh 3D modelu asynchronního motoru s vnějším rotorem .....	- 40 -
3.1 3D Model – Stator .....	- 40 -
3.2 3D model – Vinutí statoru .....	- 42 -
3.3 3D model – Rotor .....	- 44 -
3.4 3D model – Klec rotoru .....	- 45 -
4 Simulace asynchronního motoru s vnějším rotorem .....	- 48 -
4.1 Magnetizační charakteristika M27_29G .....	- 48 -
4.2 Výpočetní síť .....	- 49 -
4.3 Ztráty v železe .....	- 50 -
4.4 Ztráty ve vinutí .....	- 50 -

4.5	Simulace motoru.....	- 50 -
4.5.1	Využití magnetického obvodu .....	- 51 -
4.5.2	Chod při jmenovitém zatížení .....	- 53 -
4.5.3	Chod naprázdno.....	- 59 -
4.5.4	Rozběh motoru s proměnným zátěžným momentem.....	- 61 -
4.5.5	Statická momentová charakteristika.....	- 64 -
4.6	Napájení z frekvenčního měniče .....	- 66 -
4.6.1	Zatížený motor napájený z frekvenčního měniče .....	- 67 -
5	Analýza shromážděných dat.....	- 70 -
6	Závěr.....	- 73 -
	Použitá literatura .....	- 75 -
	Přílohy .....	- 76 -

## **Seznam obrázků a tabulek:**

Obrázek 1-1:	Prostředí Workbench.....	- 3 -
Obrázek 1-2:	Volba řešiče.....	- 5 -
Obrázek 1-3:	Pracovní prostředí Electronics .....	- 6 -
Obrázek 1-4:	Message Manager.....	- 6 -
Obrázek 1-5:	Pracovní plocha Electronics .....	- 7 -
Obrázek 1-6:	Progress window .....	- 7 -
Obrázek 1-7:	Panel nástrojů .....	- 8 -
Obrázek 1-8:	Validace modelu.....	- 8 -
Obrázek 1-9:	Prostředí Electronics .....	- 8 -
Obrázek 1-10:	User Defined Primitiv .....	- 10 -
Obrázek 2-1:	Náhradní zapojení asynchronního stroje [5] .....	- 17 -
Obrázek 2-2:	Machine Type.....	- 23 -
Obrázek 2-3:	Parametry Machine .....	- 25 -
Obrázek 2-4:	Stator data.....	- 26 -
Obrázek 2-5:	Typy zapojení.....	- 26 -
Obrázek 2-6:	Typy drážek.....	- 27 -
Obrázek 2-7:	Parametry magnetického obvodu statoru .....	- 27 -
Obrázek 2-8:	Geometrické rozměry drážek statoru .....	- 28 -



Obrázek 2-9: Detail parametrů drážky .....	29 -
Obrázek 2-10: Parametry vinutí .....	29 -
Obrázek 2-11: Parametry vinutí – zakončení vinutí.....	30 -
Obrázek 2-12: Zapojení statorového vinutí.....	31 -
Obrázek 2-13: Návrh statoru .....	31 -
Obrázek 2-14: Parametry magnetického obvodu rotoru .....	32 -
Obrázek 2-15: Parametry klece vinutí rotoru .....	33 -
Obrázek 2-16: Materiálové vlastnosti hliníku.....	34 -
Obrázek 2-17: Rotor motoru od firmy ElektroDesign .....	35 -
Obrázek 2-18: Geometrické rozměry drážek rotoru .....	35 -
Obrázek 2-19: Parametry hřídele .....	36 -
Obrázek 2-20: Návrh modelu – RMxprt .....	37 -
Obrázek 2-21: Solution Setup – General.....	37 -
Obrázek 2-22: Solution Setup – GRM .....	38 -
Obrázek 3-1: Parametry statoru.....	41 -
Obrázek 3-2: 3D model statoru .....	42 -
Obrázek 3-3: Parametry vinutí statoru .....	43 -
Obrázek 3-4: 3D model statorového vinutí .....	43 -
Obrázek 3-5: 3D model rotoru .....	44 -
Obrázek 3-6: Parametry rotoru.....	44 -
Obrázek 3-7: Parametry klece nakrátko .....	45 -
Obrázek 3-8: 3D model klece nakrátko.....	46 -
Obrázek 3-9: 3D model asynchronního motoru s vnějším rotorem .....	47 -
Obrázek 4-1: Detail výpočetní sítě.....	49 -
Obrázek 4-2: Výpočetní síť .....	49 -
Obrázek 4-3: Rozložení magnetické indukce.....	51 -
Obrázek 4-4: Rozložení magnetické indukce ve 3D modelu .....	52 -
Obrázek 4-5: Rozložení magnetické indukce ve 3D modelu .....	52 -
Obrázek 4-6: Rozložení magnetické indukce při jmenovitém chodu, v čase 0,73 s.....	53 -
Obrázek 4-7: Průběh vypočítaného příkonu motoru, při jmenovitém chodu.....	55 -
Obrázek 4-8: Průběh momentu, při jmenovitém chodu .....	55 -
Obrázek 4-9: Průběh statorových proudů, při jmenovitém chodu .....	56 -
Obrázek 4-10: Průběh otáček motoru, při jmenovitém chodu .....	56 -

Obrázek 4-11: Ztráty v železe, při jmenovitém chodu.....	- 57 -
Obrázek 4-12: Ztráty ve statorovém vinutí, při jmenovitém chodu.....	- 57 -
Obrázek 4-13: Ztráty v kleci rotoru, při jmenovitém chodu .....	- 58 -
Obrázek 4-14: Rozložení magnetické indukce při chodu naprázdno, v čase 0,73 s .....	- 59 -
Obrázek 4-15: Příkon motoru, při chodu naprázdno.....	- 60 -
Obrázek 4-16: Proud naprázdno.....	- 60 -
Obrázek 4-17: Průběh momentů, při proměnné zátěži.....	- 61 -
Obrázek 4-18: Průběh statorového proudu, při proměnné zátěži.....	- 62 -
Obrázek 4-19: Průběh otáček motoru, při proměnné zátěži.....	- 63 -
Obrázek 4-20: Příkon motoru, při proměnné zátěži.....	- 63 -
Obrázek 4-21: Průběh ztrát ve statorovém vinutí, při proměnné zátěži.....	- 64 -
Obrázek 4-22: Momentová charakteristika – body .....	- 65 -
Obrázek 4-23: Momentová charakteristika – proložení.....	- 65 -
Obrázek 4-24: Frekvenční měnič – Simplorer .....	- 66 -
Obrázek 4-25: Výstupní sdružené napětí měniče.....	- 67 -
Obrázek 4-26: Rozložení magnetické indukce,při napájení z měniče v čase $t=175$ ms. -	67 -
Obrázek 4-27: Průběh proudů, při napájení z měniče.....	- 68 -
Obrázek 4-28: Průběh moment, při napájení z měniče .....	- 69 -
Tabulka 1: Vypočtené statorové hodnoty.....	- 19 -
Tabulka 2: Vypočtené rotorové hodnoty.....	- 20 -
Tabulka 3: Vypočtené magnetizační proudy.....	- 20 -
Tabulka 4: Vypočtené odpory vinutí.....	- 21 -
Tabulka 5: Vypočtené rozptylové reaktance .....	- 21 -
Tabulka 6: Výpočet ztrát.....	- 22 -
Tabulka 7: Hodnoty z kruhového diagramu.....	- 22 -
Tabulka 8: Magnetizační charakteristika M27_29G .....	- 48 -
Tabulka 9: Parametry výpočetní sítě.....	- 49 -
Tabulka 10: Hodnoty získané ze simulace motoru při jmenovitém zatížení .....	- 54 -
Tabulka 11: Hodnoty získané ze simulace motoru při chodu naprázdno .....	- 59 -
Tabulka 12: Hodnoty získané ze simulace motoru, při napájení z měniče.....	- 68 -
Tabulka 13: Porovnání vypočtených hodnot a hodnot ze simulace .....	- 71 -

## Seznam použitých značek

Značka	Veličina	jednotky
$\omega_1$	úhlová rychlost točivého pole	[rad/s]
$\omega$	úhlová rychlost rotoru	[rad/s]
$\omega_s$	úhlová rychlost rotoru vůči poli	[rad/s]
$f_s$	skluzový kmitočet	[Hz]
$s$	skluz	[-]
$U$	elektrické napětí	[V]
$U_{i1}$	indukované elektrické napětí statoru	[V]
$U_{i2}$	indukované elektrické napětí rotoru	[V]
$I$	elektrický proud	[A]
$I'_2$	přepočtená hodnota proudu rotoru	[A]
$N$	počet závitů	[-]
$m$	počet fází	[-]
$X_{1\sigma}$	kapacitní reaktance statoru	[ $\Omega$ ]
$X_{2\sigma}$	kapacitní reaktance rotoru	[ $\Omega$ ]
$k_v$	činitel vinutí	[-]
$\cos \varphi$	účinnost	[-]
$P_{im}$	elektromechanický výkon	[W]
$P_{el}$	elektrický výkon	[W]
$\Delta P_{j2}$	Jouleovy ztráty v rotoru	[W]
$P_\sigma$	výkon přenášený vzduchovou mezerou	[W]
$k_{jz}$	přídavný koeficient	[-]
$k_{zz}$	přídavný koeficient	[-]
$\eta$	účinnost	[%]
$L$	indukčnost	[H]
$k_h$	koeficient respektující hysterezní ztráty	[-]
$k_v$	koeficient respektující vířivé ztráty	[-]
$k_d$	koeficient respektující dodatečné ztráty	[-]
$M_z$	zátěžný moment	[Nm]

D	tlumení	[Wsec <sup>2</sup> /rad]
J	moment setrvačnosti	[kgm <sup>2</sup> ]
R	činný odpor	[Ω]
Z	impedance	[Ω]
B	magnetická indukce	[T]
Φ	magnetický tok	[Wb]
f	frekvence	[Hz]
P	činný výkon	[W]
S	zdánlivý výkon	[VA]
H	intenzita magnetického pole	[A/m]

## Úvod

Asynchronní stroje jsou v moderních elektrických pohonech používány jak v motorickém, tak v generickém provedení, mají využití v mnoha aplikacích. V posledních desetiletí jsou asynchronní motory nejrozšířenějším pohonem v trakci, neboť jsou ze všech motorů nejjednodušší, tedy výrobně nejlevnější, vyžadují malou údržbu a jsou velice spolehlivými motory. Použití asynchronních motorů v trakci bylo podmíněno použitím polovodičových měničů, díky kterým je možné přizpůsobit charakteristiky asynchronního motoru profilu trati a jízdnímu režimu.

Asynchronní motory s vnějším rotorem se nejčastěji využívají v praxi jako pohony radiálních ventilátorů s výkonem řádově stovky wattů. Použití motorů s vnějším rotorem v trakci je vhodné pro „In-wheel“ motory, tedy pro motory, které jsou zabudované uvnitř kola. Takto zabudované motory mají mnoho výhod, například nezávislé řízení jednotlivých kol a ušetření prostoru ve vozidle. Největší nevýhodou těchto motorů je vznikající teplo ve statoru, který je umístěn uvnitř stroje. Odvod ztrátového tepla je třeba řešit nuceným oběhem chladicího média.

Diplomová práce je rozdělena do šesti kapitol. V první kapitole bude seznámení se s programem ANSYS. V další kapitole budou vypočtené hodnoty asynchronního motoru a návrh motoru v RMxprt. Ve třetí kapitole bude návrh 3D modelu pomocí programu Electronics s použitím „User Defined Primitive“. Ve čtvrté kapitole se budou nacházet simulace vytvořeného modelu, simulace budou provedeny v programu Maxwell. V předposlední kapitole budou analyzována získaná data ze simulací a z výpočtů. V závěru budou zhodnoceny jednotlivé poznatky získané při tvorbě práce.

## 1 SW prostředí ANSYS

Jedná se o Americkou softwarovou společnost, založenou v roce 1970, sídlící ve státě Pensylvánie ve městě Canonsbrug, tato firma čítá téměř 3000 zaměstnanců a má síť partnerů ve více než čtyřiceti zemích světa. Společně se starají o podporu a servis zákazníků.

Společnost se zabývá simulačními softwary, které slouží k návrhu výrobku a následným simulacím, jak se bude výrobek chovat při reálných podmínkách. Tyto simulační metody se neustále vyvíjejí, aby odpovídaly současným požadavkům. [4]

Společnost nabízí velké množství výpočetního softwaru pro simulace, jako jsou například:

- ANSYS Fluent
- ANSYS Mechanical
- ANSYS Electromagnetics
- ANSYS Electronics
- ANSYS Multiphysics

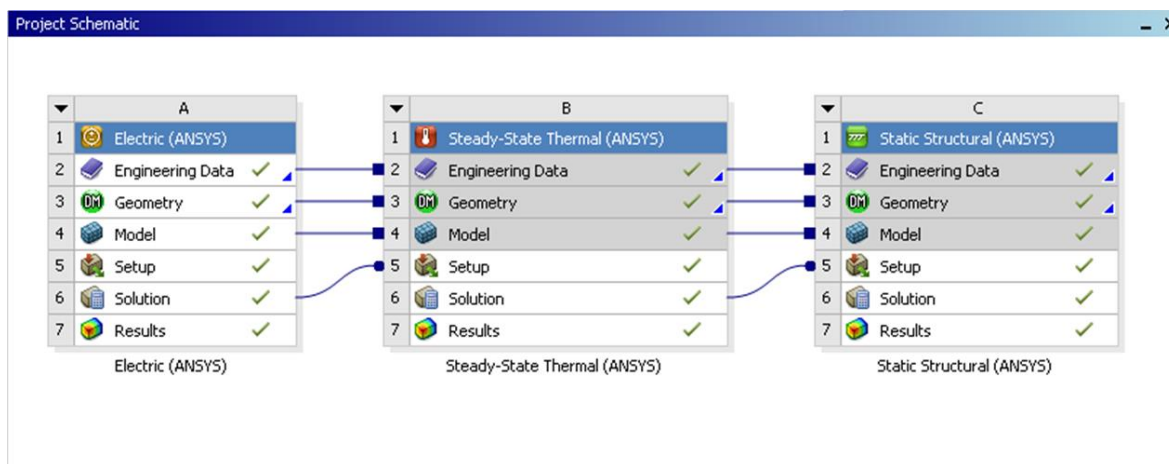
Tyto produkty se dále dělí na další podprogramy, pro mou práci je stěžejní ANSYS Electronics, ve kterém jsem simuloval asynchronní motor s vnějším rotorem.

Mezi další výpočetní programy, které stojí za zmínku, patří ANSYS Workbench, který umožňuje sdružovat široké spektrum pokročilých technologií použitých v simulačních programech od společnosti ANSYS, jako jsou ANSYS Fluent, ANSYS CFX, ANSYS Mechanical, ANSYS Maxwell a další. Tento program umožňuje uživateli vytvořit komplexní návrh produktu, například točivého stroje. [4]

Tento program odlišuje společnost ANSYS od konkurenčních společností, jedná se o bezkonkurenční software, většina výpočetních programů ostatních společností je schopná simulovat „pouze“ dílčí problematiku daného systému, kdežto ANSYS umožňuje, programem Workbench, vytvořit kompletní systém. Například při tvorbě modelu elektromobilu, lze vytvořit elektrický motor pomocí RMXprt, napájecí obvod pomocí Simploreru, chlazení elektrobaterii pomocí Fluent – Icepak, aerodynamiku pomocí Fluent a mnoho dalších dílčích problémů. [4]

Zajisté pro takovéto výpočty je nezbytná určitá výpočetní technika, výpočty složitějších úloh trvají až stovky hodin, proto se často volí zjednodušování modelu, které

dále vede ke zkreslení výsledků. Na Obrázek 1-1 je znázorněno propojení jednotlivých programů pomocí Workbench.



Obrázek 1-1: Prostředí Workbench

## 1.1 ANSYS Electronics

Pro mou práci jsem použil Electronics 17.0, protože se jednalo o nejnovější verzi dostupnou pro studenty v takzvané campus multilicenci určenou pro ČVUT.

V Electronics můžeme najít, pro návrh zařízení, tyto programy:

1. Nízkofrekvenční (návrh a analýza točivých i netočivých strojů a zařízení)
  1. Simplorer
  2. Maxwell
  3. RMXprt
  4. PExpert
  
2. Vysokofrekvenční (analýza elektronických, mikrovlnných a radiofrekvenčních zařízení)
  1. HFSS
  2. Q3D Extractor
  3. Slawe

Pro mou práci budu využívat nízkofrekvenční část, tedy zejména program Maxwell, RMXprt a Simplorer.

Pro dostatečné seznámení se s programem Electronics uvedu příklady použití jednotlivých programů.

**Simplorer:** je to simulační nástroj pro analýzu obvodových schémat, kde jsou zejména elektrické komponenty, ale i hydraulické, mechanické a tepelné komponenty. Tento program se může uplatnit například v průmyslové automatizaci a při návrhu elektronických systémů.

[4]

**Maxwell:** je program určený k simulaci nízkofrekvenčních elektromagnetických polí. Využívá se metoda konečných prvků (MKP), využívá se při optimalizaci zařízení, jako jsou například motory, transformátory, senzory, aktuátory a další. Umožňuje řešení magnetostatické a transientní úlohy. Tyto úlohy mohou být řešeny ve 2D a ve 3D. [4]

**RMxpert:** jedná se o program, který je výhradně určen k návrhu točivých elektrických strojů a k následné optimalizaci. Tento program je velice užitečný při optimalizaci elektrických strojů, například při volbě optimální velikosti vzduchové mezery. Použijeme proměnnou velikost vzduchové mezery, kde definujeme minimální, maximální hodnotu a krok s kterým se mezera bude zvětšovat, výsledkem simulace budou dané závislosti (účinnost, moment, výkon) při určité velikosti vzduchové mezery, z těchto závislostí snadno určíme, jaká velikost vzduchové mezery je optimální. [4]

**PExpert:** tento program je určen pro návrh a analýzu cívek a transformátorů, které se používají ve výkonové elektronice. Program využívá dostupné katalogové součástky pro optimální návrh simulovaného zařízení. Navržené zařízení se dá dále analyzovat pomocí MKP v softwaru Maxwell. [4]

**HFSS:** software pro řešení elektromagnetických polí ve 3D objektech a jejich vyzařování, využívá se při modelování zařízení, kde by mohlo docházet k elektromagnetickému rušení (EMI), řeší problémy signálové integrity. Používá se při návrhu antén, mikrovlnných součástek, vlnovodů a dalších. Je zde také využita MKP. [4]

**Q3D Extractor:** je nástroj pro extrakci obvodových parametrů, jako jsou například frekvenčně závislé rezistence, z elektrických 3D objektů, díky extrakci těchto parametrů můžeme definovat modely elektrických součástek. Tyto modely můžeme dále využít v obvodových simulátorech (Simplorer). [4]



**Slwave:** využívá se při řešení návrhu desek plošných spojů (DPS), používá se ke zvýšení spolehlivosti a delší životnosti DPS. Využívá se zde analýza signálové integrity a elektromagnetického rušení. Je zde opět použita MKP, tato metoda je doplněna o momentovou metodu, díky níž se počítá elektromagnetické pole mezi jednotlivými vrstvami. [4]

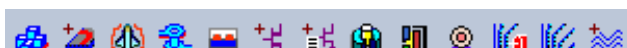
V tomto velice krátkém popisu, jsem se pokusil naznačit, jaké jsou možnosti použití softwaru Electronics, poukázal jsem na programy, které jsou nejvíce využívány. Popsání všech výpočetních programů od společnosti ANSYS přesahuje rozsah této práce, pro mou práci je stěžejní program Electronics, který jsem využil k návrhu asynchronního motoru s vnějším rotorem. [4]

### 1.1.1 Vývojové prostředí ANSYS Electronics 17.0

Studenti ČVUT FEL mají možnost využívat programy společnosti ANSYS v takzvané multilicenci pro vysoké školy (campus licence), tato licence je přístupná, pouze když je student připojen přes server ČVUT (přes síť Eduroam), kde jsou licence povoleny. To však znamená, že student může pracovat pouze v budovách školy, popřípadě v místech, kde ČVUT FEL poskytuje svou bezdrátovou síť, problém nastává při spuštění simulací. Některé simulace trvají řádově hodiny, proto bylo nezbytné, tento problém s přístupem k síti vyřešit. Jedním z řešení bylo využít program VPN Client, který umožňuje vzdálený přístup do sítě ČVUT. Bohužel tato varianta, byla přístupná pouze zaměstnancům školy. Tento problém jsem spolu se svými kolegy řešil s panem Hulínským (správce sítě FEL), který byl velice ochotný a pomohl nám vyřešit tento problém. Vytvořil pro studenty vzdálený přístup pomocí OpenVPN, kterým se podařilo připojit k síti ČVUT. Toto propojení bylo nedílnou součástí k vytvoření mého modelu a následné simulaci.

Toto bezpečnostní opatření společnosti ANSYS je na místě, protože cena softwaru, který se ve škole používá v rámci školní multilicenci, se pohybuje ve statisícových částkách.

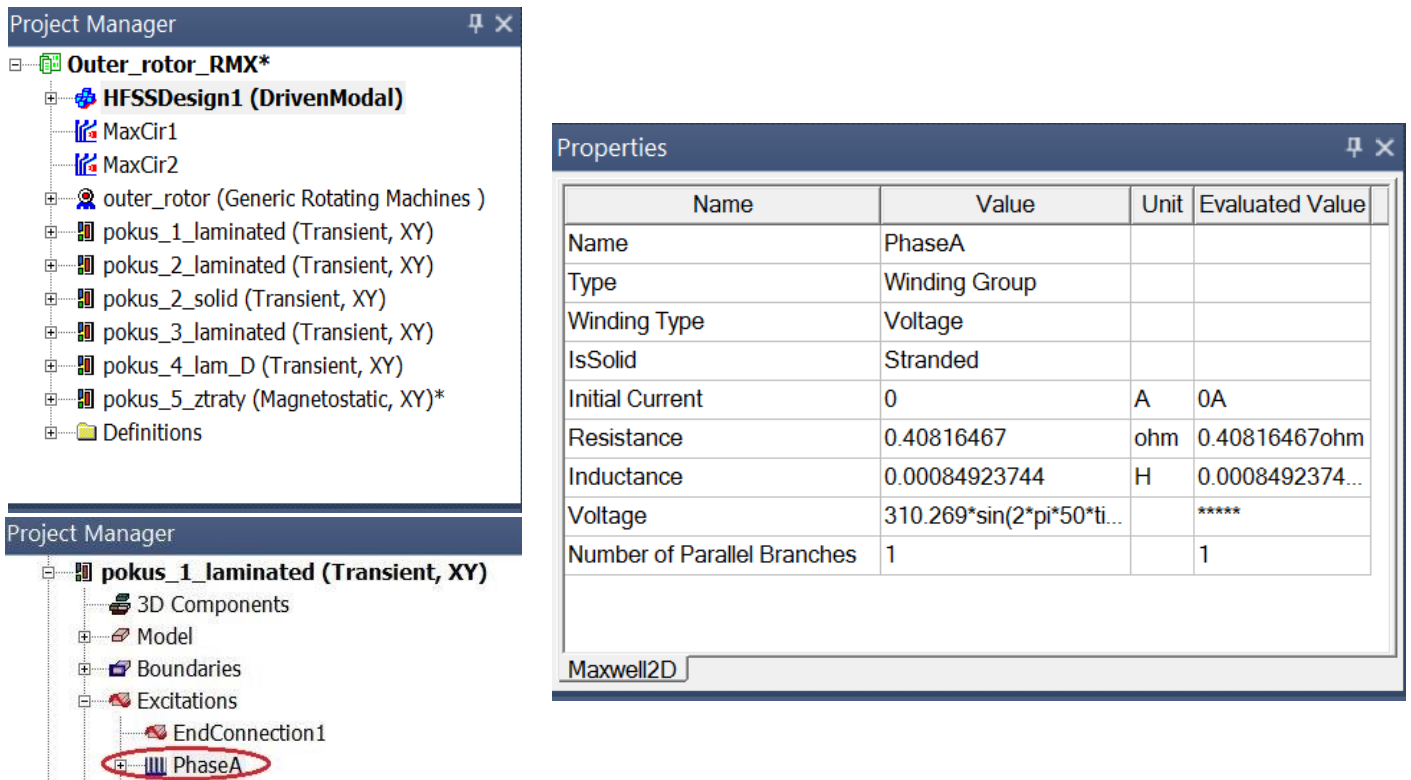
Samotné vývojové prostředí Electronics je poměrně jednoduché a pro uživatele je „přátelské“. Po spuštění programu si volíte viz. Obrázek 1-2, jakou problematiku hodláte řešit (RMxpvt, Maxwell, HSFF), po zvolení daného programu se vytvoří v sekci „Project



Obrázek 1-2: Volba řešiče

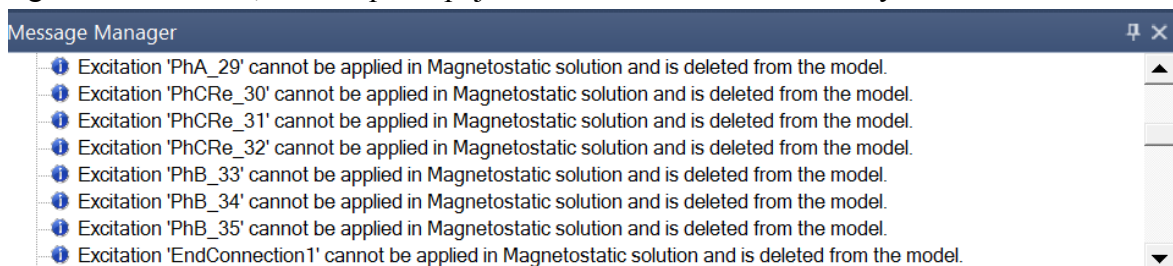
Manager“ daný design. ANSYS využívá v Project Manageru „tree structure“ kde se dají velice jednoduchým způsobem otevřít jednotlivé úlohy, které se nacházejí uvnitř projektu. Tato struktura je velice přehledná a napomáhá při práci s jednotlivými designy v projektu.

Další částí je sekce „Properties“, kde se dají nalézt hodnoty (jméno, typ, indukce), které odpovídají právě zvolenému design v Project Manageru, v Properties je možné Přepisovat staré hodnoty za nové, popřípadě měnit jednotky. Na Obrázek 1-3 je zobrazené prostředí Electronics.



Obrázek 1-3: Pracovní prostředí Electronics

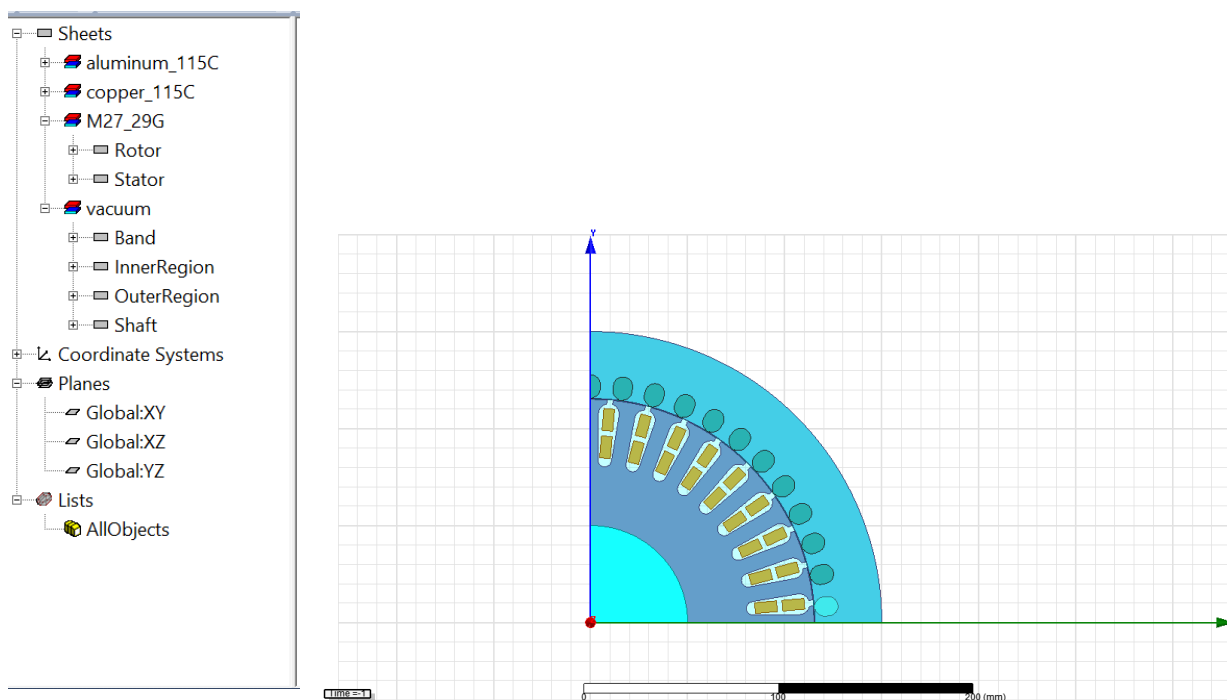
Nedílnou součástí je „Message Manager“ kde se zobrazují jednotlivá hlášení, jako jsou například: upozornění na nedostatečnou výpočetní síť, chybová hláška při nevhodné geometrii modelu, hlášení při odpojení od sítě a další. Jedná se tedy o informativní okno.



Obrázek 1-4: Message Manager

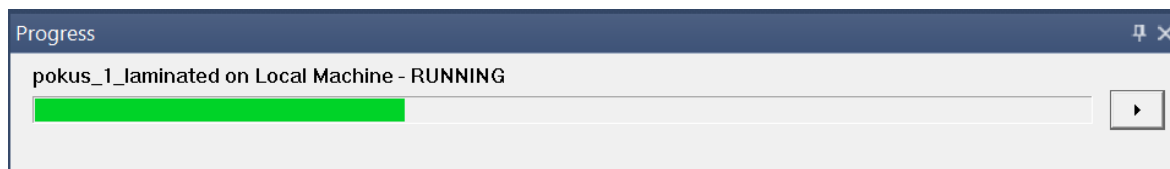
Při práci s modelem využíváme okno „History tree“ kde nalezneme všechny objekty v projektu, toto okno je uspořádané podobně, jako Project Manager. V „History tree“ můžeme například měnit materiálové vlastnosti a označovat objekty, kterým následně můžeme přiřadit vlastnosti, například „Motion setup“.

Pracovní plochou při tvorbě, popřípadě úpravě modelu, se nachází na pravé straně obrazovky a dominuje této části, můžeme zde pracovat s modelem, pro lepší orientaci je zde k dispozici systém os x,y,z a aktuální měřítko ve kterém se nachází model, viz. Obrázek 1-5.



Obrázek 1-5: Pracovní plocha Electronics

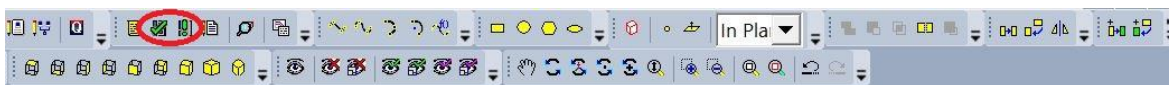
Posledním oknem, které můžeme v Electronics najít je „Progress“, který slouží k oznámení aktuálního stavu při simulaci, zobrazuje tedy v jaké části se simulace nachází, například jestli se vytváří výpočetní síť nebo v jakém kroku se nachází transientní úloha.



Obrázek 1-6: Progress window

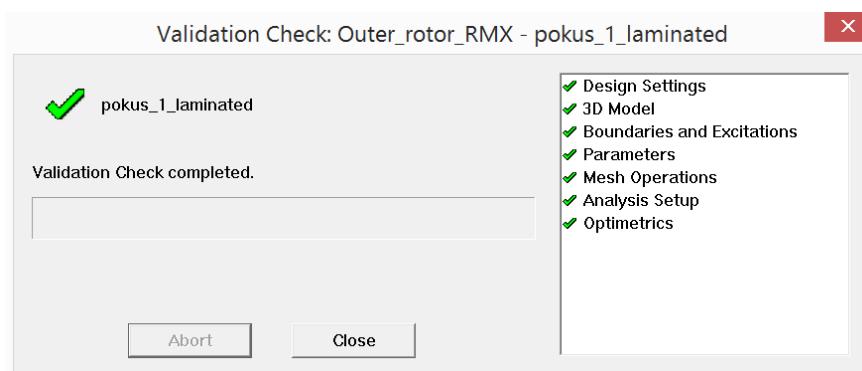
Pro práci s modelem nám dále pomáhá panel nástrojů, který se nachází v horní části obrazovky. Můžeme zde provádět operace typu: sjednotit, rozdělit otočit, vytvářet objekty,

natáčet model a mnoho dalších úkonů. Nachází se zde i dvě tlačítka, která slouží pro validaci modelu a spuštění analýzy modelu, které jsou znázorněné na Obrázek 1-7.



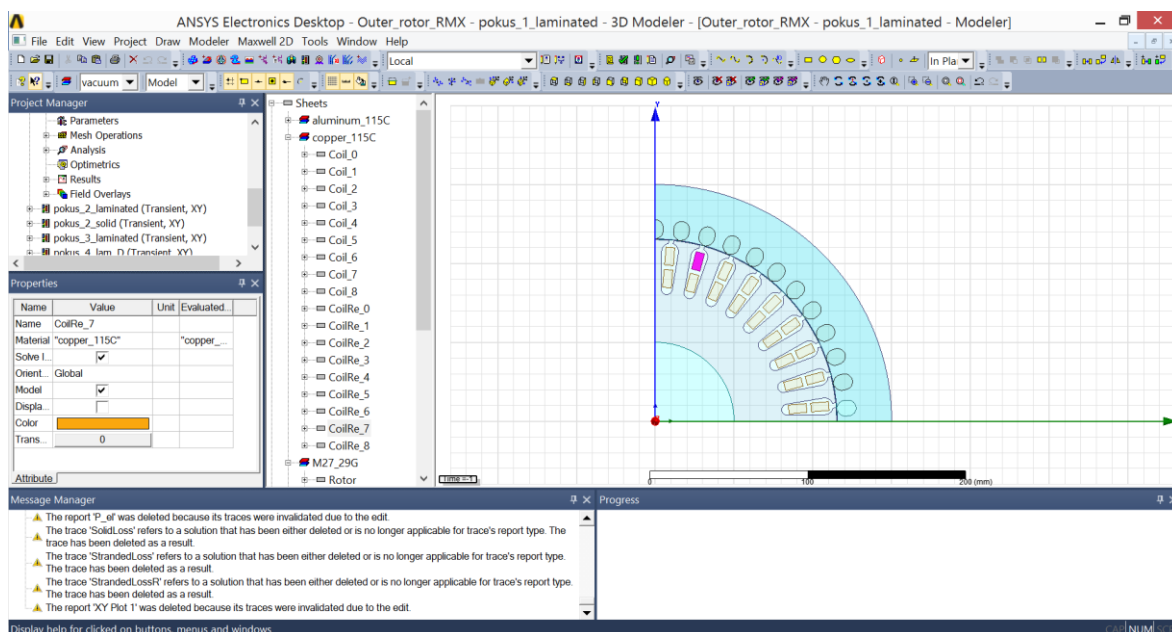
Obrázek 1-7: Panel nástrojů

Validace modelu slouží ke kontrole jednotlivých částí, úspěšná validace je zobrazena na Obrázek 1-8.



Obrázek 1-8: Validace modelu

Rozložení všech objektů v programu Electronics je zobrazené na následujícím Obrázek 1-9.



Obrázek 1-9: Prostředí Electronics

### 1.1.1.1 Vytváření a úprava modelů v Electronics

Při vytváření modelů, elektrických strojů v nízkofrekvenční části, budeme využívat program Maxwell. U tohoto programu je zapotřebí vybrat typ řešení, proto je důležité, aby si uživatel uvědomil, co od modelu čeká. Typy řešení jsou v oblasti **magnetického pole**: magnetostatický řešič, transientní řešič a řešič vířivých proudů. Dále v oblasti **elektrostatického pole** jsou to řešení: Elektrostatická úloha, střídavá napájení a stejnosměrná napájení. Všechny typy úloh se dají řešit ve 3D a ve 2D zobrazení.

Při návrhu elektrického točivého stroje, používáme nejčastěji, magnetostatický a transientní řešič. Je vhodné vytvořit nejprve magnetostatický řešič, protože nám napoví o navrženém modelu (využití magnetického obvodu stroje, uzavírání magnetického toku), tento řešič je méně časově náročný než úloha transientní, protože simulace je provedena v definovaný okamžik, kdežto transientní úloha řeší přechodný děj, který může trvat až několik sekund. Obecně by se dalo říci, že magnetostatická úloha trvá v řádech desítek minut a transientní úloha v řádech hodin, bude samozřejmě záležet na složitosti modelu a na zadané době přechodného děje.

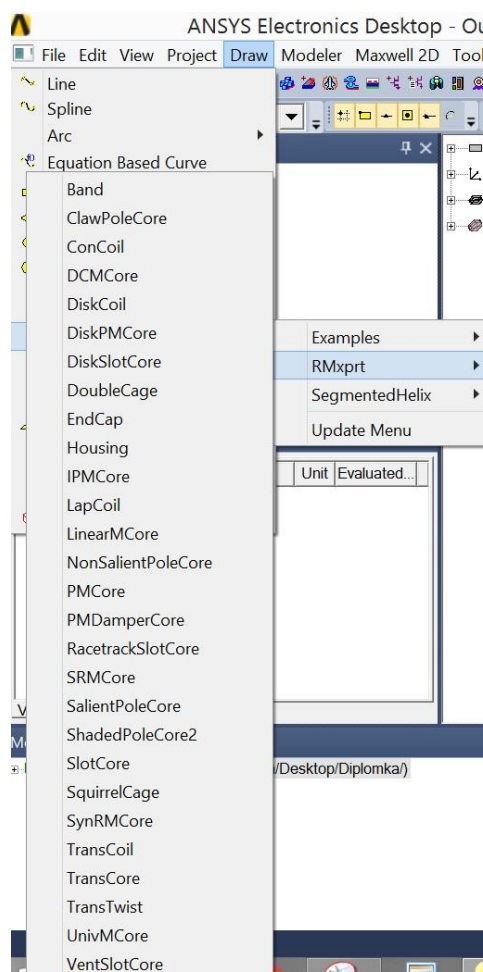
Po zvoleném typu úlohy je zapotřebí vytvořit model, který bude simulován. Pro vytvoření modelu můžeme využít funkci „import“, kde se nabízí možnost importování z programů AutoCAD, Cadence, LeadFrame a mnoho dalších. Tato metoda je vhodná pro analýzu modelů, které byly dříve vytvořeny v programech typu CAD.

Nejjednodušším způsobem, jak vytvořit model točivého elektrického stroje je za použití RMXprt, kde je nabídka 13 předdefinovaných motorů (asynchronní motor, BLDC, DC, SRM). Jedná se o „šablony“ do kterých vložíme požadované parametry, jakožto jsou: výkon motoru, napájení, typ vinutí, ventilační ztráty a mnoho dalších parametrů. U některých parametrů můžeme zvolit „Auto design“ kde se například velikost drážky určí automaticky a uživatel nemusí znát její rozměry. V nabídce je 13 možností, kde 12 z nich jsou přímo dané typy motorů a jedna z možností „Generic Rotation Machine“ umožňuje uživateli vytvářet modely motorů, které nejsou předdefinované (nejsou časté), například při vytváření modelů motorů s vnějším rotorem.

Po zvolení typu motoru, vyplnění všech požadovaných hodnot a úspěšné validaci modelu spustíte simulaci, která v RMXprt trvá pouze několik minut, z této simulace získáte užitečná data, jako jsou například: ztráty ve vinutí, činitel plnění drážky, proud v dané fázi, celkový výstupní výkon, otáčky stroje a mnoho dalších. Dále z této simulace získáte

závislosti momentu na otáčkách, účinnosti na otáčkách a další. Všechny tyto parametry mohou sloužit k optimalizaci modelu (změna velikosti vzduchové mezery, použitý materiál, velikost činitele plnění) Získaná data z RMXprt jsou uvedena v příloze na stranách 76 až 80. Po optimalizaci modelu může uživatel dále pokračovat v simulacích v programu Maxwell, z modelu vytvořeného v RMXprtem lze vygenerovat 2D nebo 3D model. V Maxwellu, vytvořený model je plnohodnotný a nastavený pro simulace, nevytvorí se celý model, ale jen část modelu „Fraction“, tak aby byla dodržena funkčnost modelu. Například u asynchronního modelu je vytvořen 1/4 řez motoru, proto aby byl model, pokud možno co nejjednodušší pro výpočty.

Další možností, jak vytvořit model je pomocí „User Defined Primitive – RMXprt“ (UDP) tato funkce se nachází v kontextovém menu pod záložkou „Draw“ jedná se o předdefinované objekty, které lze libovolně volit a upravovat, tato možnost je vhodná při realizaci elektrických strojů, které mají netradiční uspořádání, výběr jednotlivých částí UDP je na Obrázek 1-10.



Obrázek 1-10: User Defined Primitive

Touto metodou je vytvořen kompletní 3D model, který je vhodný pro vizualizaci, nikoli pro výpočty. Pro většinu simulací volíme simulace ve 2D z důvodu časové náročnosti simulací. 2D model vytvoříme velice jednoduše, tím že ze 3D modelu uděláme řez v ose Z.

Maxwell umožňuje uživateli vytvořit model, také pomocí geometrických objektů (čtverec, obdélník, kvádr, úsečka), tímto způsobem, by šlo jen těžko vytvořit například model asynchronního stroje. Tato možnost se využívá pro jednodušší konstrukce (jádro transformátoru ve 2D), nebo spíše při práci s hotovým modelem, kde se používá při označování částí objektů pro motion setup a pro mnoho dalších operací.

Po vytvoření modelu pomocí UDP, popřípadě pomocí geometrických objektů, musíme definovat (ohraničit) prostor kolem modelu, aby byla přesně definována hranice výpočtů, respektive se ohraničí prostor, kde bude vytvořena výpočetní síť. Výpočetní síť je vytvořena uživatelem nebo je vytvořena pomocí generátoru výpočetní sítě, kde je využito autoadaptivní proces tvorby sítě s možností lokálního zjemnění. Maxwell využívá pro výpočty simulací Metodu Konečných Prvků (MKP). Vytvořená výpočetní síť slouží k diskretizaci Maxwellových rovnic na rovnice algebraické. Díky tomu, že je využita autoadaptivní síť, tak dochází ke zpětné kontrole, po provedení výpočtu se program pokusí provést zpětnou rekonstrukci, je-li tento pokus úspěšný, síť je vyhovující, nevyhoví-li síť dochází automaticky k jejímu zjemnění. Tato možnost generování autoadaptivní sítě je velice užitečná při práci se složitými modely, po provedení simulací je možné zobrazit vytvořenou výpočetní síť. Autoadaptivní síť je možné využít pouze u magnetostatického řešiče.

Výše byly popsáno důvody pro ohraničení místa výpočtu, tato operace se provede pomocí funkce „Create region“ kde zadáme o kolik milimetrů (nebo procent) bude vytvořený region větší než model, který chceme spočítat. Ohraničení pomocí funkce region je vhodné při práci s celým modelem. Při vytváření částečného modelu musíme přidat ohraničení pomocí vektorů, které nastavíme, jako vektory „Master“ a „Slave“. Tyto vektory vycházejí ze stejného bodu a ohraničují okraj modelu, v případě 1/4 modelu, vektory svírají mezi sebou 45°. Nastavení regionu, popřípadě nastavení vektorů patří do sekce nastavení „Boundaries“.

V sekci „Mesh Operation“ je možné upravit velikost výpočetní sítě. Velikost výpočetní sítě se volí jemnější v oblastech, na rozhraní dvou materiálů. Nastavení rozměrů výpočetní sítě je uvedeno v Tabulka 9.

Nezbytnou částí modelu je „Excitations“ jedná se o napájení, zde bude rozhodující, o jaký typ (Transient, Magnetostatic) půjde. Obecně máme na výběr mezi proudovým buzením, napěťovým buzením a buzením z vnějšího obvodu.

Proudové buzení můžeme využít, jak u magnetostatického řešiče, tak i u transientního. V magnetostatické úloze nastavíme (označíme) objekty, kterými chceme nechat procházet proud, v případě asynchronního motoru se bude jednat o statorové vinutí, dále nastavíme velikost proudu vinutím. Velikost proudu se nastavuje jako „ampéřzávity“ to z toho důvodu, že se nedá nastavit počet vodičů v drážce, kdežto u transientní úlohy máme možnost vytvořit sekce vinutí, které bude napájené námi zadanou funkcí (typické zadání je rovnice pro okamžitou hodnotu proudu). Do tohoto vinutí přiřadíme vybrané cívky, kterými bude současně procházet proud, zde je možnost nastavení počtu vodičů v cívice a zároveň směr toku proudu.

Nastavení vinutí se provádí v transientních úlohách, kde vytvoříme vinutí a dále určíme způsob napájení (napěťové, proudové a vnější), určíme hodnoty napájení (typicky funkcí), dále vyplníme hodnoty odporu a indukčnosti vinutí. K takto vytvořenému vinutí musíme přiřadit objekty (cívky) které budou tímto vynutím napájené. V cívkách se nastavují parametry: počet vodičů a směr průchodu proudu.

Další možností, je nastavení proudové hustoty, toto nastavení je shodné pro transientní a magnetostatické úlohy. Proudová hustota se nastavuje v základních jednotkách ( $A/mm^2$ ).

Jednou z možností, jak napájet model je z externího obvodu, tento obvod může být vytvořen pomocí programu Simplorer, kde můžeme vytvořit například měnič nebo jiný typ napájení, můžeme také použít externí obvod pro omezení velikosti proudu a tak dále. V programu Simplorer můžeme využít možnosti importu z jiných programů (Simulinku).

Poslední možností, jak nastavit buzení je vytvoření permanentních magnetů, tento způsob buzení je využit zejména u synchronních motorů, které místo budícího vinutí využívají permanentní magnety pro vytvoření magnetického toku.

V sekci Excitations je možnost zvolit „End Connection“ jedná se o spojení nakrátko, praktické využití má ve 2D modelu u rotorového vinutí asynchronního motoru s klecí nakrátko, z důvodu, absence kruhu nakrátko, tedy ve 2D modelu nejsou rotorové tyče spolu spojeny. Z tohoto důvodu se volí End Connection, kde se nastaví hodnota odporu spojení.



Při simulaci motoru je nezbytné nastavit „Motion Setup“, toto nastavení se nachází pod složkou „Model“. Pro toto nastavení je nezbytné nejprve přesně označit pohyblivé a nepohyblivé části. Tyto části se nastaví pomocí základních geometrických obrazců (kruh, mezikruží), vytvořené obrazce musejí být větší než pohybující se části, objekty nesmějí zasahovat do žádných jiných částí a obrazců. Tato podmínka musí být bezpodmínečně splněna, proto aby bylo možné spustit výpočet simulace. Po vytvoření objektu musíme zvolit typ pohybu (translační, rotační). Translační pohyb bude nastaven například pro lineární motory, kdežto rotační pohyb bude nastaven pro většinu elektrických motorů, u rotačního pohybu dále nastavíme, osu, podél které se bude rotor otáčet. Nejdůležitějším nastavením Motion Setup je nastavení „Mechanical“ v této části se zadávají jmenovité otáčky motoru, velikost momentu setrvačnosti, tlumení motoru a zatěžovací moment. Vhodným nastavením Mechanical je možné simulovat rozběh motoru, přímým připojením na napájecí síť. tato problematika je více řešena v kapitole 4.3 Simulace motoru.

## 2 Návrh asynchronního motoru s vnějším rotorem

Pro návrh tohoto typu motoru lze využít návrhový modul RMXprt, kde zvolíme typ motoru „Generic Rotating Machine“ (GRM). Tento způsob návrhu je uživatelsky nejjednodušší a nejrychlejší, pro vytvoření modelu stačí zadat požadované rozměry a jmenovité hodnoty stroje. Nevýhodou tohoto návrhu je absence výsledků „Solution Data“, která nejsou dostupná pro tento typ motru.

Další možností, jak vytvořit asynchronní motor s vnějším rotorem je pomocí UDP, takto můžeme vytvářet libovolné konstrukce motorů. Tato metoda se hodí pro „netradiční“ konstrukce motorů. Do této kategorie spadá i asynchronní motor s vnějším rotorem.

### 2.1 Třífázový asynchronní motor

Princip činnosti asynchronního motoru je založen na vzájemném působení magnetického točivého pole statoru a proudů, které se tímto polem indukují v rotoru.

Do rotoru se indukují proudy a napětí vlivem točivého magnetického pole, pouze za podmínky, že rychlost rotoru není rovna rychlosti točivého magnetického pole. Rychlost rotoru musí tedy být asynchronní. Při synchronních otáčkách se do rotoru neindukuje napětí a neprotéká žádný proud, motor má nulový moment.[5]

V rotoru se při rozběhu indukují napětí, které v uzavřené smyčce vyvolá proudy. Vzájemným působením proudů a točivým polem statoru vzniká moment. Tento moment působí proti příčině, která ho vyvolala, tedy proti vzájemnému pohybu pole statoru a klece (vodičů) na rotoru. Rotor se tedy začne otáčet ve směru otáčení pole statoru, tím se začne zmenšovat velikost indukovaného napětí a jím vyvolaných proudů. U asynchronního motoru nemůže dojít k synchronním otáčkám (nulový moment) ani při chodu naprázdno. Při chodu naprázdno je hřídel motoru zatížena ztrátami, především se jedná o ztráty třením v ložiscích a o ventilační ztráty. [5]

Pro další práci s asynchronním motorem je nezbytné určit vybrané pojmy:

1. Úhlová rychlost točivého pole při frekvenci  $f_1$  a počtu pólových dvojic  $p$ :

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (1)$$

2. Úhlová rychlost rotoru:

$$\omega = (1 - s) \cdot \omega_1 \quad (2)$$

3. Úhlová rychlost rotoru oproti točivému poli:

$$\omega_s = \omega_1 - \omega = s * \omega_1 \quad (3)$$

4. Skluz:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (4)$$

5. Skluzový kmitočet:

$$f_s = s * f_1 \quad (5)$$

### 2.1.1 Napěťové rovnice asynchronního motoru

Tyto rovnice vycházejí z teorie o transformátoru, protože asynchronní motor využívá indukovaného napětí stejně jako je tomu u transformátoru. U motoru máme statorové a rotorové vinutí. Tato vinutí jsou navzájem magneticky vázána (magnetickým obvodem se vzduchovou mezerou). [5]

Napěťové rovnice pro vícefázový (souměrný) asynchronní motor se stojícím rotorem pro stator a rotor jsou:

$$\widehat{U}_1 = R_1 * \widehat{I}_1 + jX_{1\sigma} * \widehat{I}_1 + \widehat{U}_{i1} \quad (6)$$

$$\widehat{U}_{i2} = R_2 * \widehat{I}_2 + jX_{2\sigma} * \widehat{I}_2 + \widehat{U}_2 \quad (7)$$

Tyto rovnice odpovídají rovnicím pro jednofázový transformátor pro vstupní a výstupní vinutí.

Pro indukovaná napětí v jedné fázi rozloženého vinutí platí:

$$U_i = 4,44 * \phi * f * N * k_v \quad (8)$$

Pro indukovaná napětí statoru a rotoru platí:

$$U_{i1} = 4,44 * \phi_\mu * f_1 * N_1 * k_{v1} \quad (9)$$

$$U_{i2} = 4,44 * \phi_\mu * f_2 * N_2 * k_{v2} \quad (10)$$

Z rovnic vyplývá, že indukovaná napětí jsou úměrná počtu závitů ve fázi.

Uvedené rovnice platili pro stojící rotor, při urychlování rotoru se začne měnit úhlová rychlost rotoru, to vede ke změně skluzu  $s$ , protože úhlová rychlost pole statoru je konstantní. Tato změna vede i ke změně kmitočtu proudu v rotoru viz. rovnice (5). [5]

Pro napěťové rovnice statoru se nic nemění, tyto změny se projeví u rotorových rovnic:

$$s * \widehat{U}_{i2} = R_2 * \widehat{I}_2 + sjX_{2\sigma} * \widehat{I}_2 \quad (11)$$

Velikost  $U_2$  je nulová pro rotor nakrátko. Indukované napětí má skluzový kmitočet, proto je vhodné upravit rovnici, aby indukované napětí mělo frekvenci  $f_1$ . [5]

$$\widehat{U}_{i2} = R_2 * \widehat{I}_2 + jX_{2\sigma} * \widehat{I}_2 + \widehat{U}_2 + \frac{1-s}{s} * R_2 * \widehat{I}_2 \quad (12)$$

### 2.1.2 Náhradní zapojení asynchronního motoru

Náhradní schéma je odvozeno z napěťových rovnic (6) a (12), opět je zde analogie s náhradním schématem popisující transformátor, rozdílné je uspořádání jednotlivých vinutí, toto je respektováno činitelem vinutí  $k_v$ . [5]

#### Přepočít parametrů náhradního zapojení, základní podmínky:

1. Rotorové vinutí nahradíme vinutím, které má  $N_2 = N_1$  závitů, stejný počet fází  $m_2 = m_1$  a  $k_{v2} = k_{v1}$
2. Výsledný přepočít nesmí mít vliv na statorovou část motoru.
3. Energetické poměry musejí zůstat stejné i po přepočtu ( $\Delta P = \text{konstantní}$ )

Tyto podmínky budou splněny, pokud se nezmění výsledný magnetický tok  $\phi_\mu$ . Tok se nezmění, jestliže se po přepočtu nezmění magnetomotorické napětí ( $F'_2 = F_1$ ), které tok vyvolává, proto musí platit, tyto rovnice:

$$F_m = F_1 + F_2 \quad (13)$$

Rovnice pro magnetomotorické napětí (první harmonické), m – fázového vinutí:

$$F_{m1} = \frac{m}{2} * \frac{2\sqrt{2}}{\pi} * \frac{N * I * k_{v1}}{p} = 0,45 * \frac{m}{p} * N * I * k_{v1} \quad (14)$$

Z rovnice (14) a z předpokladu pro přepočít magnetomotorického napětí musí platit:

$$0,45 * \frac{m_1}{p} * N_1 * I'_2 * k_{v1} = 0,45 * \frac{m_2}{p} * N_2 * I_2 * k_{v2} \quad (15)$$

Tuto rovnici použijeme pro přepočít proudů:

$$I'_2 = I_2 * \frac{m_2 * N_2 * k_{v2}}{m_1 * N_1 * k_{v1}} \quad (16)$$

Pro přepočít napětí budeme vycházet z předpokladu, že přepočtené indukované napětí v rotoru má být stejně velké jako indukované napětí ve statoru. Odvození vyplývá z rovnic (9) a (10) [5]

$$U_{i1} = U'_{i2} = U_{i2} * \frac{N_1 * k_{v1}}{N_2 * k_{v2}} \quad (17)$$

V náhradním zapojení se nachází činný odpor a rozptylová reaktance, činný odpor je odvozen z předpokladu, že přepočtený odpor způsobí stejné Joulovi ztráty ve vinutí rotoru (kleci) jako původní činný odpor:

$$m_1 * I'_2 * R'_2 = m_2 * I_2 * R_2 \quad (18)$$

Úpravou získáme:

$$R'_2 = R_2 * \frac{m_2}{m_1} * \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 = R_2 * \frac{m_1}{m_2} * \left(\frac{N_1 * k_{v1}}{N_2 * k_{v2}}\right)^2 \quad (19)$$

U rozptylové reaktance musí být splněna podmínka, že přepočtená hodnota reaktance nesmí mít vliv na stator motoru, musí tedy zůstat stejné činné a jalové složky impedancí

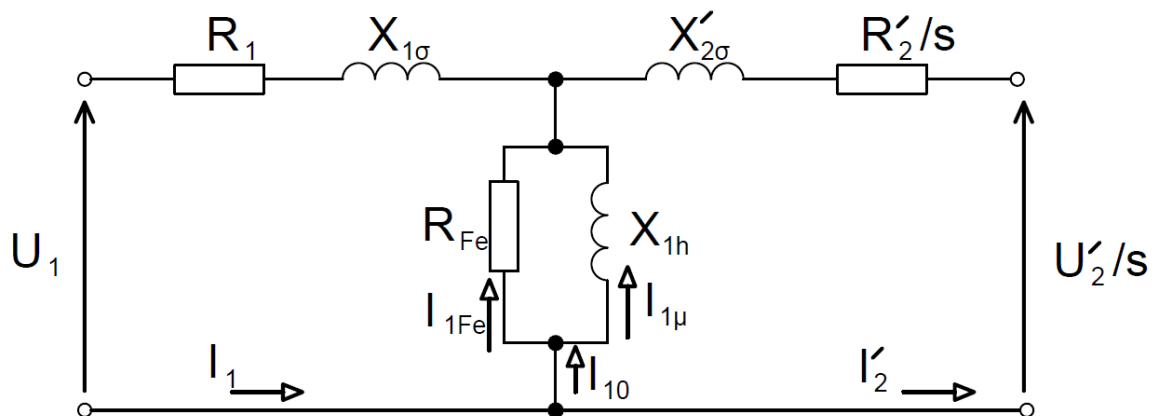
$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} * \frac{m_2}{m_1} * \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 = X_{2\sigma} * \frac{m_1}{m_2} * \left(\frac{N_1 * k_{v1}}{N_2 * k_{v2}}\right)^2 \quad (20)$$

Tyto výše přepočtené hodnoty použijeme pro popsání náhradního zapojení asynchronního motoru, napěťová rovnice pro stator bude stejná (6) pro rovnici rotoru platí:

$$\widehat{U}'_{i2} = \frac{R'_{i2}}{s} * \widehat{I}'_2 + jX'_{i2\sigma} * \widehat{I}'_2 = R'_2 * \widehat{I}'_2 + jX'_{2\sigma} * \widehat{I}'_2 + \frac{1-s}{s} * R'_2 * \widehat{I}'_2 \quad (21)$$

Tato rovnici je pro klecové vinutí rotoru, proto zde není člen  $U'_2$ , který je pro klecové vinutí rotoru (nakrátko) nulový. [5]

Přepočtené hodnoty a z nich odvozené napěťové rovnice slouží k vytvoření náhradnímu zapojení stroje viz. Obrázek 2-1. Odpor  $R_{Fe}$  představuje statorové ztráty v železe. [5]



Obrázek 2-1: Náhradní zapojení asynchronního stroje [5]

### 2.1.3 Výkonová bilance a moment asynchronního stroje

Pro posuzování motorů je velice důležitá velikost momentu a přeměněného výkonu

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + \frac{1-s}{s} * R'_2 \quad (22)$$

V této rovnici je prvním členem na pravé straně velikost přepočteného odporu rotorového vinutí, tato hodnota odpovídá Joulovým ztrátám ve vinutí rotoru. Druhý člen pravé strany odpovídá přeměňovanému elektromechanickému výkonu. Pro třífázový motor je přeměněný elektromechanický výkon roven: [5]

$$P_{im} = \frac{1-s}{s} * (\Delta P_{j2} - P_2) \quad (23)$$

Rozdíl výkonů v závorce odpovídá velikosti elektrického výkonu v rotorovém obvodu motoru  $P_{el}$ . [5]

Velice důležitým parametrem motoru je velikost vnitřního elektromagnetického momentu, který odpovídá poměru přeměněnému elektromechanickému výkonu ku úhlové rychlosti mechanické

$$M_i = \frac{P_{im}}{\omega_m} = \frac{1}{\omega_{1m}} * \frac{P_{el}}{s} \quad (24)$$

Z této rovnice plyne velikost výkonu přeneseného vzduchovou mezerou:

$$P_\sigma = M_i * \omega_{1m} = \frac{P_{el}}{s} \quad (25)$$

Po úpravách výše uvedených rovnic, dostaneme rovnici, z které je patrné, že velikost přenášeného výkonu vzduchovou mezerou v závislosti na skluzu se dělí na  $P_{im}$  a na  $P_{el}$ , který je daný velikostí Joulových ztrát v rotorovém vinutí (pro kotvu nakrátko). [5]

$$P_\sigma = P_{im} + P_{el} = (1 - s) * P_\sigma + P_{el} \quad (26)$$

## 2.2 Vypočet asynchronního motoru

Pro návrh motoru a jeho následnou kontrolu jsem provedl analytický výpočet motoru, při výpočtech jsem postupoval dle lit. [3]

### Stator:

V Tabulka 1 jsou uvedeny vypočtené hodnoty statoru, na prvním řádku je vnitřní výkon motoru, který byl vypočten při účinnosti 89 % a účinníku 0,9.

Na řádku číslo 5. je činitel zkrácení kroku. U dvouvrstvého vinutí se vhodným zkrácením kroku omezí vyšší harmonické. Krok byl zkrácen na 7/9, toto zkrácení omezuje vyšší harmonické 5 a 7. [3] [9]

V šestém řádku se nachází činitel rozlohy vinutí, vinutí statoru je vkládané do několika sousedních drážek po obvodu statoru. Tímto činitelem se sníží počet vyšších harmonických.

Činitel vinutí je dán součtem řádku 5. a 6. velikost činitele vinutí ovlivňuje počet harmonických ve vzduchové mezeře. Tento činitel uvažuje snížení indukovaného napětí ve fázi vinutí elektrického stroje, uloženého v drážkách. V porovnání s napětím, které by se indukovalo ve vinutí se stejným počtem závitů, ale při plném kroku, rovným pólové rozteči, jež by bylo soustředěno do jedné cívky. Velikost činitele je 0,902. [9]

Velikost fázového proudu je uvedena na řádku 9. tato hodnota je o 6,5 % nižší než hodnota získaná ze simulace při jmenovitém chodu, viz kapitola 4.3.1.

1.	Vnitřní výkon	$P_i$ (kVA)	18,16
2.	Pólová rozteč	$\tau_p$ (mm)	180,64
3.	Drážková rozteč	$\tau_{ds}$ (mm)	20,07
4.	Pólová rozteč v počtu drážek	$Q_p$	9
5.	Činitel kroku	$k_{vy}$	0,939
6.	Činitel rozlohy	$k_{vr}$	0,959
7.	Ideální délka statoru	$l_i$ (m)	0,123
8.	Štíhlostní poměr	$\lambda$	0,68
9.	Fázový proud	$I_f$ (A)	27,1
10.	Průřez dílčího vodiče	$s_1$ (mm <sup>2</sup> )	1,74
11.	vodič Cu	d (mm)	1,537
12.	Průřez vodiče	$s_{1Cu}$ (mm <sup>2</sup> )	1,85
13.	Skutečná proudová hustota	$J_s$ (A/mm <sup>2</sup> )	4,88
14.	Počet efektivních vodičů v drážce	Vd1	24
15.	Počet závitů	N1	144
16.	Mag. tok ve vzduch. mezeře	$\phi$ (Wb)	0,0079
17.	Mag. indukce ve vzduch mezeře	$B_\Delta$ (T)	0,546
18.	Celkový počet vodičů v drážce	Vd	72
19.	Volná plocha drážky	sd1 (mm <sup>2</sup> )	264,3
20.	šířka zubu pro dané B	$b_{zs}$ (mm)	6,98
21.	Mag. Indukce v zubech	$B_{zs}$ (T)	1,49
22.	Maximální indukce ve jhu statoru	$B_{js}$ (T)	1,05
23.	velikost vzduchové mezery	$\Delta$ (mm)	0,5

**Tabulka 1: Vypočtené statorové hodnoty**

**Rotor:**

V Tabulka 2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty rotoru. Počet drážek rotoru byl zvolen 46, aby byl zachován poměr drážek statoru a rotoru, tedy 36/46, dle lit. [3].

24.	Drážková rozteč rotoru	$\tau_{dr}$ (m)	0,0158
25.	Proudy v tyčích rotoru	$I_t$ (A)	433,65
26.	Proud kruhu nakrátko	$I_{kn}$ (A)	1592,36
27.	Průřez tyče rotoru	$s_t$ (mm <sup>2</sup> )	98,5
28.	Proudová hustota tyče	$J_t$ (A/mm <sup>2</sup> )	4,4
29.	Průřez kruhu rotoru	$s_{kn}$ (mm <sup>2</sup> )	462
30.	Proudová hustota kruhu	$J_{kn}$ (A/mm <sup>2</sup> )	3,45
31.	Výška jha rotoru	$h_{jr}$ (mm)	34
32.	Mag. Indukce ve jhu	$B_{jr}$ (T)	0,99

**Tabulka 2: Vypočtené rotorové hodnoty**

**Výpočet magnetizačního proudu:**

Hodnoty magnetického měrného napětí jsou odečtené pro danou magnetickou indukci z Tabulka 8, tyto hodnoty jsou získány z materiálové knihovny RMxpřt.

33.	Mag. Indukce v zubech rotoru u hlavy	$B_{zr}$ (T)	1,35
34.	Měrné magnetické napětí	$H_{zr}$ (A/m)	650
35.	Mag. Indukce ve středu zubu rotoru	$B_{zr}'$ (T)	1,366
36.	Měrné magnetické napětí ve středu	$H_{zr}'$ (A/m)	750
37.	Mag. Indukce u paty zubu rotoru	$B_{zr}''$ (T)	1,77
38.	Měrné magnetické napětí u paty	$H_{zr}''$ (A/m)	13200
39.	Střední hodnota H	$H_{z(r)}$ (A/m)	2808,3
40.	Magnetické napětí zubů rotoru	$U_{mzr}$ (A)	70,2
41.	Mag. Napětí jha statoru	$U_{mjs}$ (A)	30,87
42.	Mag. Napětí jha rotoru	$U_{mjr}$ (A)	29,49
43.	Magnetomotorická síla obvodu na pólpár	$U_m$ (A)	1115,82
44.	Magnetizační proud	$I_\mu$ (A)	6,34
45.	Procentní hodnota	$i_\mu$ (%)	23,37

**Tabulka 3: Vypočtené magnetizační proudy**



**Parametry motoru:****Odpory vinutí:**

Tyto hodnoty jsou důležité pro konstrukční návrh stroje. Velikost přepočítaného odporu rotoru na stator je důležitá pro analýzu momentu asynchronního stroje.

46.	Délka čela vinutí statoru	$l_{\zeta l}$ (m)	0,194
47.	Střední délka závitu vinutí	$l_{zs}$ (m)	0,63
48.	celková délka vodičů jedné fáze	$L_s$ (m)	91,4
49.	Omický odpor 1f při teplotě 115°	$R_1$ ( $\Omega$ )	0,36
50.	Odpor tyče rotoru	$R_t$ ( $\mu\Omega$ )	54,3
51.	Odpor kruhu mezi tyčemi	$R_{kn}$ ( $\mu\Omega$ )	1,56
52.	Odpor rotoru	$R_2$ ( $\mu\Omega$ )	96,7
53.	Přepočítaný odpor rotoru na stator	$R_2'$ ( $\Omega$ )	0,43

**Tabulka 4: Vypočtené odpory vinutí**

**Rozptylové reaktance:**

Vypočtená hodnota reaktance statoru řádek 63. je přepočtena na stator, řádek 64. Přepočtená reaktance je v náhradním zapojení a slouží k analýze momentu.

54.	Jednotková mag. Vodivost drážky statoru	$\lambda_{ds}$	1,26
55.	Náhradní vodivost dif. Rozptylu	$\lambda_{difs}$	1,84
56.	Náhradní vodivost rozptylu čel statoru	$\lambda_{\zeta s}$	0,92
57.	Celková náhradní mag. Vodivost statoru	$\sum \lambda_s$	4,02
58.	Rozptylová reaktance statoru	$X_1$ ( $\Omega$ )	1,35
59.	Jednotková mag. Vodivost drážky rotoru	$\lambda_{dr}$	0,83
60.	Náhradní vodivost dif. Rozptylu	$\lambda_{difr}$	2,13
61.	Náhradní vodivost rozptylu čel rotoru	$\lambda_{\zeta r}$	1,71
62.	Celková náhradní mag. Vodivost rotoru	$\sum \lambda_r$	4,67
63.	Rozptylová reaktance rotoru	$X_2$ ( $\Omega$ )	0,0002
64.	Přepočteno na stator	$X_2'$ ( $\Omega$ )	1,004
65.	Reaktance vzájemné indukčnosti	$X_{12}$ ( $\Omega$ )	34,9

**Tabulka 5: Vypočtené rozptylové reaktance**

**Výpočet ztrát:**

Výpočet dílčích ztrát složek v železe je proveden rovněž dle lit.[3] strana 41 až 43 viz. tabulka. Hodnota ztrát mechanických a ventilačních, viz řádek 76 - Tabulka 6, odpovídá ztrátám zadaným v modulu RMxprt jako „WindigeLoss“ a „FrictionLoss“, které jsou dohromady 300 W.

Celkové ztráty v železe statoru jsou součtem dílčích složek ztrát a činní 200 W, hodnota získaná ze simulace v Maxwell 3D transient viz. Tabulka 10 je 145 W. Vypočtená

hodnota se liší o 55 W což je 27,5 % tento rozdíl je s největší pravděpodobností způsoben velikostí přídatného koeficientu  $k_{jz}$  a  $k_{zz}$  uvažovaných při výpočtech.

66.	Hmotnost jha statoru	$G_{js}$ (kg)	11,77
67.	Hmotnost zubů statoru	$G_{zs}$ (kg)	7,42
68.	Hmotnost zubů rotoru	$G_{zr}$ (kg)	3,44
69.	Ztráty ve jhu statoru	$\Delta P_{Fej}$ (kW)	0,07
70.	Ztráty v zubech statoru	$\Delta P_{Fezs}$ (kW)	0,094
71.	Povrchové ztráty v zubu rotoru	$\Delta P_{spr}$ (kW)	0,022
72.	Povrchové ztráty v zubu statoru	$\Delta P_{sps}$ (kW)	0,009
73.	Ztráty v železe statoru	$\Delta P_{Fe}$ (kW)	0,2
74.	Ztráty ventilační a mechanické	$\Delta P_m$ (kW)	0,36
75.	ztráty ve vinutí statoru naprázdno	$\Delta P_{j0}$ (kW)	0,043
76.	ztráty naprázdno	$\Delta P_0$ (kW)	0,61
77.	Přídavné ztráty	$\Delta P_d$ (kW)	0,075
78.	Činná složka proudu	$I_{Fe}$ (A)	0,88
79.	Proud naprázdno	$I_0$ (A)	6,4
80.	Účinník naprázdno	$\cos \varphi_0$	0,14

Tabulka 6: Výpočet ztrát

### Hodnoty odečtené z kruhového diagramu:

Kruhový diagram byl sestaven dle lit. [3] Byla zvolena tato měřítka:

1. Proudu – 0,5 A/mm
2. Výkonu – 0,345 kW/mm
3. Momentu – 0,224 Nm/mm

81.	Ztráty ve vinutí statoru	$\Delta P_{js}$ (kW)	0,788
82.	Ztráty v kleci	$\Delta P_{jr}$ (kW)	0,702
83.	ztráty celkem	$\Delta P$ (kW)	2,174
84.	účinnost	$\eta$	87,34
85.	jmenovitý skluz	$s_n$	0,04

Tabulka 7: Hodnoty z kruhového diagramu

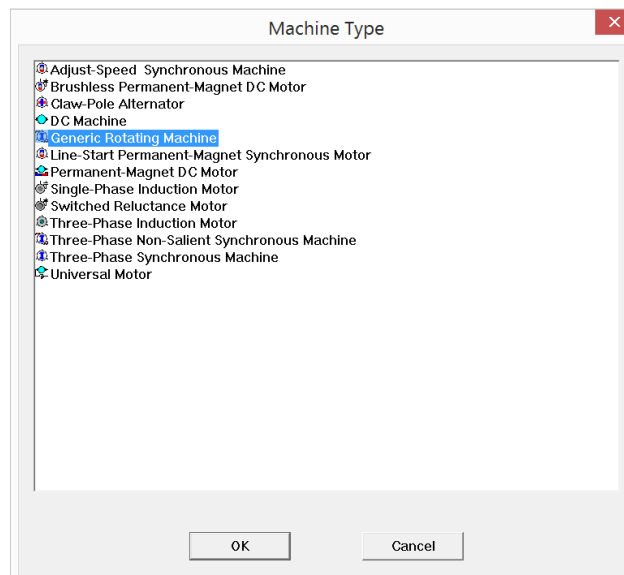
## 2.3 Návrh pomocí RMxprt

RMxprt nabízí předdefinované typy motorů viz. Obrázek 2-2, které je možno využít, pro návrh. Zde nastává jisté úskalí při návrhu motorů, které se konstrukčně odlišují. Například při vytváření asynchronního motoru s vnějším rotorem nelze využít předdefinovaný typ „Three-Phase Induction Motor“, protože tento typ motoru předpokládá „tradiční“ uspořádání, kde se rotor nachází uvnitř statoru. Pro případ, že uživatel chce vytvořit motor, který neodpovídá předdefinovaným typům motorů může zvolit typ GRM.

Jedná se o návrh obecného stroje, kde si uživatel zvolí, jaké vlastnosti od stroje vyžaduje, má na výběr:

1. typ napájení (AC nebo DC)
2. konstrukci (vnitřní rotor nebo vnější rotor)
3. typ statoru (drážky pro AC napájení, s vyniklými póly)
4. typ rotoru (klecové vinutí, vyniklé póly, drážky pro AC napájení)

Po zvolení požadovaných parametrů je uživateli umožněno vytváření jednotlivých částí stroje. Od tohoto nastavení se dále odvíjí samotná konstrukce stroje, proto je důležité, aby si uživatel rozmyslel, jaký stroj chce navrhovat.



Obrázek 2-2: Machine Type

Po zvolení GRM se vytvoří „RMxpRTDesign“ kde bude uživatel definovat jednotlivé části motoru:

1. Parametry stroje „Machine Data“
2. Parametry statoru „Stator Data“
3. Parametry rotoru „Rotor Data“
4. Parametry řešení „Solution Setup“

Obecně se návrh pomocí RMxpRTu používá pro prvotní optimalizaci parametrů motoru, protože po provedení analýzy modelu RMxpRT vytvoří záložku „Solution Data“ v této záložce se nachází tabulka „Design Sheet“ kde jsou všechny údaje o vytvořeném motoru.

Tabulka je rozdělena do 11 sekcí, které kompletně popisují motor, jednotlivé sekce jsou (obrázky jednotlivých sekcí jsou v Příloha 1 až Příloha 5):

1. Všeobecné údaje „General Data“
2. Parametry statoru „Stator Data“
3. Parametry rotoru „Rotor Data“
4. Potřebný materiál „Material Consumption“
5. Jmenovitý provoz „Rated-load operation“
6. Provoz naprázdno „No-load operation“
7. Přerušování provozu „Break-down operation“
8. Provoz se zastaveným rotorem (nakrátko) „Locked-rotor operation“
9. Podrobnější údaje při jmenovitém provozu „Detaile dat rated operation“
10. Uspořádání vinutí „Winding Arrangement“
11. Vstupní data pro Transientní řešič metodou analýzy konečných prvků „Transient FEA input data“

Dále se v této záložce nacházejí křivky viz. příloha v Příloha 6 až Příloha 10.

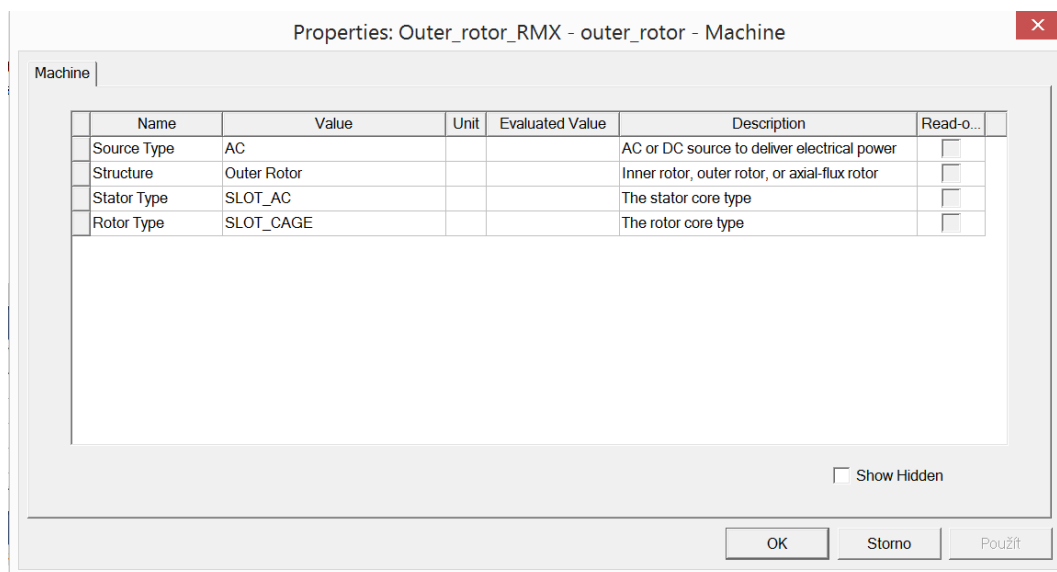
1. Vstupní proud v závislosti na otáčkách „Input Current vs Speed“
2. Účinnost v závislosti na otáčkách „Efficiency vs Speed“
3. Výkon na hřídeli v závislosti na otáčkách „Output Power vs Speed“
4. Účinník v závislosti na otáčkách „Power Factor vs Speed“
5. Moment na hřídeli v závislosti na otáčkách „Output Torque vs Speed“

Toto je velice praktické při optimalizaci stroje, je možné nastavit určité parametry s daným krokem a provést analýzu. Například je možné vytvořit momentovou charakteristiku, kde jako parametr určíme frekvenci, tím získáme závislost momentu na otáčkách při dané frekvenci. Tuto možnost nabízí model vytvořený v Rmxprt pro téměř všechny typy strojů, bohužel při tvorbě motoru pomocí GRM tato možnost není dostupná, neprovedou se žádné výpočty a ani se nevytvoří žádné křivky. Mohlo by se tedy zdát, že návrh pomocí RMXprtem – GRM je zcela zbytečný. Po vytvoření a analýze modelu v RMXprt může uživatel zvolit „Create Maxwell Design“ tato možnost uživateli dovolí vytvořit model v Maxwell ve 2D nebo 3D struktuře. Následně si uživatel zvolí, v jaké oblasti chce provádět simulace (Magnetostatic, Transient), takto vytvořený model je plnohodnotný

a připravený k simulacím. Uživatel, tak nemusí vytvářet model v Maxwell pomocí UDP, tato možnost je podstatně rychlejší.

### 2.3.1 Parametry stroje „Machine Data“

Vytvořený projekt najdeme v okně „Project Manager“, kde v záložce „Machine“ nastavíme hodnoty dle Obrázek 2-3



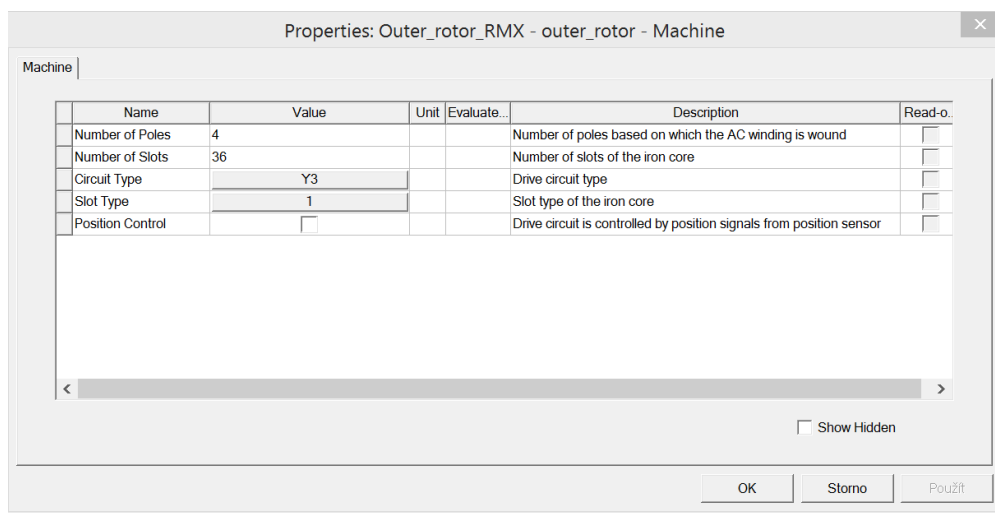
Obrázek 2-3: Parametry Machine

1. Typ zdroje „Source Type“ – typ zdroje napájení
  - 1.1. Střídavý zdroj napájení „AC“
2. Struktura „Structure“ – struktura provedení rotoru
  - 2.1. Vnější rotor „Outer Rotor“
3. Typ statoru „Stator Type“ – druh magnetického obvodu statoru
  - 3.1. Stator pro asynchronní motor „SLOT\_AC“
4. Typ rotoru „Rotor Core“ – druh magnetického obvodu rotoru
  - 4.1. Klecové rotorové vinutí „SLOT\_CAGE“

Po kliknutí na tlačítko OK se provedou změny a je možné nastavovat další parametry.

### 2.3.2 Parametry statoru

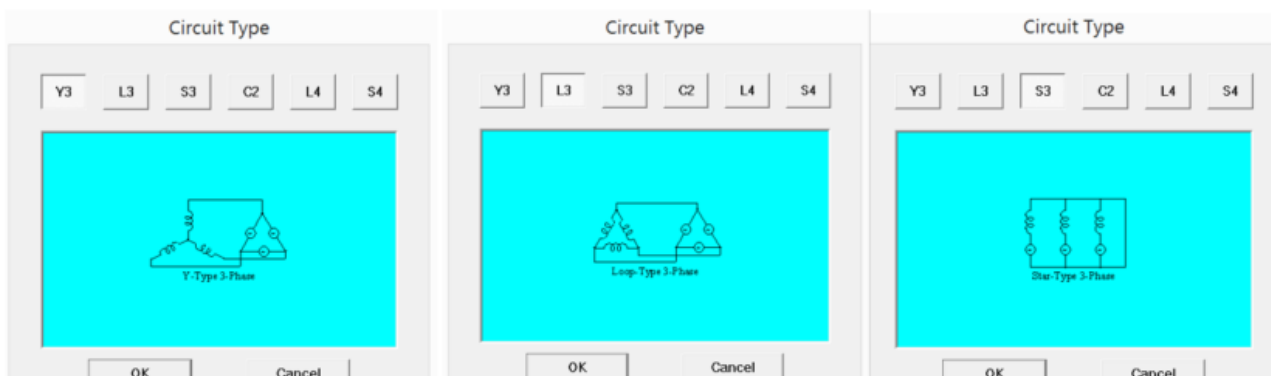
V záložce „Machine“ otevřeme záložku „Stator“ kde je třeba zadat hlavní parametry statoru viz. Obrázek 2-4.



Obrázek 2-4: Stator data

1. Počet pólů stroje „Number of Poles“
2. Počet drážek statoru „Number of Slots“
3. Způsob napájení „Circuit Type“ – zapojení fází do D nebo do Y, viz Obrázek 2-5
4. Typ drážek „Slot Type“ – viz. Obrázek 2-6
5. Snímač polohy „Position Control“ – slouží pro řídicí obvod

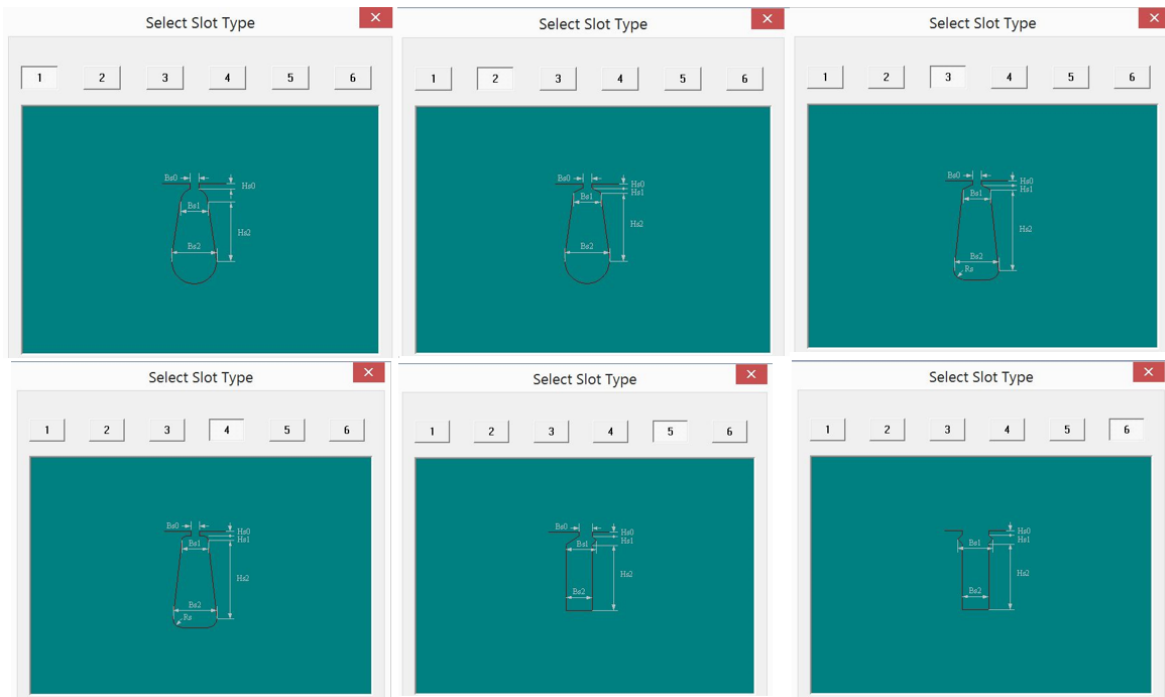
Při návrhu motoru jsem uvažoval čtyř pólový stroj, který má na statoru 36 drážek. Počet drážek byl volen dle lit. [9]. Způsob napájení jsem uvažoval Y3, tedy fáze statoru zapojené do hvězdy.



Obrázek 2-5: Typy zapojení

Dalším parametrem je tvar satorové drážky, pro model jsem zvolil drážku typu 1, konstrukce drážek je na Obrázek 2-6. Typ drážky byl zvolen podle lit. [3], volnou plochu drážky jsem počítal na  $264 \text{ mm}^2$  viz. kapitola 2.2, tomu odpovídá činitel plnění 0,73.

Snímač polohy jsem pro asynchronní motor neuvažoval, tento snímač je vhodnější pro jiné typy motorů například SRM.



Obrázek 2-6: Typy drážek

### 2.3.2.1 Magnetický obvod statoru

Pro vytvoření statoru je třeba zadat hlavní rozměry, které se zadávají v záložce „Stator – Core“ rozměry jsou uvedeny na Obrázek 2-7.

Properties: Outer\_rotor\_RMX - outer\_rotor - Machine

Name	Value	Unit	Evaluate...	Description	Read-o...
Outer Diameter	230	mm	230mm	Outer diameter of the iron core	<input type="checkbox"/>
Inner Diameter	100	mm	100mm	Inner diameter of iron core	<input type="checkbox"/>
Length	123	mm	123mm	Length of the iron core	<input type="checkbox"/>
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the iron core	<input type="checkbox"/>
Steel Type	M27_29G			Steel type of the iron core	<input type="checkbox"/>
Press Board Thickness	2	mm		One side thickness of the press boards at two core ends	<input type="checkbox"/>
Magnetic Press Board	<input type="checkbox"/>			Pole press board is made of magnetic material	<input type="checkbox"/>
Skew Width	0	deg	0deg	Skew width measured in degrees	<input type="checkbox"/>
Lamination Sectors	0			The number of lamination sectors to compose a whole circle lamination layer; 0 or 1 for whole circle lamination	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Obrázek 2-7: Parametry magnetického obvodu statoru

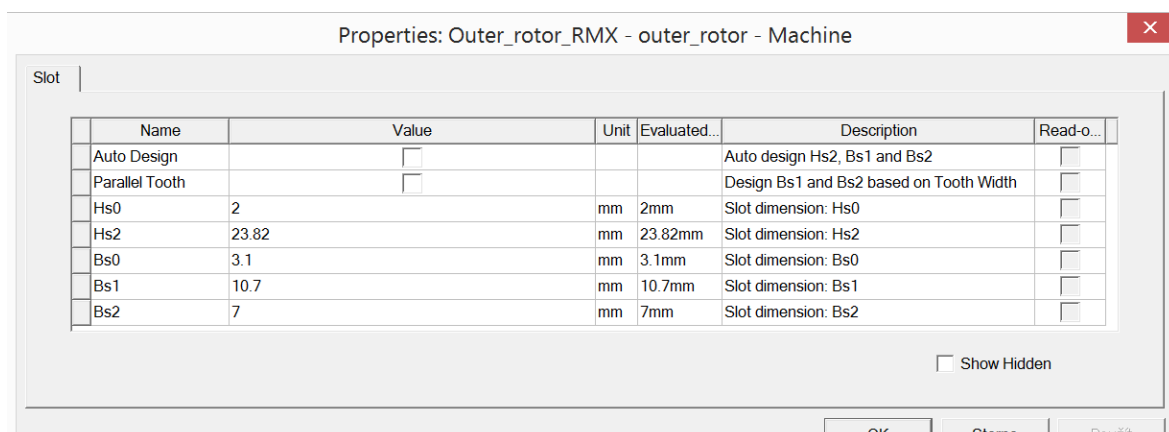
1. Vnější průměr „Outer Diameter“
2. Vnitřní průměr „Inner Diameter“
3. Délka statoru „Lenght“
4. Činitel plnění „Stacking Factor“ magnetického obvodu
5. Druh materiálu „Steel Type“
6. Šířka koncové desky „Press Board Thickness“
7. Typ materiálu koncové desky „Magnetic Press Board“
8. Natočení drážek „Skew Width“
9. Počet paketů magnetického obvodu „Lamination Sectors“

Rozměry jsem volil, tak aby bylo možné vytvořit 36 drážek na statoru s odpovídající plochou drážky. Vnitřní průměr jsem zvolil 100 mm, aby bylo možné vytvořit chlazení motoru. Délku statoru jsem dle výpočtů zvolil na 123 mm s činitelem plnění 0,95, v lit. [9] se udává velikost tohoto činitele okolo 0,9 až 0,97, činitel plnění udává, velikost izolace mezi jednotlivými plechy, z kterých je složen stator.

Při volbě magnetických vlastností rotoru se využívá materiálová databáze, v daném případě jsem volil materiál M27\_29G, jeho magnetizační charakteristika je uvedena v Tabulka 8. Stejný materiál byl použit i pro rotor stroje. Mezi další volby geometrie statoru patří natočení drážek, to jsem však neuvažoval, protože ve 2D simulaci se vliv natočení neuplatní.

### 2.3.2.1.1 Drážky statoru

V záložce „Machine > Stator > Slot“ v projektovém manažeru nastavíme rozměry drážek podle Obrázek 2-8.

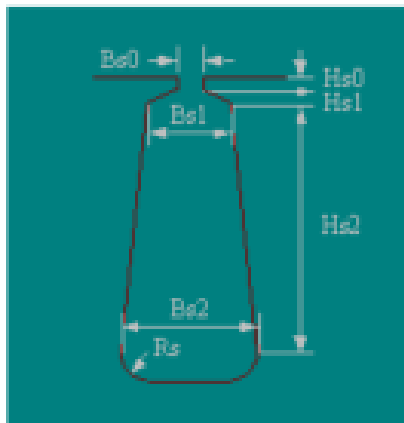


Obrázek 2-8: Geometrické rozměry drážek statoru



Nastavené rozměry drážek jsem volil s ohledem na velikost volné plochy drážky  $264 \text{ mm}^2$ , aby bylo možné vložit dvouvrstvé vinutí, při návrhu drážky jsem uvažoval i s izolací drážky, izolace o tloušťce  $0,27 \text{ mm}$ .

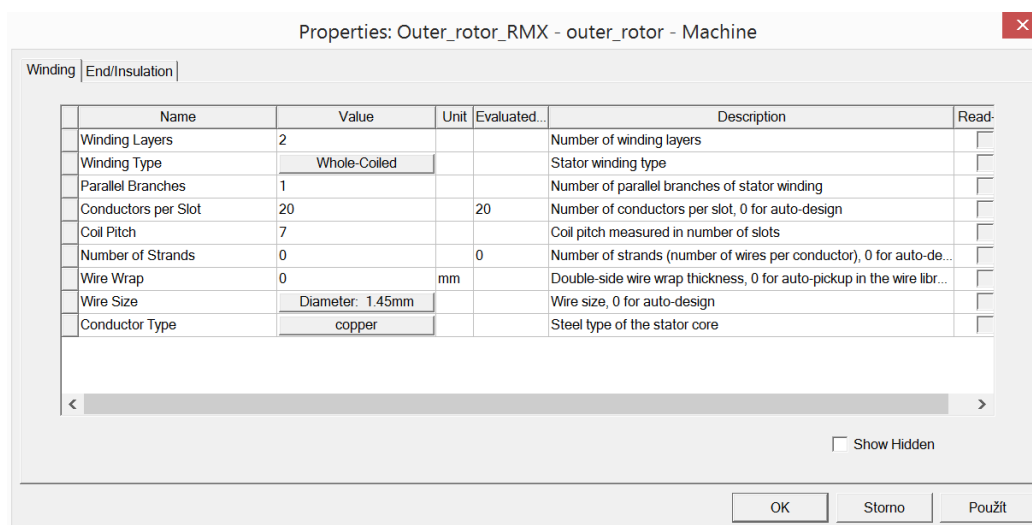
Označení jednotlivých rozměrů drážky jsou na Obrázek 2-9. Uživatel může využít automatického návrhu jednotlivých rozměrů drážky „Auto Design“, zde program dopočítá jednotlivé rozměry drážek z parametrů, které byly zadány dříve.



Obrázek 2-9: Detail parametrů drážky

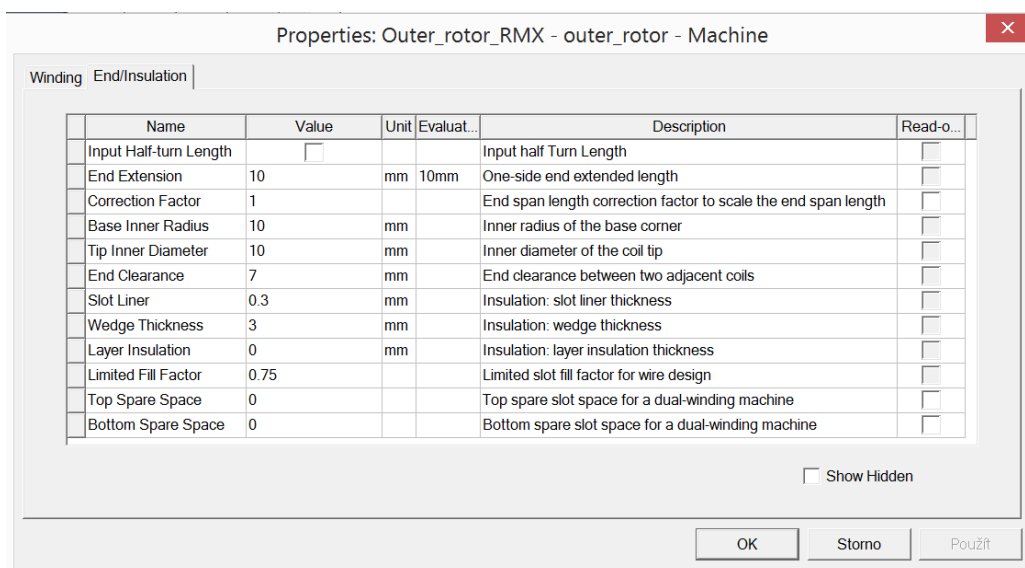
### 2.3.2.2 Vinutí statoru

V záložce „Machine > Stator > Winding“ je třeba nastavit dvě tabulky, v první tabulce se nastavuje vinutí „Winding“ v drážkách statoru a ve druhé tabulce se nastavují parametry



Obrázek 2-10: Parametry vinutí

zakončení vinutí „End/Insulation“. Parametry nastavení vinutí jsou na Obrázek 2-10 a Obrázek 2-11.



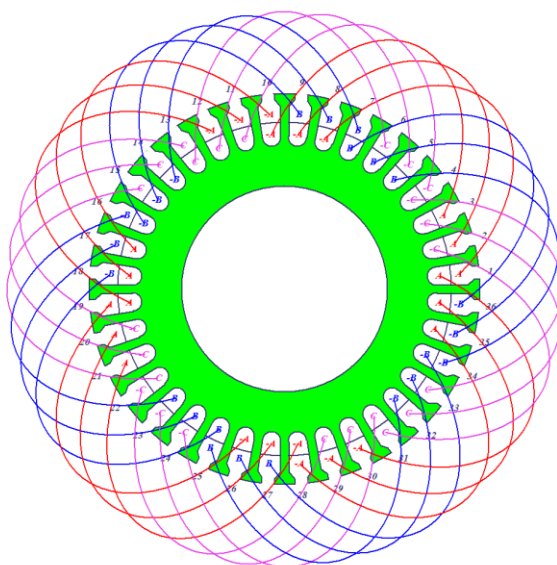
Obrázek 2-11: Parametry vinutí – zakončení vinutí

### Winding:

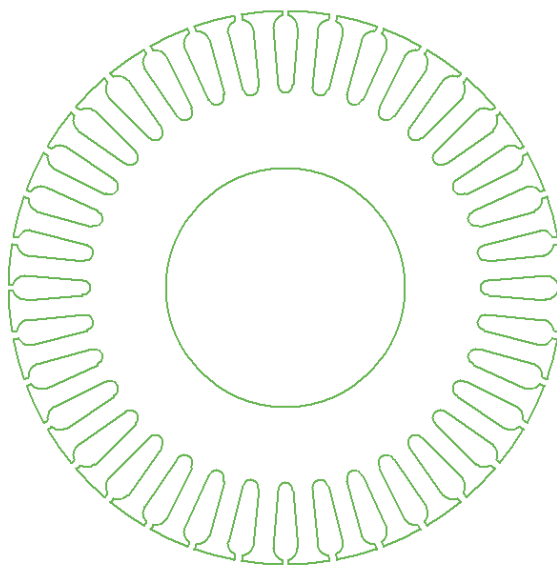
- Počet Vrstev vinutí „Winding Layers“ – uživatel může vybírat z jednovrstvého nebo dvouvrstvého vinutí
- Typ statorového vinutí „Winding Type“ – je možné zvolit smyčkové vynutí nebo soustředné skupinové vinutí. Další možností je „Winding Editor“, toto nastavení umožňuje zvolit různý počet vodičů v jednotlivých cívkách.
- Počet paralelních vodičů „Parallel Branches“
- Počet vodičů v drážce „Conductors per Slot“ – jedná se o počet vodičů v jednotlivé vrstvě vinutí
- Cívkový krok „Coil Pitch“
- Počet vodičů ve svazku „Number of Strands“
- Mezera mezi vodiči „Wire Wrap“ – při zvolení hodnoty 0 je velikost zvolena automaticky
- Průměr vodiče „Wire Size“ – uživatel volí z databáze rozměrů vodičů
- Materiál vodiče „Conductor Type“ – uživatel volí z materiálové databáze

V záložce „Winding“ jsem zvolil dvouvrstvé smyčkové vinutí s cívkovým krokem 7, dále mi dle vypočtených hodnot vyšlo počet vodičů v drážce na 24 vodičů. Materiál vodičů jsem vybral měď s průměrem vodiče 1,45 mm, tyto parametry jsou zahrnuty ve výpočtech. Pro další parametry vynutí jsem využil funkci „Auto-design“.

Po potvrzení zadaných parametrů, RMxpert vytvoří vinutí, které je na Obrázek 2-12, dále vytvoří návrh statoru Obrázek 2-13



**Obrázek 2-12: Zapojení statorového vinutí**



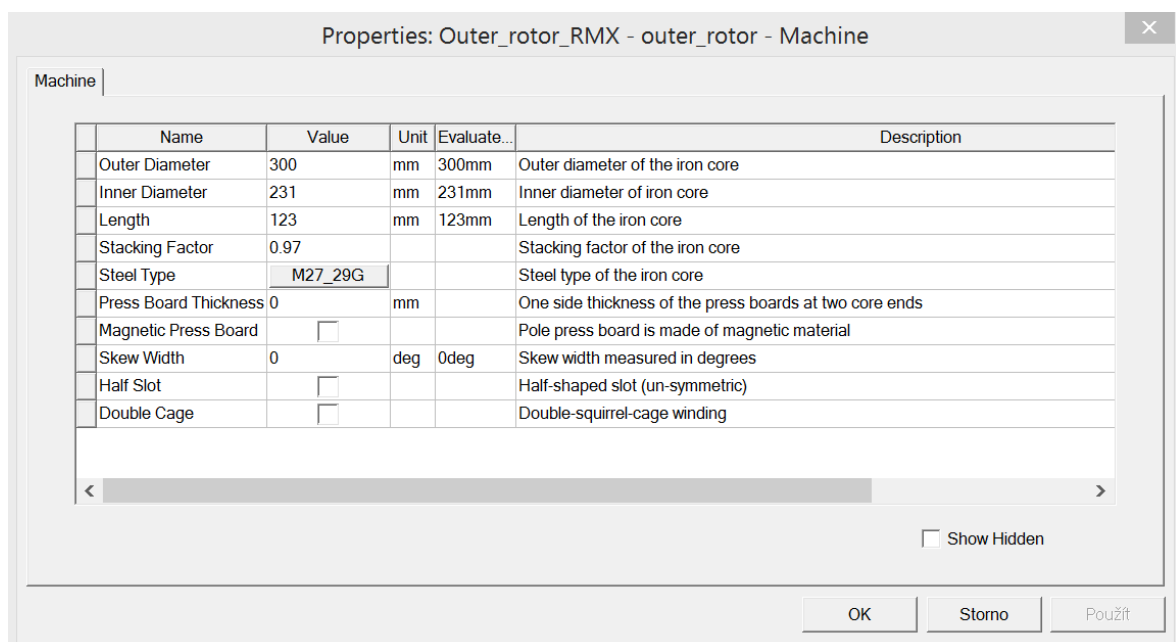
**Obrázek 2-13: Návrh statoru**

### 2.3.3 Návrh rotoru

Jedná se o velmi zjednodušené nastavení, z důvodu předchozího nastavení ve složce „Machine“, kde jsem nastavil požadavek na rotor nakrátko. Z tohoto důvodu v této záložce stačí nastavit počet drážek na rotoru, volil jsem 46 drážek, dle lit. [9].

#### 2.3.3.1 Magnetický obvod rotoru

V záložce „Machine > Rotor > Core“ je třeba zadat hlavní rozměry rotoru viz Obrázek 2-14.



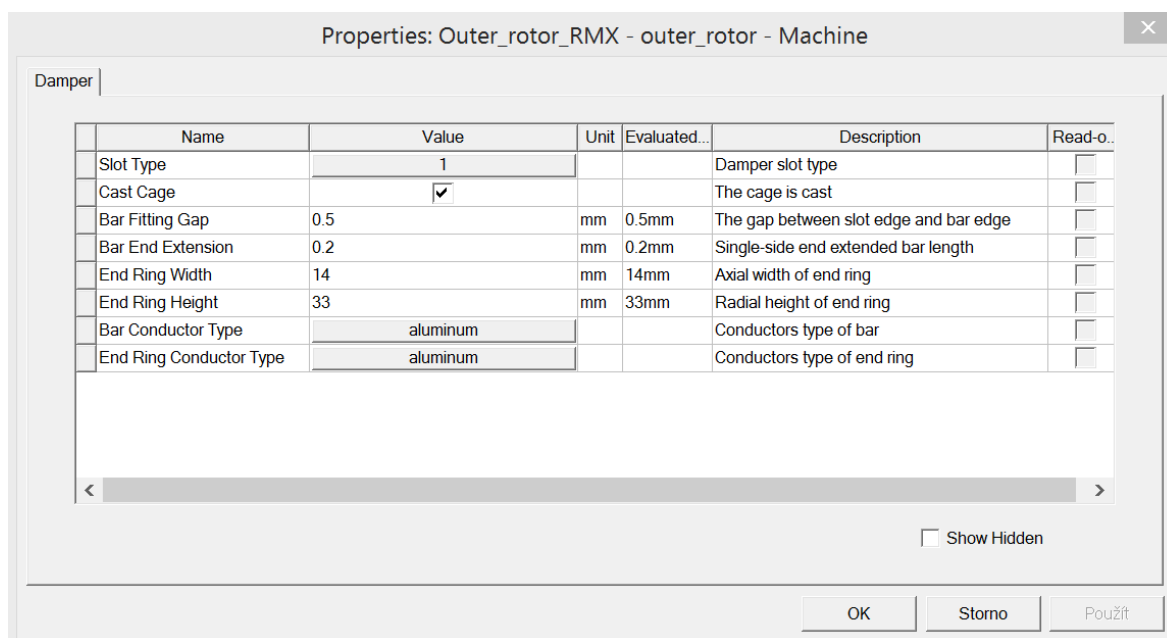
Obrázek 2-14: Parametry magnetického obvodu rotoru

1. Vnější průměr „Outer Diameter“
2. Vnitřní průměr „Inner Diameter“
3. Délka rotoru „Lenght“
4. Činitel plnění „Stacking Factor“ magnetického obvodu
5. Druh materiálu „Steel Type“
6. Šířka koncové desky „Press Board Thickness“
7. Typ materiálu koncové desky „Magnetic Press Board“
8. Natočení drážek „Skew Width“
9. Nesymetrické drážky „Half Slot“
10. Dvou klecové vinutí „Double Cage“

Vnitřní průměr rotoru je dán velikostí vnějšího průměru statoru a požadovanou velikostí vzduchové mezery, dle vypočtených hodnot viz. kapitola 2.2 jsem zvolil velikost vzduchové mezery 0,5 mm. Vnější průměr byl zvolen s ohledem na sycení stroje dle lit. [3] a dle simulací stroje v magnetostatickém řešiči. Mezi další volby geometrie rotoru je nastavení tvaru drážek, kde je možné zvolit například nesymetrická drážka „Half Slot“ a typ drážky pro dvojitou klec „Double Cage“.

### 2.3.3.2 Klec rotoru

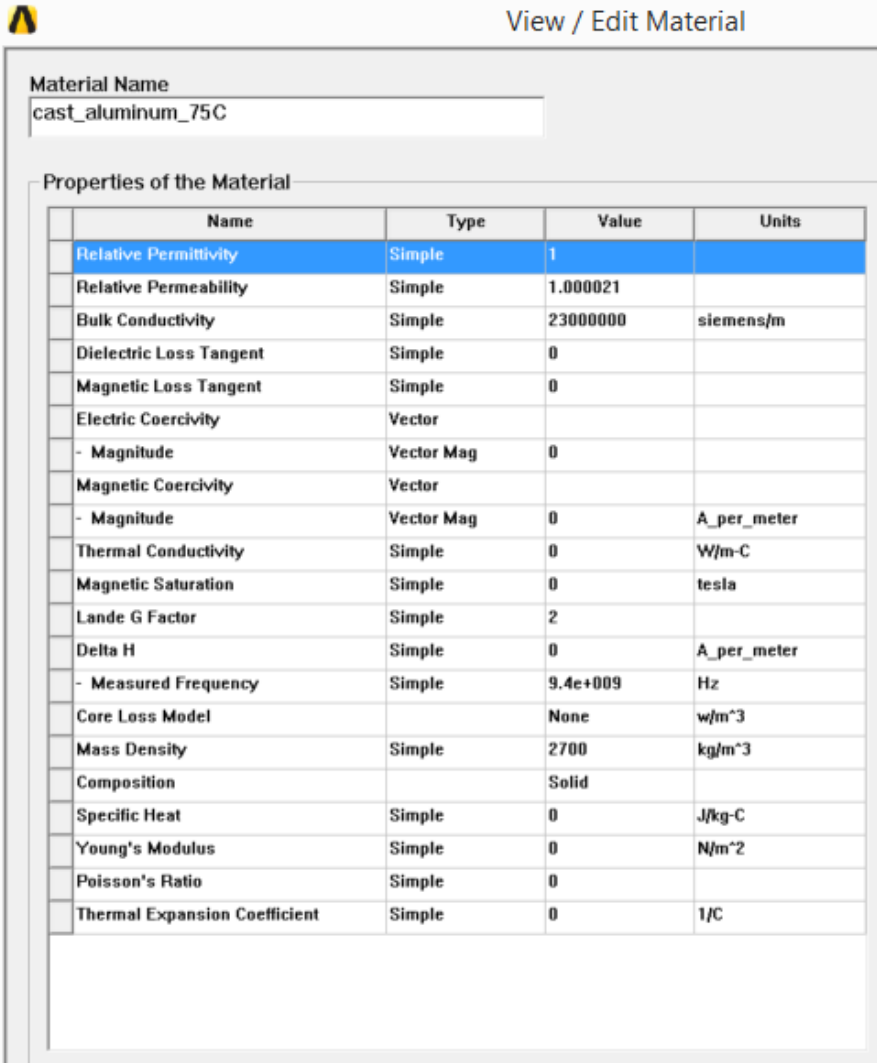
V projekt manažeru je složka „Machine > Rotor > Damper“, kde se zadávají hlavní parametry klece rotoru, jednotlivé parametry jsou na Obrázek 2-15.



Obrázek 2-15: Parametry klece vinutí rotoru

1. Typ Drážky „Slot Type“
2. Odstríknutí klece rotoru „Cast Cage“
3. Mezera mezi drážkou a tyčí rotoru „Bar Fitting Gap“
4. Přesah tyčí rotoru „Bar End Extension“
5. Výška kruhu nakrátko „End Ring Width“
6. Šířka kruhu nakrátko „End Ring Height“
7. Materiál tyčí rotoru „Bar Conductor Type“
8. Materiál kruhu nakrátko „End Ring Conductor Type“

Klec rotoru bude vytvořena odstříknutím hliníku. Jedná se o spojení rotorového vinutí do hvězdy. Při volbě materiálových vlastností klece rotoru, jsem využíval materiálovou databázi, kde jsem vybral jako materiál hliník, charakteristika materiálu viz Obrázek 2-16. Velikost kruhu nakrátko jsem zjistil pomocí výpočtů viz kapitola 2.2.



Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	1.000021	
Bulk Conductivity	Simple	23000000	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	0	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	2700	kg/m^3
Composition		Solid	
Specific Heat	Simple	0	J/kg-C
Young's Modulus	Simple	0	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0	
Thermal Expansion Coefficient	Simple	0	1/C

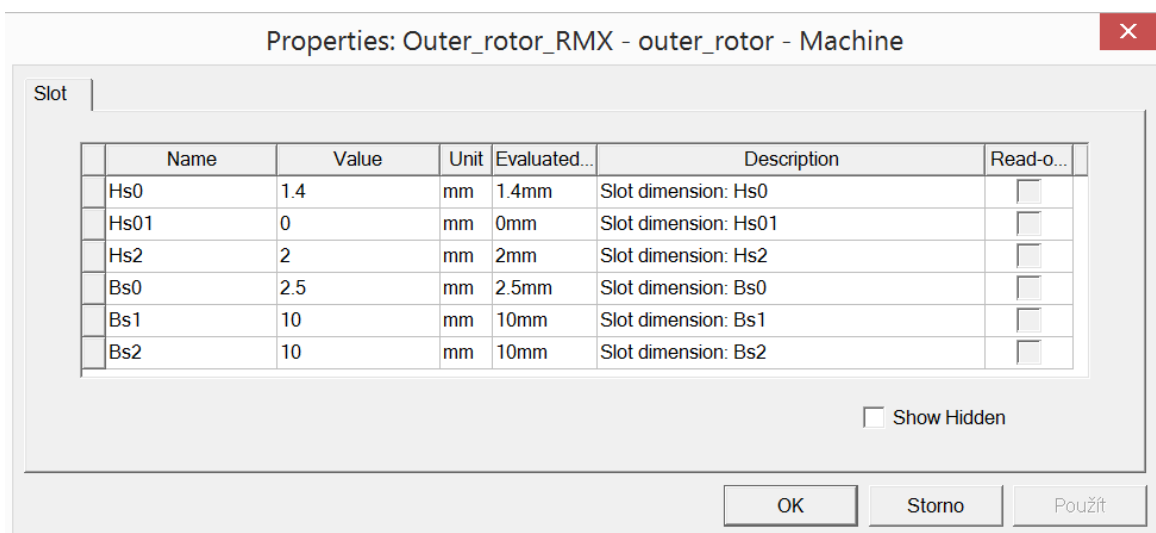
Obrázek 2-16: Materiálové vlastnosti hliníku

Rozměry drážek rotoru jsou uvedeny na Obrázek 2-18 způsob nastavení je shodný s nastavením drážek na statoru. Při určování rozměrů drážek na rotoru jsem kontaktoval firmu ElektroDesign, která má v nabídce asynchronní motory s vnějším rotorem. Od této firmy jsem obdržel dva vzorky motorů s vnějším rotorem, abych mohl zjistit tvar rotorových drážek. Rotor bylo nutné rozříznout, respektive odříznout kruh nakrátko, aby byly vidět

rozměry drážek rotoru viz. Obrázek 2-17. Rozměry drážek byly voleny po dohodě s vedoucím práce.



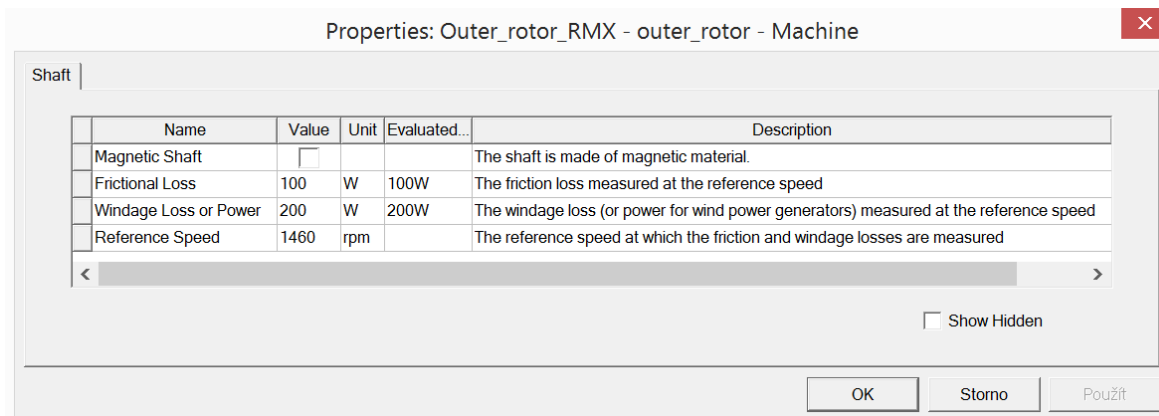
Obrázek 2-17: Rotor motoru od firmy ElektroDesign



Obrázek 2-18: Geometrické rozměry drážek rotoru

### 2.3.4 Návrh hřídele

V záložce „Machine > Shaft“ je třeba zadat parametry hřídele viz. Obrázek 2-19



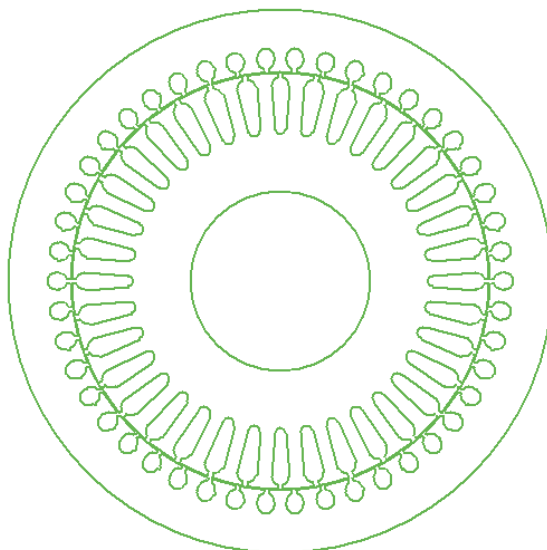
Obrázek 2-19: Parametry hřídele

1. Typ materiálu hřídele „Magnetic Shaft“
2. Ztráty třením „Friction Loss“
3. Ventilační ztráty „Windage Loss“
4. Referenční otáčení „Reference Speed“

Hřídel jsem neuvažoval jako magnetický materiál, protože v reálné konstrukci budou v hřídeli vytvořené ventilační kanály, aby bylo možné odvádět teplo ze statoru motoru, tudíž nebude hřídel vytvořena z plného materiálu. Ztráty jsem zvolil pro otáčky 1460 ot/min dle lit. [3]. Velikost ztrát je velice důležitá při výpočtech tlumení pro nastavení otáčení motoru. Ztráty třením jsou způsobeny uložením stroje v ložiscích.



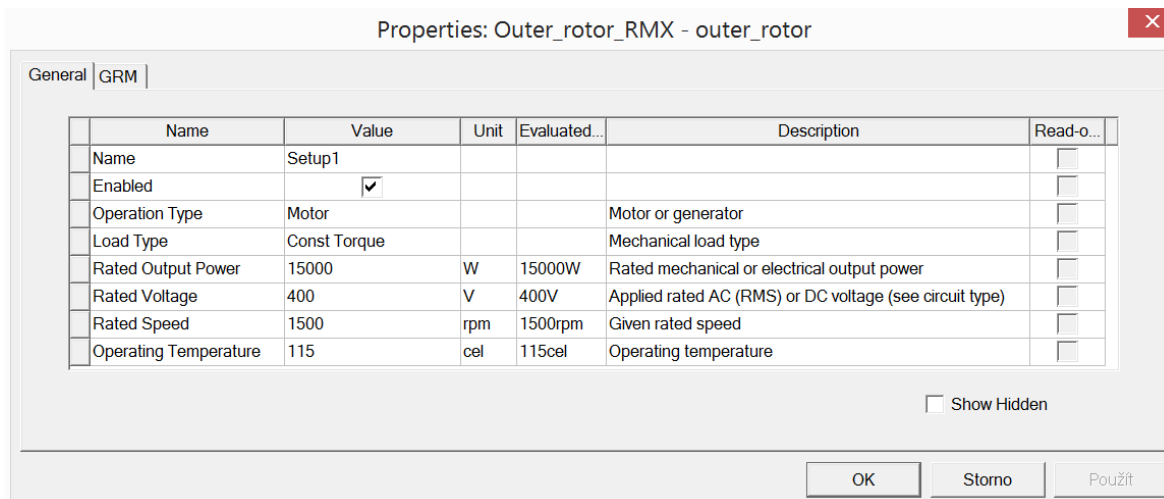
Po zadání všech výše uvedených parametrů, je vytvořen model pomocí RMxprt viz Obrázek 2-20.



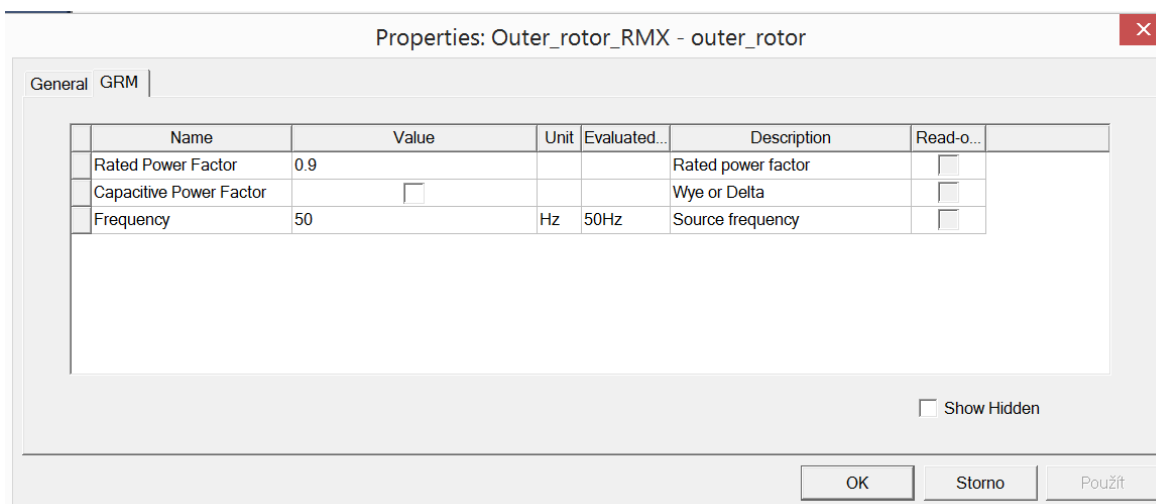
Obrázek 2-20: Návrh modelu – RMxprt

### 2.3.5 Parametry řešení „Solution Setup“

Tuto záložku vytvoříme v projektovém manažeru, kde v záložce „Analysis“ přidáme parametry řešení „Add Solution Setup“, vytvoří se dvě tabulky „General“ a „GRM“. V těchto tabulkách základní parametry stroje, viz. Obrázek 2-21 a Obrázek 2-22.



Obrázek 2-21: Solution Setup – General



Obrázek 2-22: Solution Setup – GRM

**General:**

1. Typ stroje „Operation Type“
2. Typ zátěže „Load Type“
3. Jmenovitý výstupní výkon „Rated Output Power “
4. Jmenovité napětí „Rated Voltage“
5. Jmenovitá rychlost otáčení „rated Speed“
6. Provozní teplota „Operating Temperature“

Tyto parametry jsem volil dle zadání práce, jedná se tedy o motor s výkonem 15 kW, který bude zatěžován konstantní zátěží. Jmenovité otáčky stroje jsem volil v návrhu 1500 ot/min v reálném provozu budou samozřejmě proměnlivé. Zvolené parametry byly využity při výpočtech motoru.

Po dokončení všech nastavení, která byla výše popsána, je třeba ověřit správnost návrhu tlačítkem pro validaci viz Obrázek 1-8 při úspěšné validaci je možné model analyzovat. Po provedené analýze se v kontextovém okně v záložce RMxprt zvolí varianta „Analysis Setup“ a vybere se „Create Maxwell Design“, kde si uživatel vybere mezi 2D a 3D modelem. Tímto je vytvořen model v programu Maxwell, kde se budou provádět simulace motoru.

V daném případě jsem výše popsaným postupem vytvořil geometrický model v Maxwell 2D, ve kterém jsem ověřoval jednak variantní návrhy v rámci magnetostatických a transientních simulací. Vzhledem k tomu, že jsem měl v úmyslu respektování čelních částí vinutí na charakteristiky stroje, stejným postupem jsem rovněž odvodil model v Maxwell 3D a ověřoval shodu výsledků. Vzhledem k vysokým nárokům na HW a dobu řešení, jsem se soustředil na 2D modely viz. kapitola 4.

3D model, který jsem použil pro ověření, obsahoval několikanásobně víc elementů než model ve 2D a doba výpočtu trvala 27 hodin na deseti jádrovém počítači, tento výpočet mi byl umožněn na externím pracovišti, tuto úlohu jsem se pokoušel spustit na svém PC (podstatně méně výkonný), úlohu nebylo možné dopočítat, byla pouze vytvořena výpočetní síť.

### 3 Návrh 3D modelu asynchronního motoru s vnějším rotorem

Při návrhu stroje jsem se rozhodoval, jaký program pro návrh použiji, prvotní myšlenka byla využít zkušenosti s programem AutoCAD, kde jsem již realizoval 3D modely transformátorů. Hlavní myšlenka vytvoření 3D modelu byla pro vizualizaci motoru a pro následný export do Maxwell 3D. Vytvořit 3D model v softwaru AutoCAD by bylo mnohonásobně těžší než dosavadní modely, které jsem v softwaru vytvářel, proto jsem se rozhodl využít pro návrh 3D modelu Maxwell 3D, kde pomocí „User Defined Primitive“ (UDP) mohu vytvořit požadovaný model motoru. Tato možnost se mi jevila jako velice praktická, protože model vytvořený v Maxwell 3D se dá exportovat do jiných forem programů, jako je například AutoCAD.

Z těchto výše popsaných důvodů jsem tedy zvolil pro vytváření modelu program Maxwell 3D.

Návrh modelu je rozdělen na jednotlivé části motoru, jedná se o tyto části:

- Stator
- Vinutí statoru
- Rotor
- Vinutí rotoru

Níže bude podrobněji popsáno, jak se jednotlivé části motoru vytvoří a nakonfigurují. V této kapitole se budeme zabývat pouze samotným návrhem 3D modelu, geometrické rozměry modelu jsou shodné s rozměry, které byly použity v kapitole 2.3. Další vlastnosti, kterými například jsou, vlastnosti materiálů, velikost buzení a další nebudeme uvažovat. Tyto nastavení jsou popsány v jiných kapitolách

#### 3.1 3D Model – Stator

Pro vytvoření statoru asynchronního stroje vybereme v záložce „Draw“ možnost „User Defined Primitive“ zde zvolíme Rmxprt, zobrazí se nám nabídka objektů, které můžeme použít při vytváření modelů, viz Obrázek 1-10.

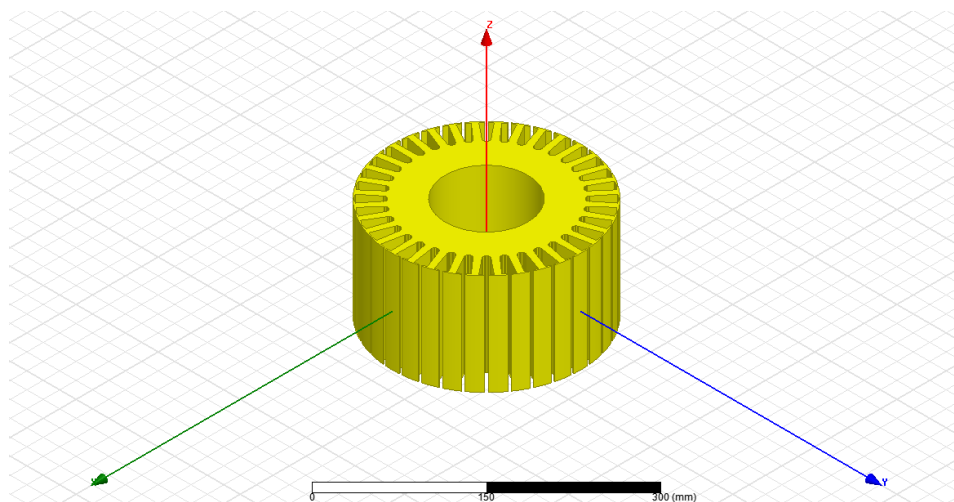
Stator asynchronního motoru bude vytvořen pomocí objektu „SlotCore“. Po potvrzení objektu „SlotCore“ se objeví tabulka, kde se nastavují jednotlivé rozměry, tuto tabulku musí uživatel pouze potvrdit a zavřít, tím se vytvoří objekt „SlotCore“ v předdefinovaných rozměrech. Jestliže uživatel začne rovnou upravovat rozměry objektu, nedojde k vytvoření

statoru, ale dojde k softwarové chybě a celý program přestane pracovat. Uživatel je nucen provést restart programu, celý předchozí krok musí opakovat, proto je nutné při vytváření objektů nejprve potvrdit vytvoření daného objektu a až následně je možno jej upravovat.

Zadávání potřebných parametrů je na Obrázek 3-1, hodnoty jsou shodné, jako při vytváření modelu pomocí RMXprt, tato problematika je popsána výše. Vytvořený 3D model statoru je na Obrázek 3-2.

Name	Value	Unit	Evaluated	Description
Command	CreateUserDefinedPart			
Coordinate System	Global			
Name	RMxprt/SlotCore.dll			
Location	syslib			
Version	12.1			
DiaGap	230	mm	230mm	Core diameter on gap side, DiaGap<DiaYoke for outer cores
DiaYoke	100	mm	100mm	Core diameter on yoke side, DiaYoke<DiaGap for inner cores
Length	123	mm	123mm	Core length
Skew	0	deg	0deg	Skew angle in core length range
Slots	36		36	Number of slots
SlotType	2		2	Slot type: 1 to 6
Hs0	1	mm	1mm	Slot opening height
Hs01	0	mm	0mm	Slot closed bridge height
Hs1	1.08	mm	1.08mm	Slot wedge height
Hs2	23.82	mm	23.82mm	Slot body height
Bs0	3.1	mm	3.1mm	Slot opening width
Bs1	13.15	mm	13.15mm	Slot wedge maximum width
Bs2	8	mm	8mm	Slot body bottom width, 0 for parallel teeth
Rs	0	mm	0mm	Slot body bottom fillet
FilletType	0		0	0: a quarter circle, 1: tangent connection, 2&3: arc bottom.
HalfSlot	0		0	0 for symmetric slot, 1 for half slot
SegAngle	15	deg	15deg	Deviation angle for slot arches (10~30, <10 for true surface).
LenRegion	200	mm	200mm	Region length
InfoCore	0		0	0: core, 100: region.

Obrázek 3-1: Parametry statoru



Obrázek 3-2: 3D model statoru

### 3.2 3D model – Vinutí statoru

Návrh statorového vinutí je opět pomocí UDP, kde zvolíme objekt „LapCoil“, pro správné umístění vinutí je nezbytné, aby parametry byly shodné s parametry statoru. Především se tedy jedná o typ a velikost drážek, vnější a vnitřní průměr statoru a o jeho délku.

Mezi další parametry vinutí patří, počet vrstev vinutí, přesah vinutí oproti statoru a další viz Obrázek 3-3. Model vinutí je na Obrázek 3-4.

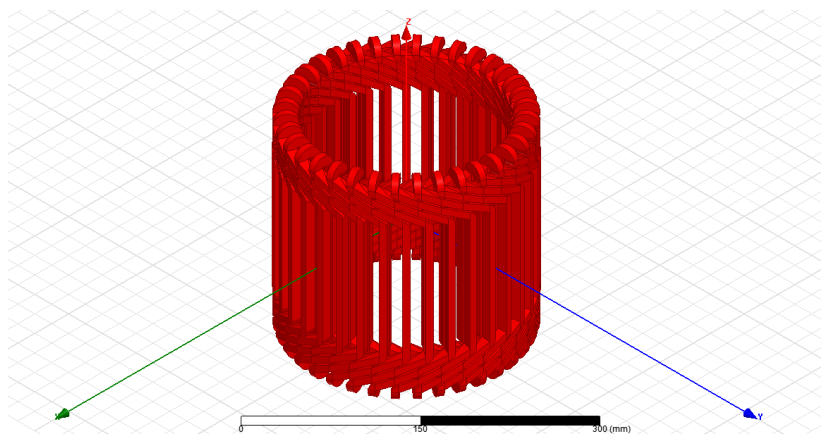
Properties: outer\_rotor36\_46\_kul - Maxwell3D\_navrh\_skripta - Modeler

Name	Value	Unit	Evaluated...	Description
Command	CreateUserDefinedPart			
Coordinate System	Global			
Name	RMxprt\LapCoil.dll			
Location	syslib			
Version	16.0			
DiaGap	230	mm	230mm	Core diameter on gap side, DiaGap<DiaYoke for outer cores
DiaYoke	100	mm	100mm	Core diameter on yoke side, DiaYoke<DiaGap for inner cores
Length	123	mm	123mm	Core length
Skew	0	deg	0deg	Skew angle in core length range
Slots	36		36	Number of slots
SlotType	2		2	Slot type: 1 to 7
Hs0	1	mm	1mm	Slot opening height
Hs1	1.08	mm	1.08mm	Slot wedge height
Hs2	23.82	mm	23.82mm	Slot body height
Bs0	3.1	mm	3.1mm	Slot opening width
Bs1	13.15	mm	13.15mm	Slot wedge maximum width
Bs2	8	mm	8mm	Slot body bottom width, 0 for parallel teeth
Rs	0	mm	0mm	Slot body bottom fillet
FilletType	0		0	0: a quarter circle, 1: tangent connection.
Layers	2		2	Number of winding layers
CoilPitch	7		7	Coil pitch measured in slots
EndExt	5	mm	5mm	One-side end extended length
SpanExt	25	mm	25mm	Axial length of end span, 0 for no span.
BendAngle	0	deg	0deg	Bending angle viewed in the rz plane.
SegAngle	15	deg	15deg	Deviation angle for end span (5°-15°, <5° for true surface).
LenRegion	200	mm	200mm	Region length
InfoCoil	0		0	0: winding, 1: coil, 2: terminal1, 3: terminal2, 4: insulation, 100: region.

Show Hidden

OK Storno Použít

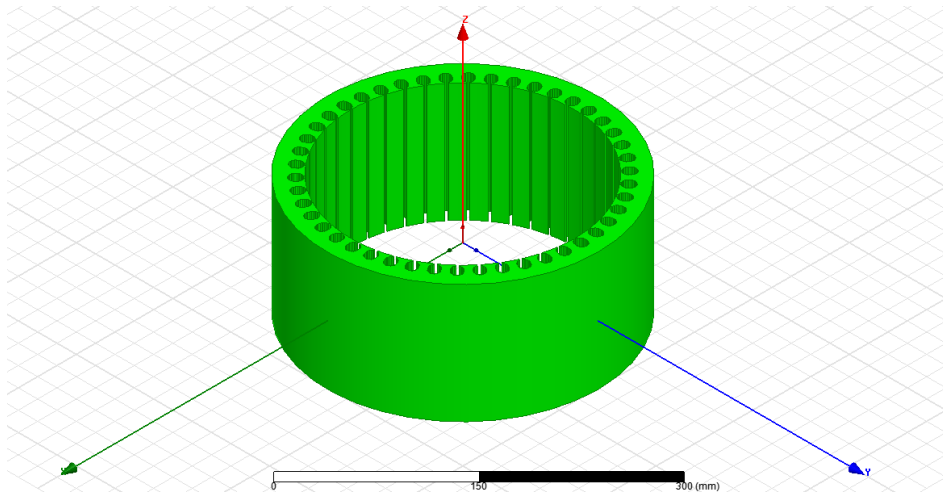
Obrázek 3-3: Parametry vinutí statoru



Obrázek 3-4: 3D model statorového vinutí

### 3.3 3D model – Rotor

Rotor asynchronního motoru je vytvořen také jako objekt „SlotCore“, aby byl vytvořen požadovaný rotor, tedy vnější, musí se při nastavování parametrů zadat, že vnější průměr je menší než vnitřní průměr. Tím vznikne „obrácená“ konstrukce tohoto objektu, této konstrukce s výhodou lze využít pro vnější rotor. Jelikož se jedná o stejný typ objektu, tak nastavované parametry jsou shodné jako u statoru. Zadané hodnoty jsou zobrazené na Obrázek 3-6, vytvořený model je zobrazen na Obrázek 3-5.



Obrázek 3-5: 3D model rotoru

Properties: outer\_rotor36\_46\_kul - Maxwell3D\_navrh\_skripta - Modeler

Name	Value	Unit	Evaluated...	Description
Command	CreateUserDefinedPart			
Coordinate System	Global			
Name	RMxprt/SlotCore.dll			
Location	syslib			
Version	12.1			
DiaGap	231	mm	231mm	Core diameter on gap side, DiaGap<DiaYoke for outer cores
DiaYoke	280	mm	280mm	Core diameter on yoke side, DiaYoke<DiaGap for inner cores
Length	123	mm	123mm	Core length
Skew	0	deg	0deg	Skew angle in core length range
Slots	46		46	Number of slots
SlotType	1		1	Slot type: 1 to 6
Hs0	1	mm	1mm	Slot opening height
Hs01	0	mm	0mm	Slot closed bridge height
Hs1	1.4	mm	1.4mm	Slot wedge height
Hs2	2	mm	2mm	Slot body height
Bs0	2.5	mm	2.5mm	Slot opening width
Bs1	10	mm	10mm	Slot wedge maximum width
Bs2	10	mm	10mm	Slot body bottom width, 0 for parallel teeth
Rs	0	mm	0mm	Slot body bottom fillet
FilletType	0		0	0: a quarter circle, 1: tangent connection, 2&3: arc bottom.
HalfSlot	0		0	0 for symmetric slot, 1 for half slot
SegAngle	15	deg	15deg	Deviation angle for slot arches (10~30, <10 for true surface).
LenRegion	200	mm	200mm	Region length
InfoCore	0		0	0: core, 100: region.

Show Hidden

OK Storno Použít

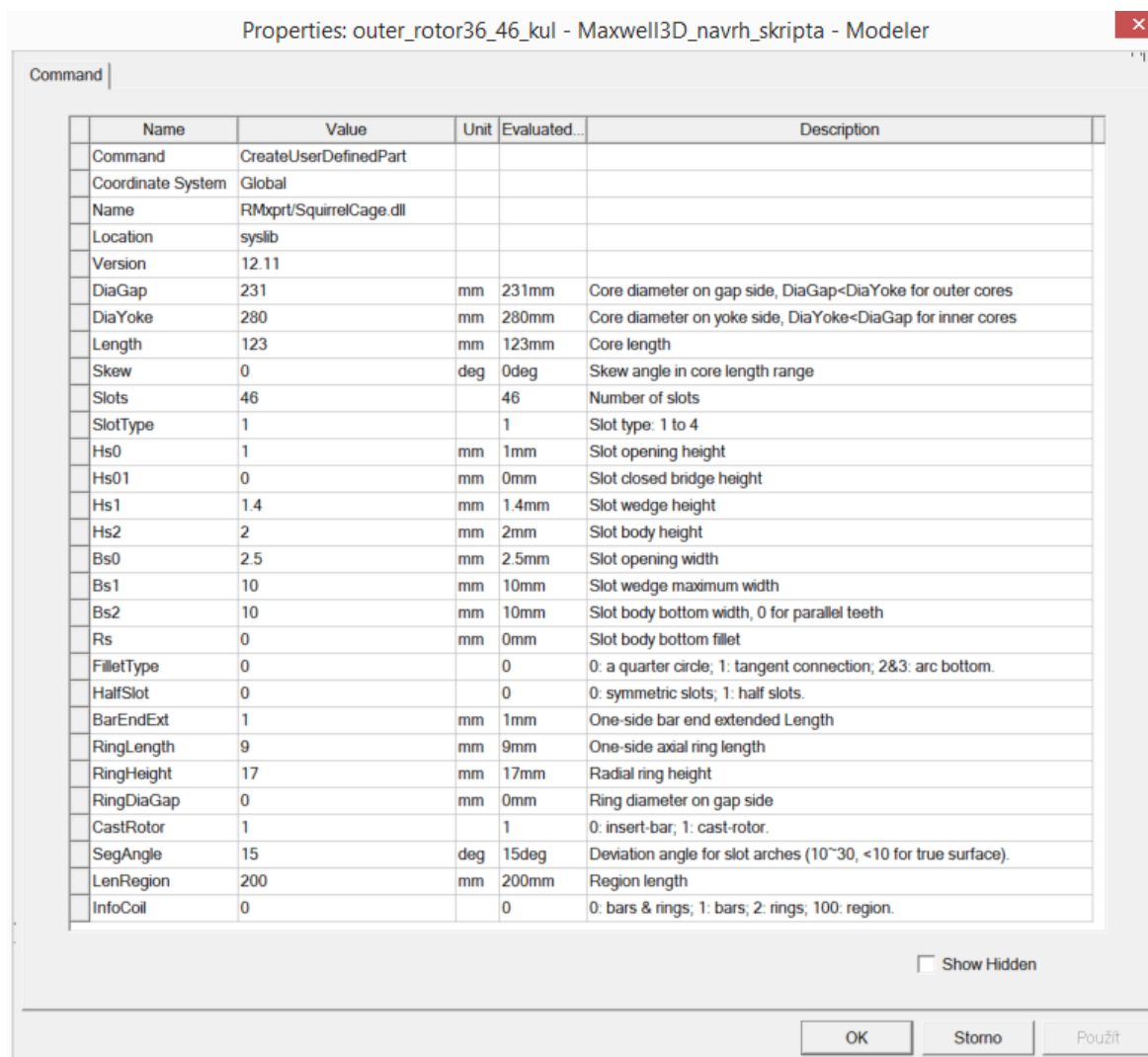
Obrázek 3-6: Parametry rotoru



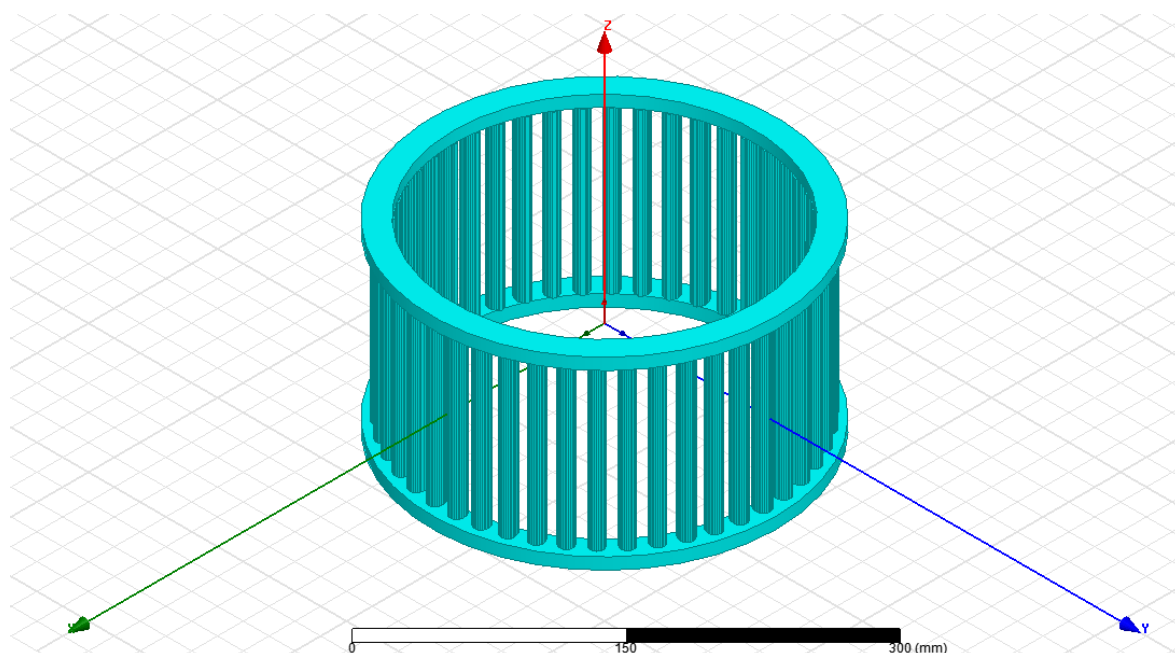
### 3.4 3D model – Klec rotoru

Klec rotoru je vytvořena pomocí objektu „SquirrelCage“, opět je zde třeba nastavit parametry shodné s parametry rotoru, aby tyče klece byly usazeny v drážkách, tak jak mají. Dále je možné nastavit natočení rotorových tyčí, velikost kruhu nakrátko a další parametry. Parametry jsou uvedeny na Obrázek 3-7.

Klec rotoru byla poslední část 3D modelu a je zobrazen na Obrázek 3-8.



Obrázek 3-7: Parametry klece nakrátko

**Obrázek 3-8: 3D model klece nakrátko**

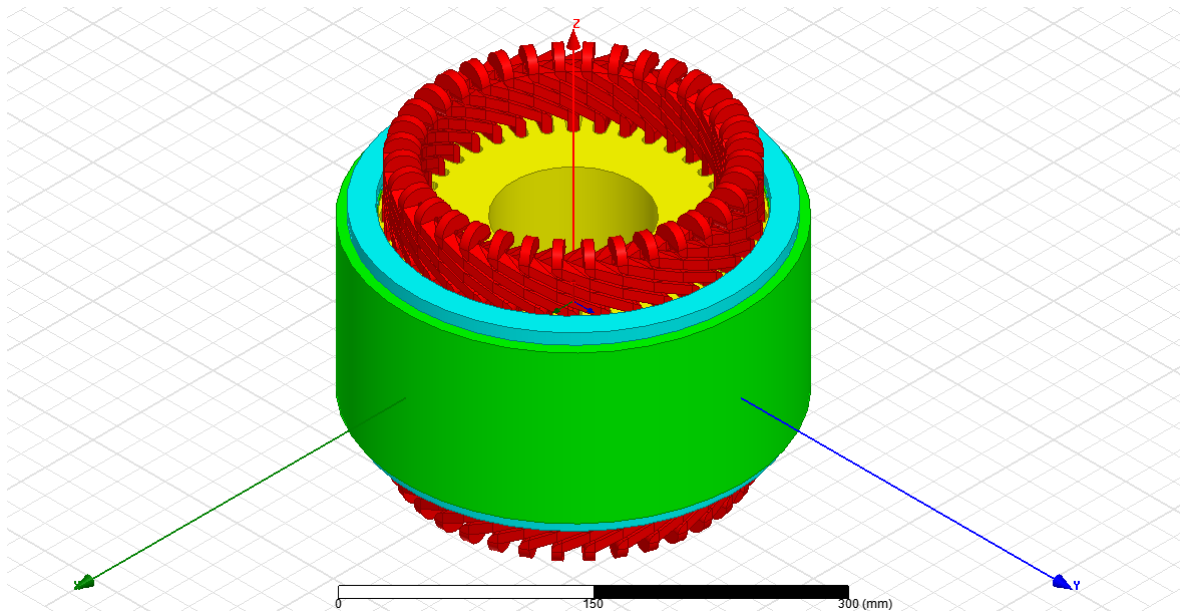
Vytvoření modelu pomocí UDP je velice praktické, protože je podstatně rychlejší a jednodušší vytvořit 3D model v programu Maxwell oproti tvorbě modelu v programu typu AutoCAD. Takto vytvořený model je plně přenositelný. Je možné ho exportovat do ostatních programů, jako například AutoCAD.

Za předpokladu, že bude model vytvořen v softwaru AutoCAD, je nezbytné, aby tento model mohl být importovaný do Maxwell 3D. AutoCAD umožňuje export výkresů tak, že jsou uloženy jako „Standard ACIS Text“ tedy SAT. Takovýto soubor je možné importovat do Maxwell 3D a je možné s modelem dále pracovat.

Po vložení 3D modelu je třeba zvolit typ řešení, přiřadit materiálové vlastnosti a další podstatné parametry, které byly popsány výše.

Pro vytvoření 3D modelu je možné využít i RMXprt, který tuto variantu umožňuje, jak vytvořit model RMXprt je uvedeno v kapitole 2.3.

Vytvořený 3D model pomocí UDP je na Obrázek 3-9.



**Obrázek 3-9: 3D model asynchronního motoru s vnějším rotorem**

## 4 Simulace asynchronního motoru s vnějším rotorem

Simulace motoru jsem prováděl ve 2D modelu, z důvodů velké výpočetní kapacity, která je nezbytná pro 3D výpočty. Při výpočtech je nejprve vytvořena výpočetní síť, která je využita na diskretizaci Maxwellových rovnic na rovnice algebraické, tvorba této sítě trvala u polovičního modelu 6 hodin, z tohoto důvodu jsem byl nucen provádět simulace ve 2D. Problematiku dlouhé výpočetní doby řeší program HPC, který umožní spustit výpočet na více jádrech souběžně, to podstatně zrychlí výpočet, bohužel tento program je dostupný až u novějších verzí Electronics. Simulace prováděné ve 2D jsou dostačující pro posouzení motoru.

### 4.1 Magnetizační charakteristika M27\_29G

H (A/m)	B (T)
0	0
120	0,8
200	1
280	1,1
400	1,2
503	1,325
767	1,375
1215	1,425
1895	1,475
2900	1,525
4265	1,575
6063,5	1,63
7938,5	1,68
9918,5	1,725
13244,2	1,785
16732,3	1,835
20185,6	1,875
26135,6	1,925
35685,6	1,975
59685,6	2,025
97685,6	2,075

Tabulka 8: Magnetizační charakteristika M27\_29G

## 4.2 Výpočetní síť

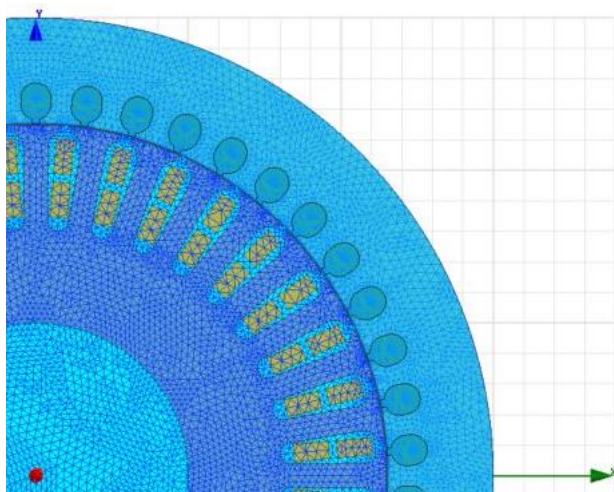
Při vytváření numerického modelu je velice důležité dobře nastavit hustotu výpočetní sítě „Mesh Operation“. Hustota sítě se dle potřeby zjemňuje v místech, kde se mění prostředí. Ve vzduchové mezeře je tedy síť nejhustší. Hustota sítě je zadána jako maximální délka jednotlivých elementů, elementy jsou lineární trojúhelníkové. Celkový počet elementů v modelu je 46845.

Nastavení velikosti jednotlivých elementů je uvedeno v Tabulka 9.

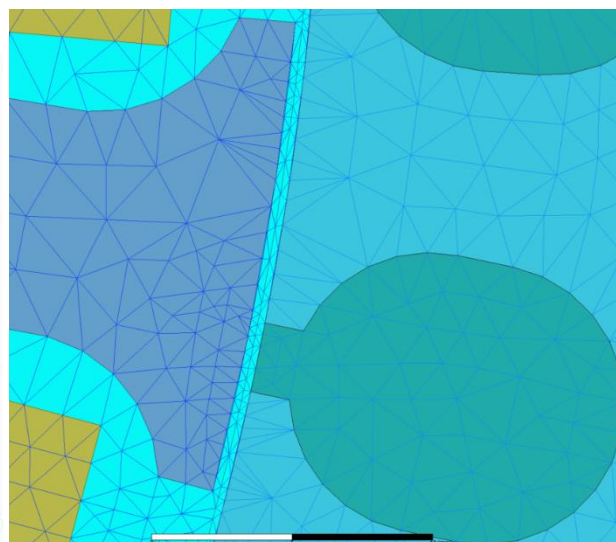
Prostředí	velikost elementu [mm]
Stator a Rotor	3,5
Rotorové tyče	2,5
Vinutí statoru	2,2
Vzduchová mezera	0,5

Tabulka 9: Parametry výpočetní sítě

Pro představu připojuji dále rovněž částečný řez modelovaným strojem s vytvořenou výpočetní sítí viz. Obrázek 4-2 . Na Obrázek 4-1 je zvětšená oblast v okolí vzduchové mezery, kde je síť hustší.



Obrázek 4-2: Výpočetní síť



Obrázek 4-1: Detail výpočetní sítě

Hustota sítě výrazně ovlivňuje dobu řešení, proto je třeba k volbě počtu elementů přistupovat velmi citlivě, v daném případě byl použit PC s procesorem se 4 čtyřmi jádry. Doba výpočtu s výše popsaným HW činila u transienčních úloh přibližně 10 hodin.

### 4.3 Ztráty v železe

Ztráty v magnetickém obvodu jsou tvořeny ztrátami vířivými proudy a hysterezními ztrátami. Velikost ztrát je dána materiálovými konstantami, dle Steinmetzova vztahu jsou ztráty v železe dány vztahem:[7]

$$\Delta P_{Fe} = P_h + P_v + P_d = k_h * f * B^2 + k_v * f^2 * B^2 + k_d * f^{1,5} * B^{1,5} \quad (27)$$

kde  $f$  je frekvence vnějšího magnetického pole

$k_h$ ,  $k_v$  a  $k_d$  jsou koeficienty závislé na laminaci, vodivosti a tloušťce materiálu.

Rovnice (27) je podle současných poznatků nejpoužívanější vztah pro určení ztrát v železe. Koeficienty  $k_h$ ,  $k_v$ ,  $k_d$  jsou pro daný materiál uvedené v materiálové knihovně RMxpert, viz. Příloha 18.

Problematika ztrát v železe je popsána v lit. [7] a lit. [4]

### 4.4 Ztráty ve vinutí

Pro výpočet ztrát ve statorovém vinutí, vycházíme ze vztahu:

$$\Delta P_{js} = 3 * R_1 * I_0^2 \quad (28)$$

$R_1$  je odpor vinutí statoru, tento odpor je závislý na frekvenci, vlivem skin efektu, se zvyšující se frekvencí se zmenšuje hloubka vniku  $\sigma$ , tím roste činný odpor. Hloubka vniku se určí dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * f * \mu_0 * \mu_r}} \quad (29)$$

Mezní stav se uvažuje, pokud se hloubka vniku sníží na polovinu průřezu vodiče.[7]

### 4.5 Simulace motoru

U transienčního řešiče je potřeba určit celkový čas simulace, ten musí být dostatečně dlouhý, aby zachytil daný přechodný děj. Dále je třeba určit vzorkovací interval, interval se volí tak, aby na jednu periodu bylo zachyceno 100 vzorků. Velikost kroku výrazně ovlivňuje

čas výpočtu. Pro napájecí frekvenci 50 Hz je perioda  $T = 20 \text{ ms}$  a tomu odpovídá vzorkovací interval  $t_s = 0,2 \text{ ms}$ . Celkový čas simulace je 0,8 s.

Při řešení byla uvažovaná mechanická zátěž. Zátěž byla zadána, jako moment zatěžující hřídel stroje  $M_z = 100 \text{ Nm}$ . Další nutné nastavení je velikost tlumení a momentu setrvačnosti. Tlumení se vypočítá z ventilačních ztrát a ze ztrát třením, lit. [4]

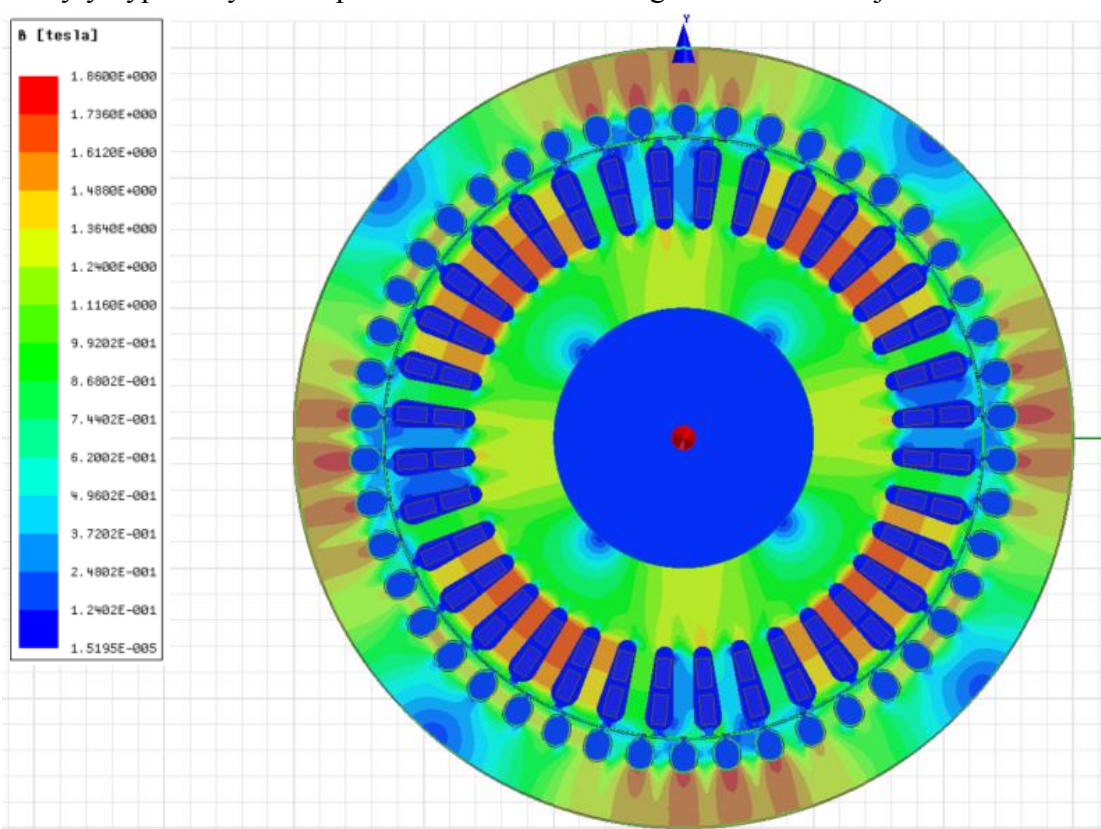
$$D = \frac{\Delta P_{Mech}}{\omega^2} = 0,012 \frac{W}{rad/sec^2}$$

Moment setrvačnosti je, dle zadaných rozměrů:

$$J = 0,485 \text{ kg} * m^2$$

#### 4.5.1 Využití magnetického obvodu

Tato simulace byla provedena v magnetostatickém řešiči, výsledkem simulace je mapa pole magnetické indukce. Simulace je vhodná pro ověření sycení magnetického obvodu stroje. Simulace je podstatně méně časově náročná oproti transientním úlohám. Tato úloha simuluje ustálený stav, Buzení jednotlivých vinutí odpovídá jmenovitým hodnotám proudu, které byly vypočteny viz. kapitola 2.2. Rozložení magnetické indukce je na Obrázek 4-3.

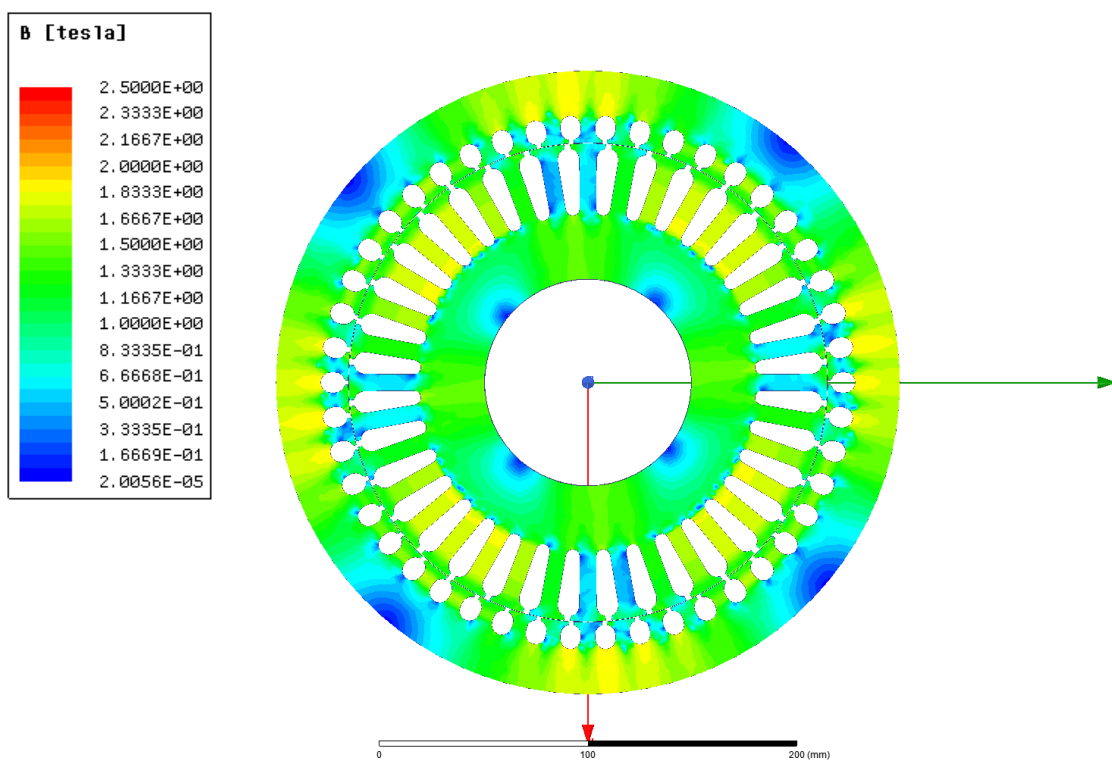


Obrázek 4-3: Rozložení magnetické indukce

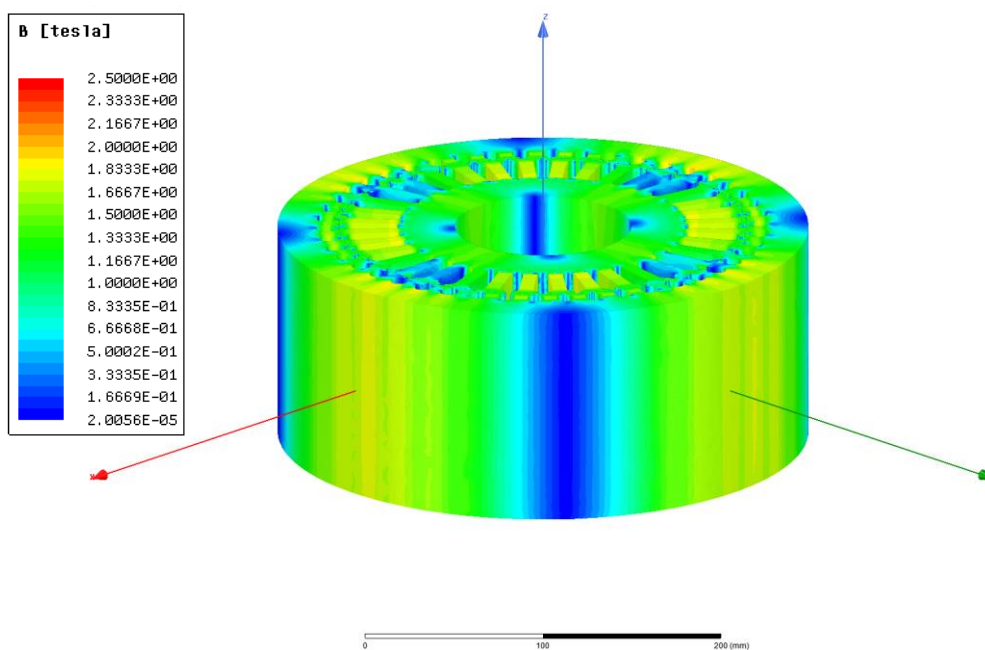


Maximální hodnota magnetické indukce, která se nachází v modelu je přibližně 1,65 T, tato hodnota se nachází v zubech statoru a v částech jha rotoru. Velikost magnetické indukce v zubech statoru přibližně odpovídá vypočteným hodnotám viz. kapitola 2.2.

Simulaci jsem provedl i pro 3D model, doba výpočtu 3D modelu byla přibližně 10x delší než u 2D. Výpočet trval 25 hodin, z tohoto důvodu jsem neprováděl další 3D simulace.



Obrázek 4-4: Rozložení magnetické indukce ve 3D modelu



Obrázek 4-5: Rozložení magnetické indukce ve 3D modelu

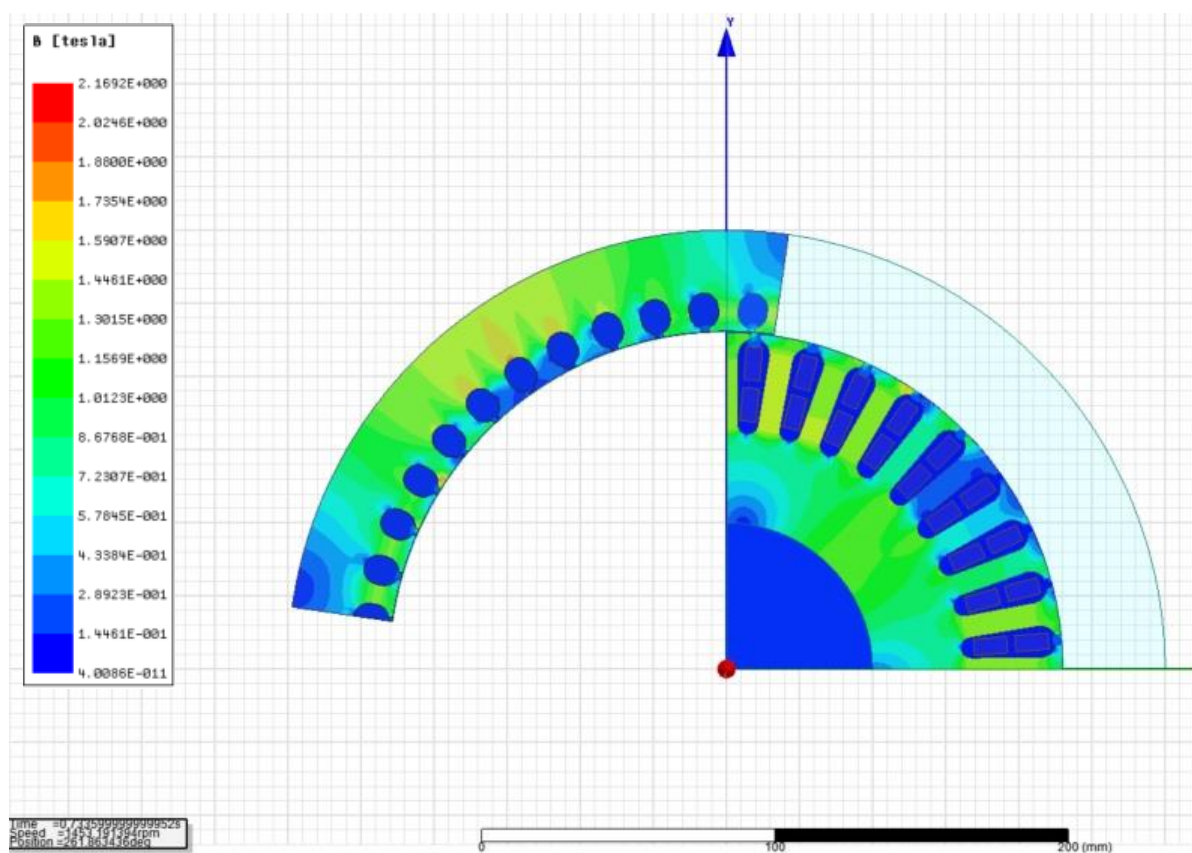


Maximální magnetická indukce, která se vyskytuje v 3D modelu má hodnotu přibližně 1,8 T, vyskytuje se v zubech statoru a v částech rotoru.

Z rozložení magnetické indukce je patrné, že je v ose Z stejná, z tohoto důvodu jsou 2D modely vyhovující.

#### 4.5.2 Chod při jmenovitém zatížení

Motor je napájen sinusovým napětím s frekvencí 50 Hz, zátěžný moment je 100 Nm, rozložení magnetické indukce je na Obrázek 4-6.



Obrázek 4-6: Rozložení magnetické indukce při jmenovitém chodu, v čase 0,73 s

Hodnoty získané ze simulace:

Otáčky	$n$ (ot/min)	1452
Fázový proud	$I_f$ (A)	29
Fázové napětí	$U$ (V)	230
Příkon	$P$ (W)	17646
Ztráty ve vinutí statoru	$\Delta P_{js}$ (W)	1037
Ztráty v kleci rotoru	$\Delta P_{jr}$ (W)	547
Ztráty v železe	$\Delta P_{Fe}$ (W)	144,6
Ztráty mechanické	$\Delta P_{Mech}$ (W)	393,4
Celkové ztráty	$\Delta P$ (W)	2122
Výkon na hřídeli	$P_m$ (W)	15524
Moment na hřídeli	$M$ (Nm)	100
Účinnost	$\eta$ (%)	87,97

**Tabulka 10: Hodnoty získané ze simulace motoru při jmenovitém zatížení**

Výkon na hřídeli se vypočítá:

$$P_m = M * \omega = 15524 \text{ W}$$

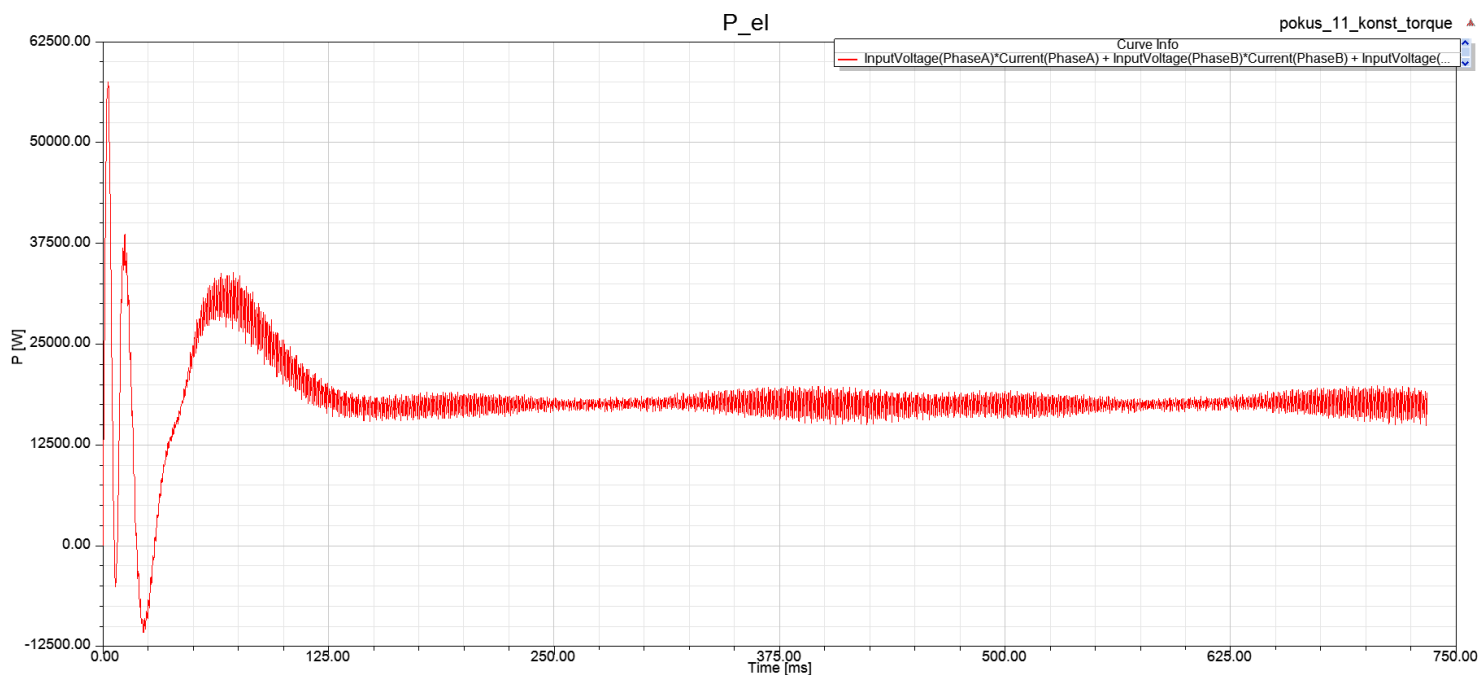
Celkové ztráty jsou vypočteny:

$$\Delta P = P - P_m = 2122 \text{ W}$$

Mechanické ztráty jsou vypočítány:

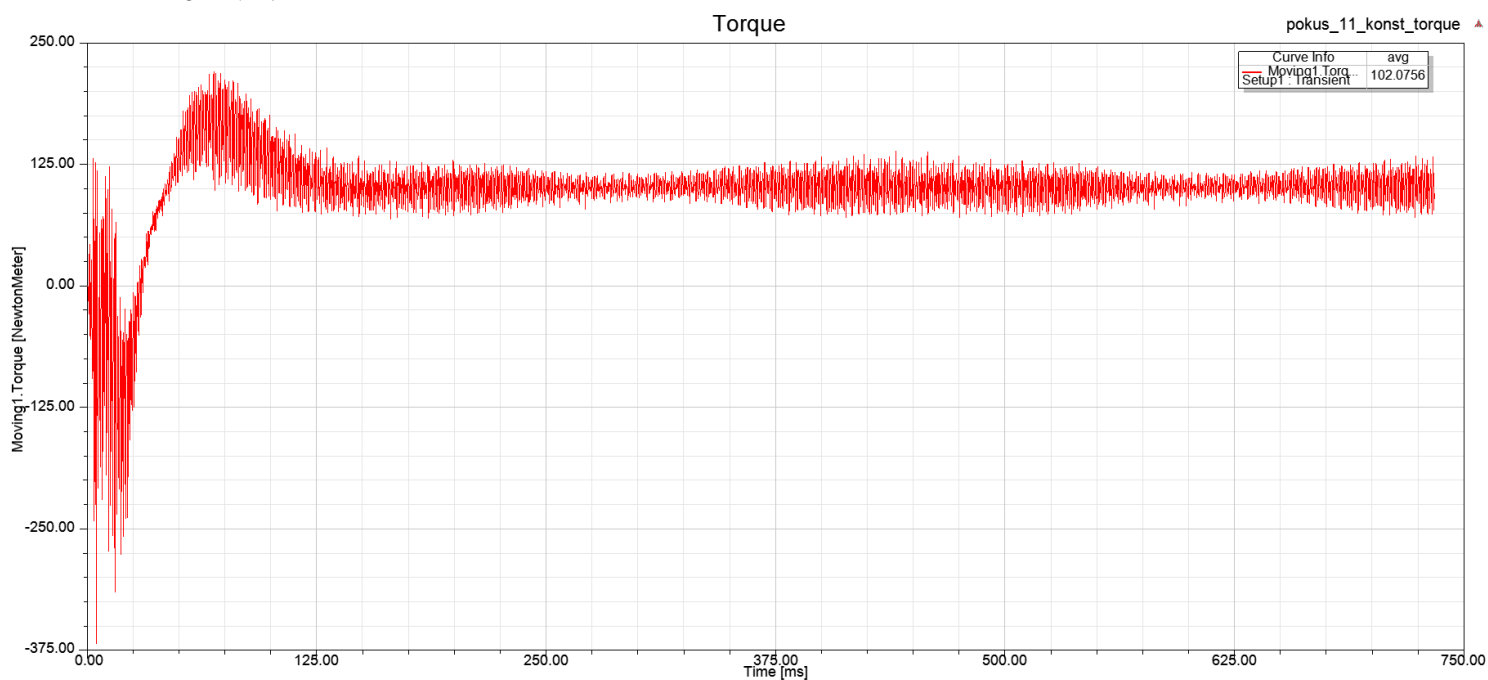
$$\Delta P_{Mech} = \Delta P - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{jr} - \Delta P_{js} = 393,4 \text{ W}$$

Příkon motoru je vypočítán, jako součet výkonů v jednotlivých fázích v ustáleném stavu, hodnotu příkonu je odečtena funkcí Average.



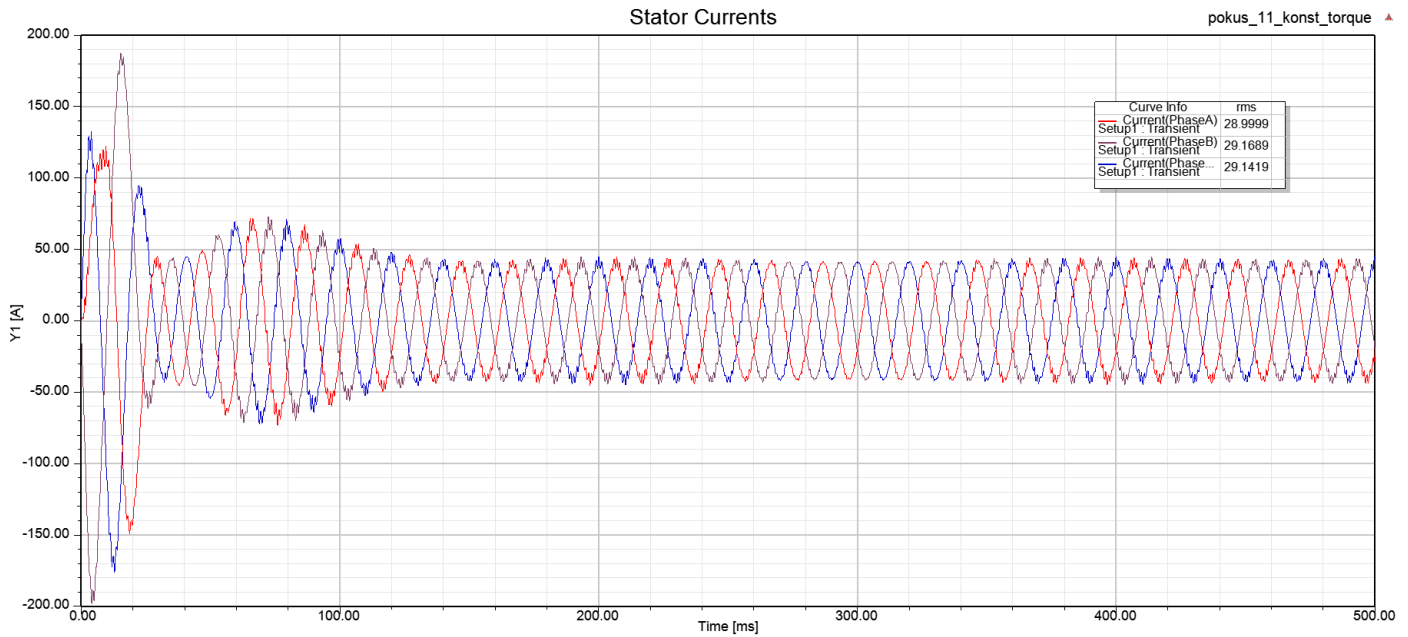
Obrázek 4-7: Průběh vypočítaného příkonu motoru, při jmenovitém chodu

Průběh momentu motoru je zobrazen na Obrázek 4-8, hodnota momentu se ustálila na 102 Nm.



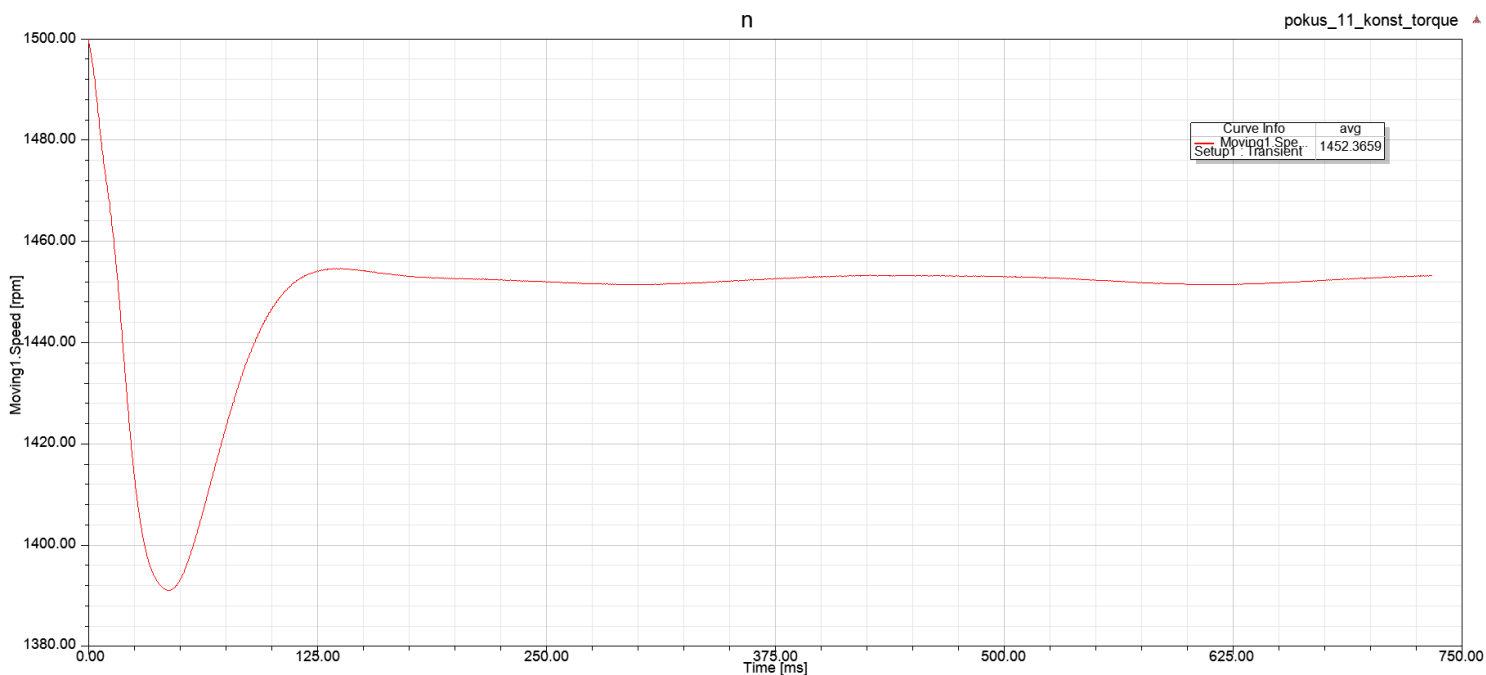
Obrázek 4-8: Průběh momentu, při jmenovitém chodu

Statorové proudy se ustálí přibližně v čase 150 ms, efektivní hodnota ustálených proudů je 29 A, vypočtená hodnota proudu byla 27,1 A.



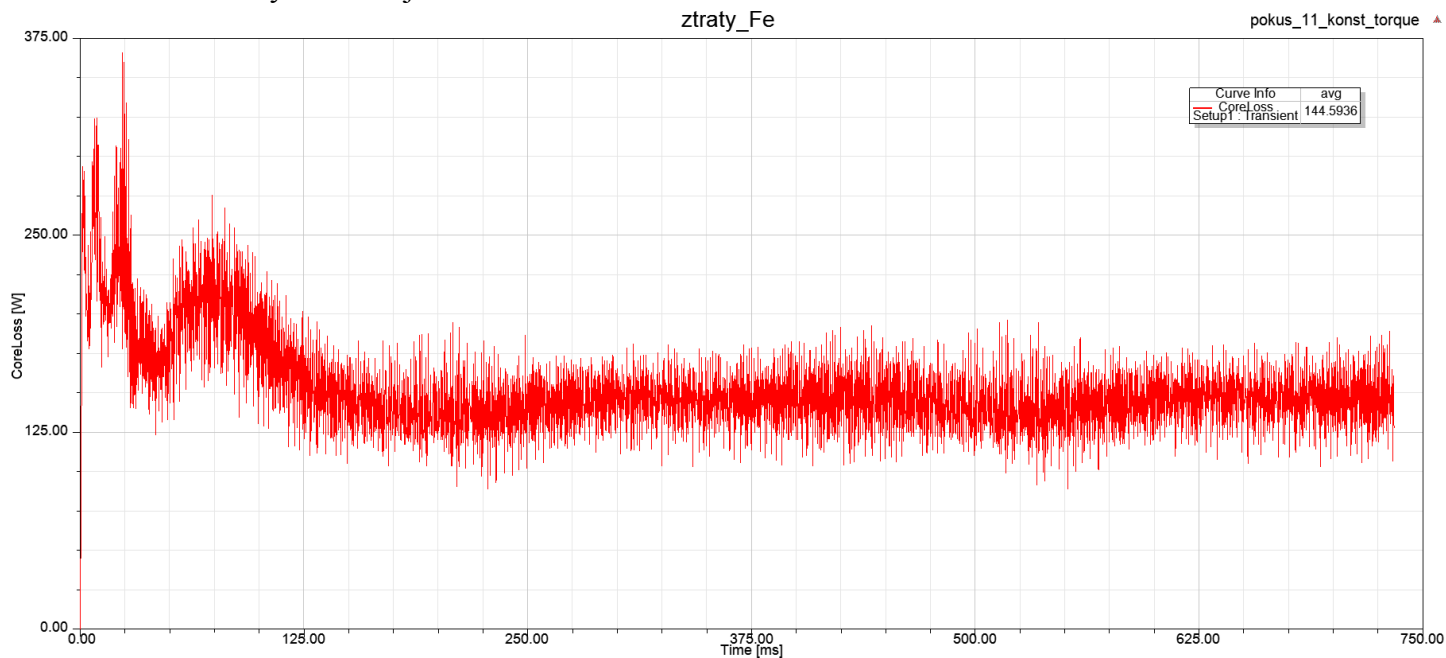
Obrázek 4-9: Průběh statorových proudů, při jmenovitém chodu

Průběh otáček je na Obrázek 4-10, průběh otáček je hladký, to je způsobeno velkým momentem setrvačnosti.



Obrázek 4-10: Průběh otáček motoru, při jmenovitém chodu

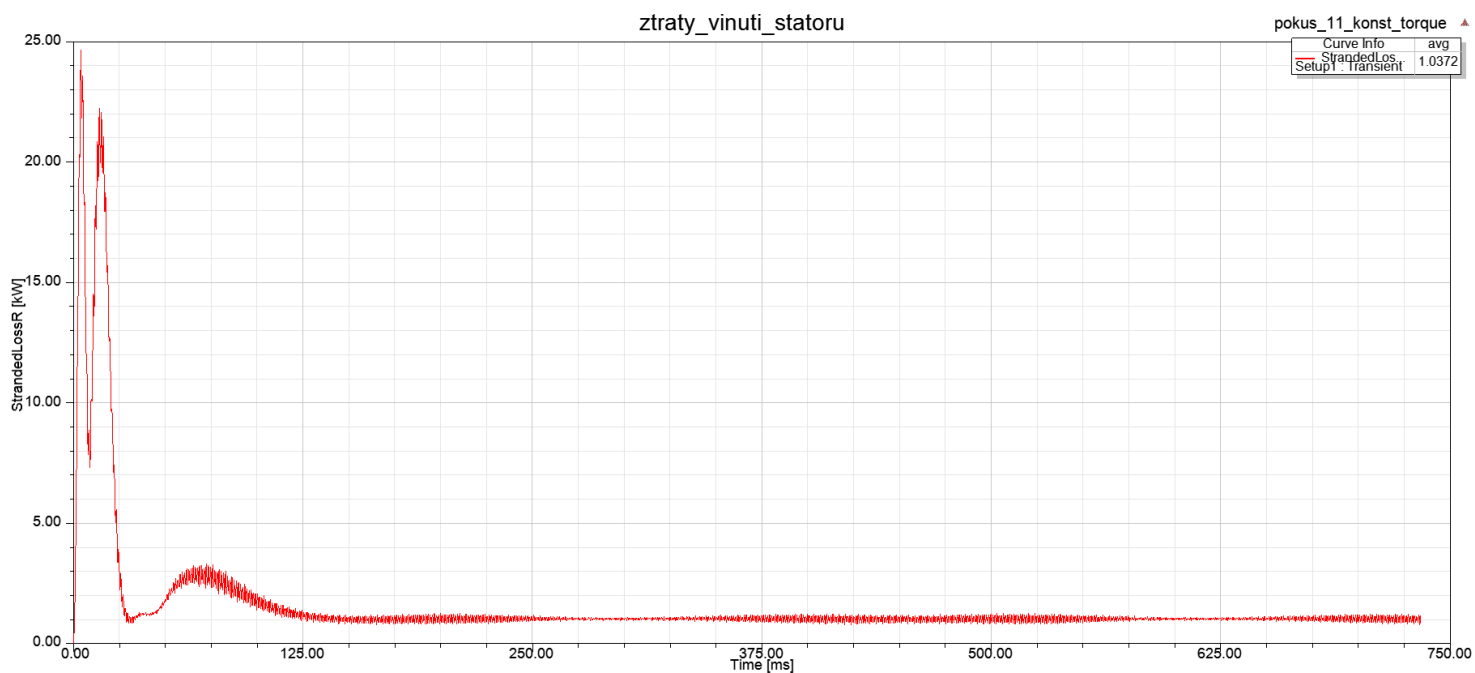
Ztráty v železe jsou na Obrázek 4-11.



**Obrázek 4-11: Ztráty v železe, při jmenovitém chodu**

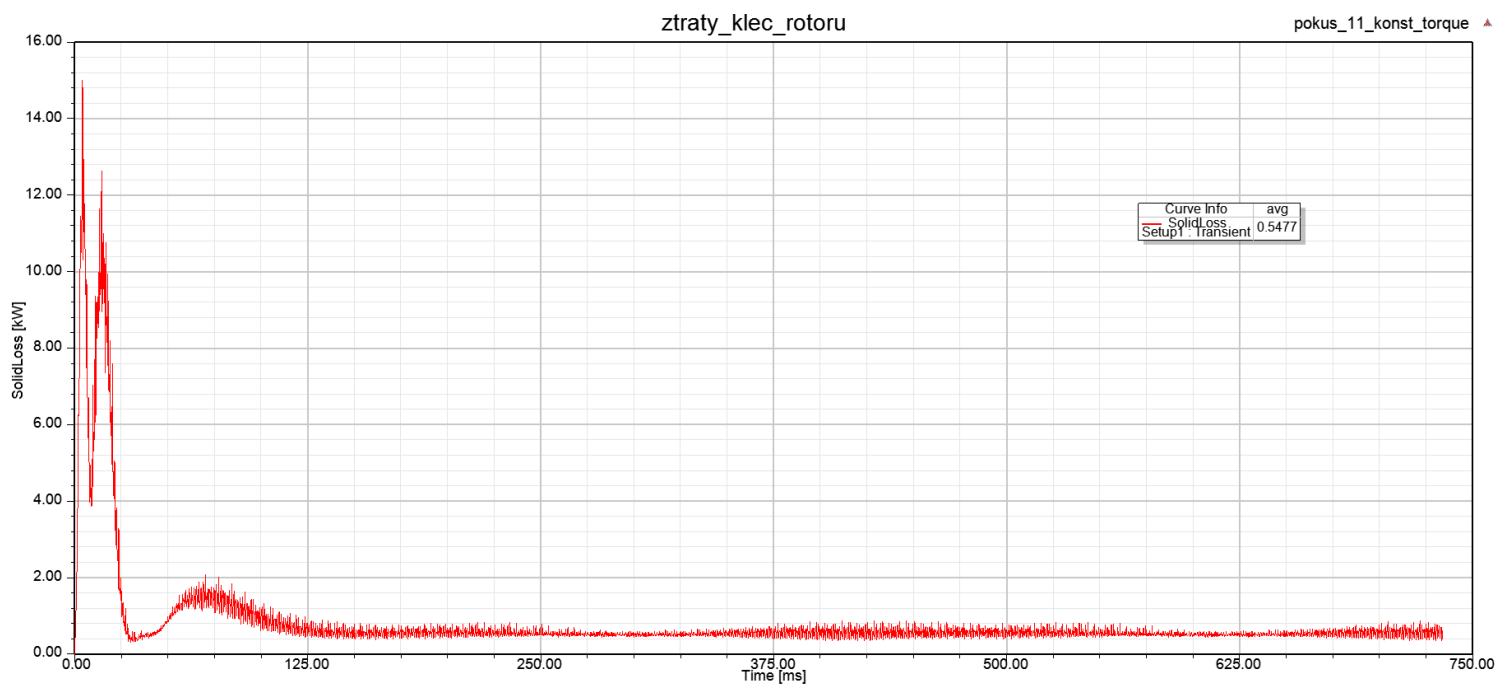
Střední hodnota ztrát v železe v ustáleném stavu je 144 W.

Největší ztráty vznikají ve statorovém vinutí. Je to přibližně polovina z celkových ztrát stroje, velikost ztrát při jmenovitém zatížení je 1037 W v ustáleném stavu, průběh ztrát je na Obrázek 4-12.



**Obrázek 4-12: Ztráty ve statorovém vinutí, při jmenovitém chodu**

V rotorovém vinutí vznikají velké ztráty, po ztrátách ve statorovém vinutí jsou druhé největší ve stroji. Velikost ztrát v kleci rotoru je 548 W v ustáleném stavu.



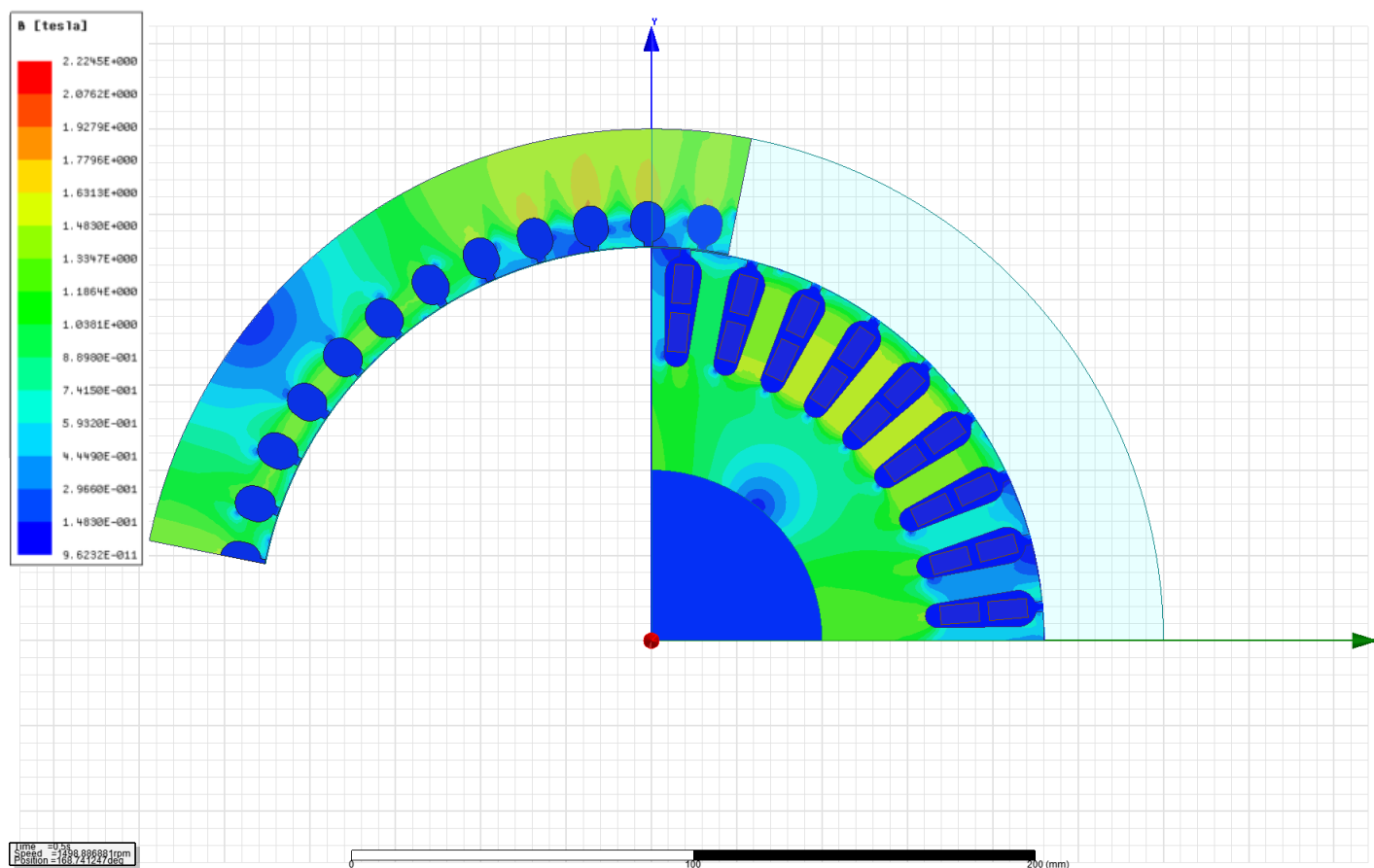
Obrázek 4-13: Ztráty v kleci rotoru, při jmenovitém chodu

Velikost ztrát je dána materiály, které byly použity pro simulaci. Výpočet ztrát je v kapitole 4.3 a 4.4.

### 4.5.3 Chod naprázdno

Motor je napájen sinusovým napětím s frekvencí 50 Hz a zátěžný moment  $M_z = 0 \text{ Nm}$ .

Rozložení magnetické indukce je na



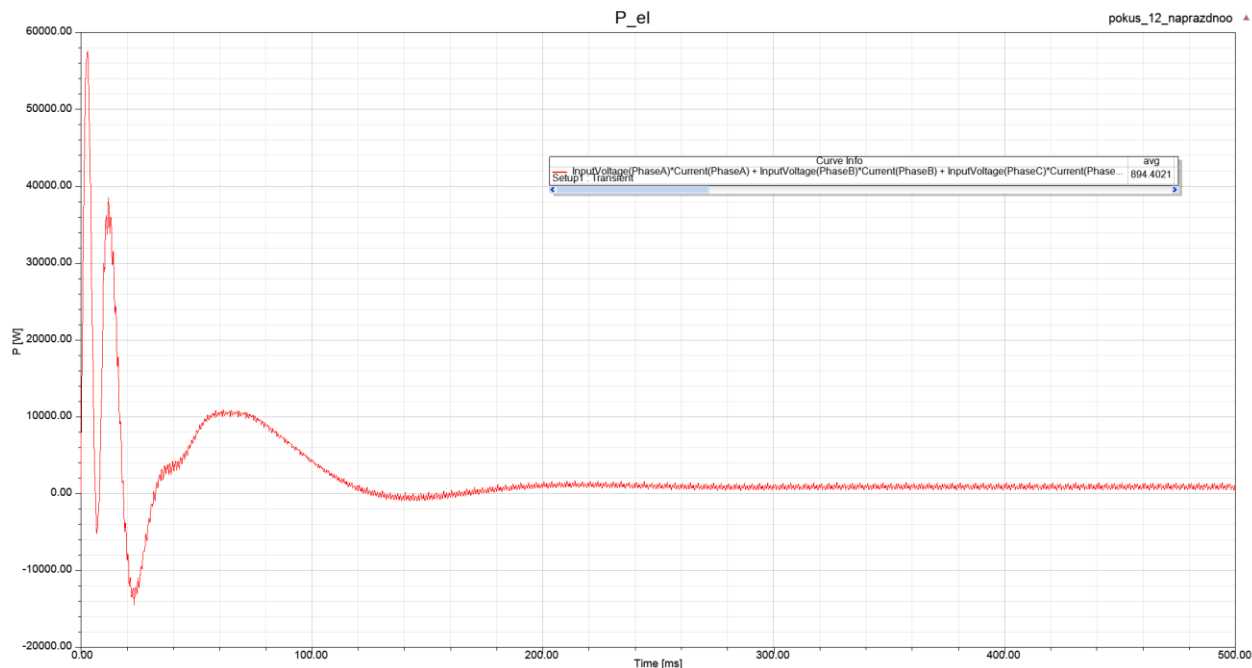
Obrázek 4-14: Rozložení magnetické indukce při chodu naprázdno, v čase 0,73 s

Hodnoty získané ze simulace:

Otáčky	$n$ (ot/min)	1499
Fázový proud	$I_f$ (A)	13,4
Fázové napětí	$U$ (V)	230
Příkon	$P$ (W)	894
Ztráty ve vinutí statoru	$\Delta P_{js}$ (W)	397,2
Ztráty v kleci rotoru	$\Delta P_{jr}$ (W)	88,8
Ztráty v železe	$\Delta P_{Fe}$ (W)	107,7
Ztráty mechanické	$\Delta P_{Mech}$ (W)	300,3
Celkové ztráty	$\Delta P$ (W)	894
Výkon na hřídeli	$P_m$ (W)	0
Moment na hřídeli	$M$ (Nm)	0

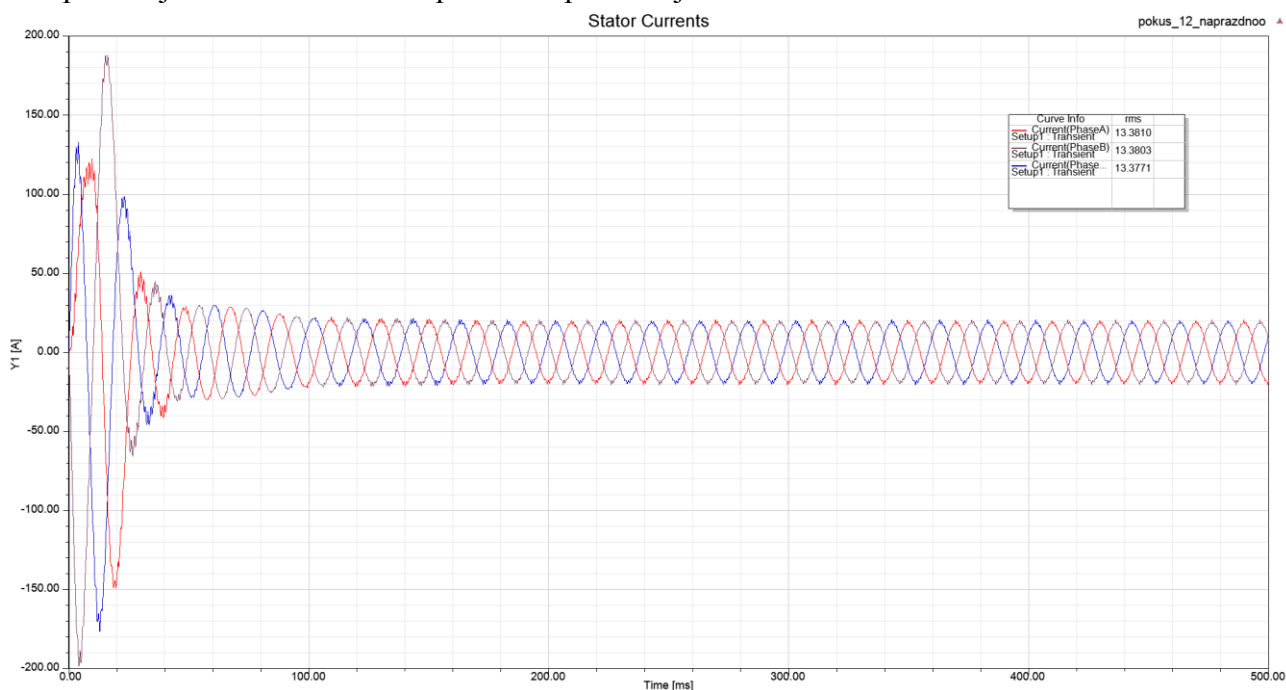
Tabulka 11: Hodnoty získané ze simulace motoru při chodu naprázdno

Velikost příkonu motoru při chodu naprázdno, odpovídá velikosti ztrát motoru, protože motor má nulový mechanický výkon. Velikost příkonu je především dána velikostí ztrát v železe, ve statorovém vinutí a mechanickými ztrátami.



Obrázek 4-15: Příkon motoru, při chodu naprázdno

Velikost proudu naprázdno je podstatně menší než jmenovitý proud motoru, bývá kolem (0,25 – 0,6) proudu jmenovitého. Velikost proudu naprázdno je 13,3 A, tedy 0,46 proudu jmenovitého. Průběh proudu naprázdno je na Obrázek 4-16.



Obrázek 4-16: Proud naprázdno

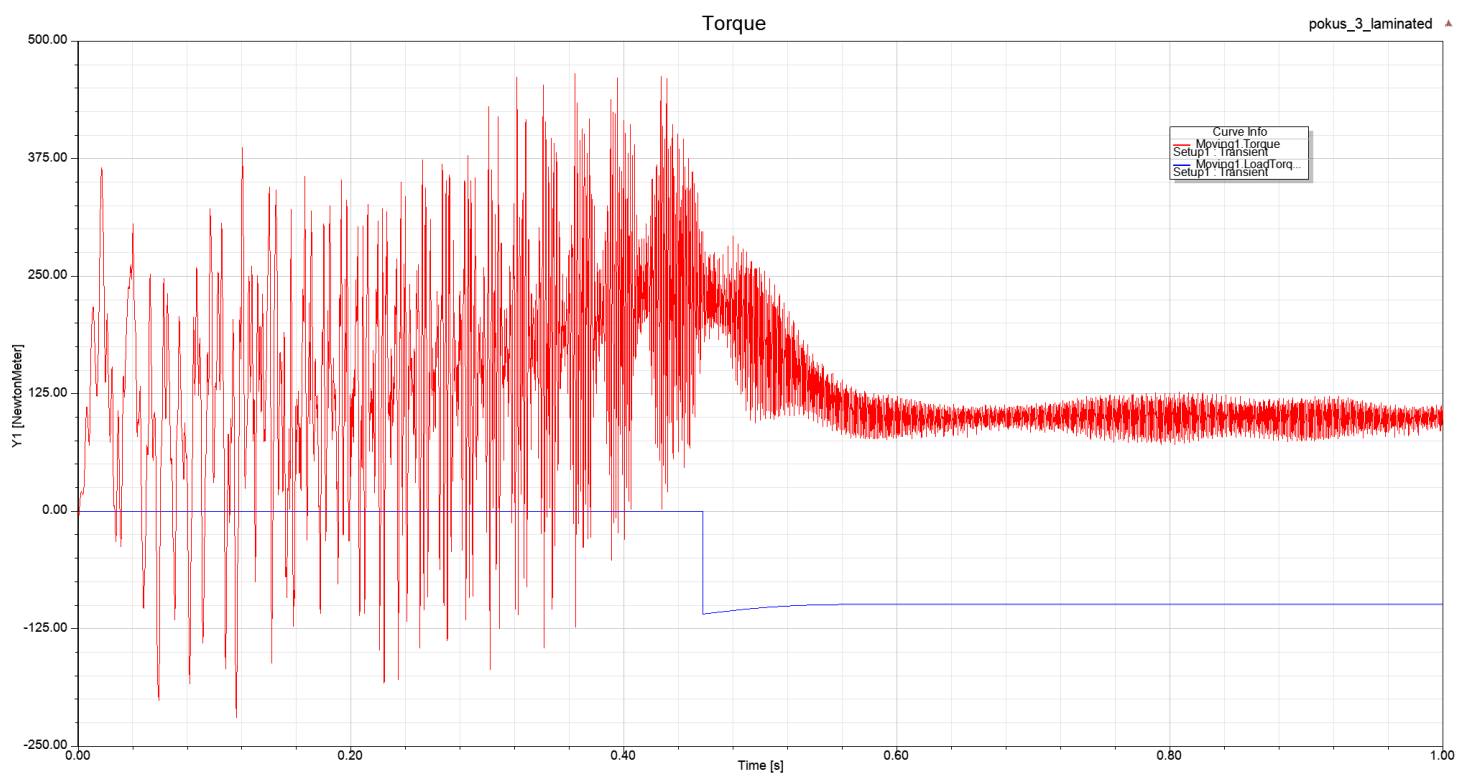


#### 4.5.4 Rozběh motoru s proměnným zátěžným momentem

Rozběh motoru byl simulován přímým připojením na síť 230 V a 50 Hz, byl zvolen zátěžný moment, který byl zadán podmínkou:

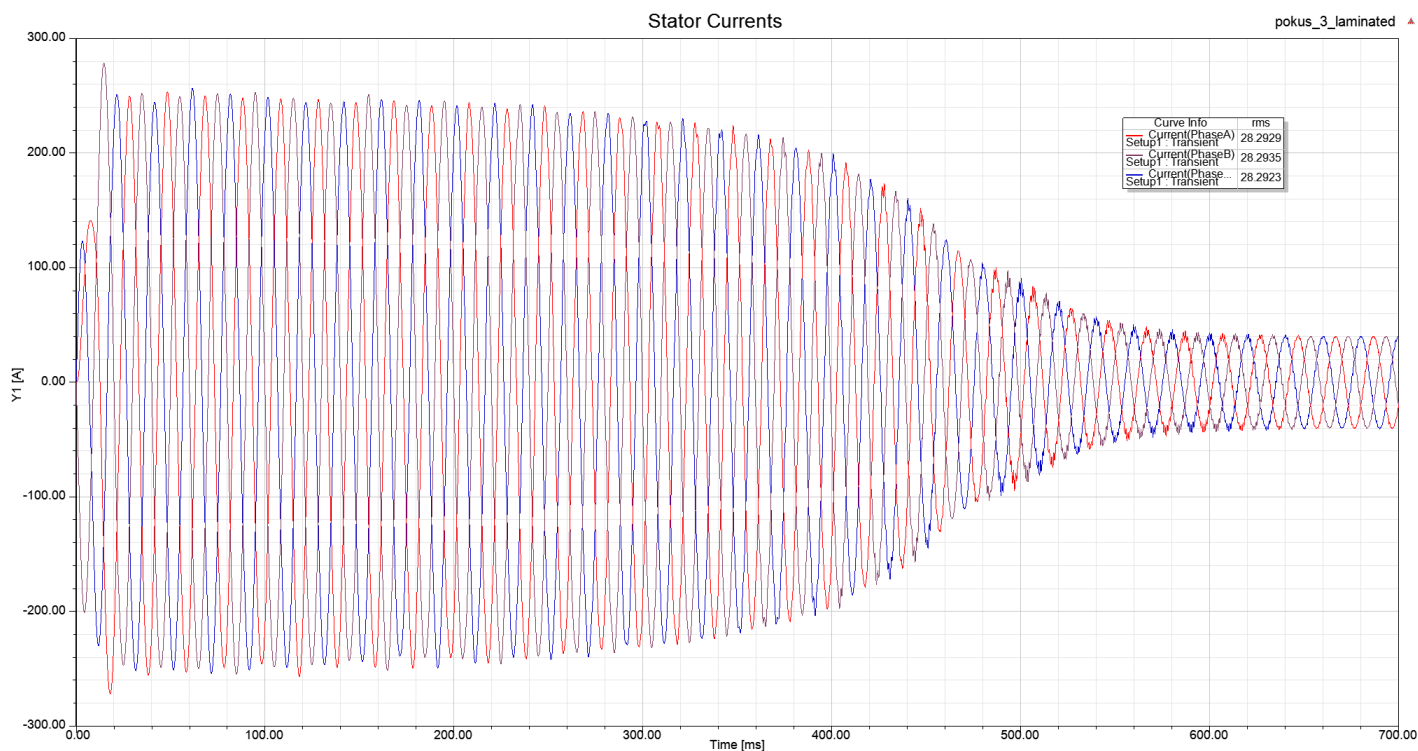
**$\text{if}(\text{speed} < 137.602, -0.000792215 * \text{speed}, -15000 / \text{speed})$**

podmínka popisuje, zátěžný moment, který je do 1314 ot/min téměř nulový a při zvyšování rychlosti nad 1314 ot/min se hodnota zatěžovacího momentu skokově změní na hodnotu 100 Nm. Grafické znázornění této podmínky pro zátěžný moment je na Obrázek 4-17 - modrý průběh.



Obrázek 4-17: Průběh momentů, při proměnné zátěži

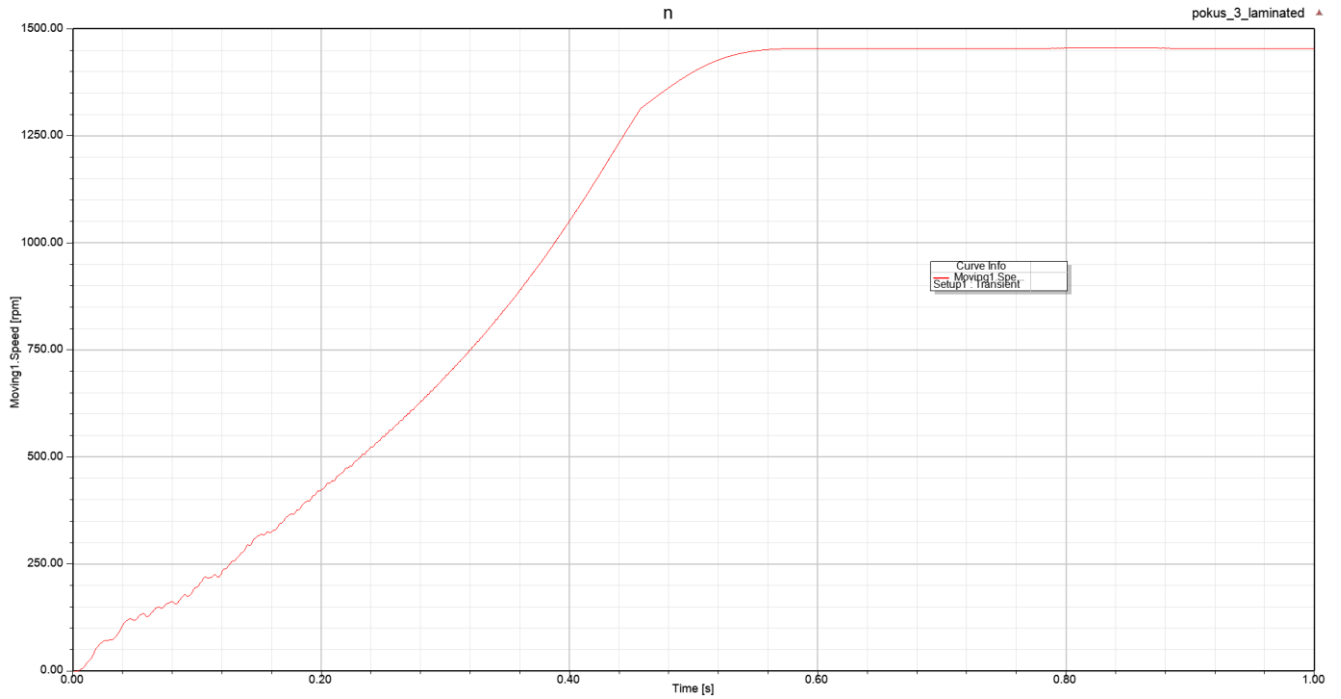
Z průběhu proudu je patrné, že k ustálení proudu dochází v čase 0,6 s hodnota ustáleného proudu je 28,3 A. Tato hodnota je téměř shodná s proudem při jmenovitém chodu viz. kapitola 4.5.2.



**Obrázek 4-18: Průběh statorového proudu, při proměnné zátěži**

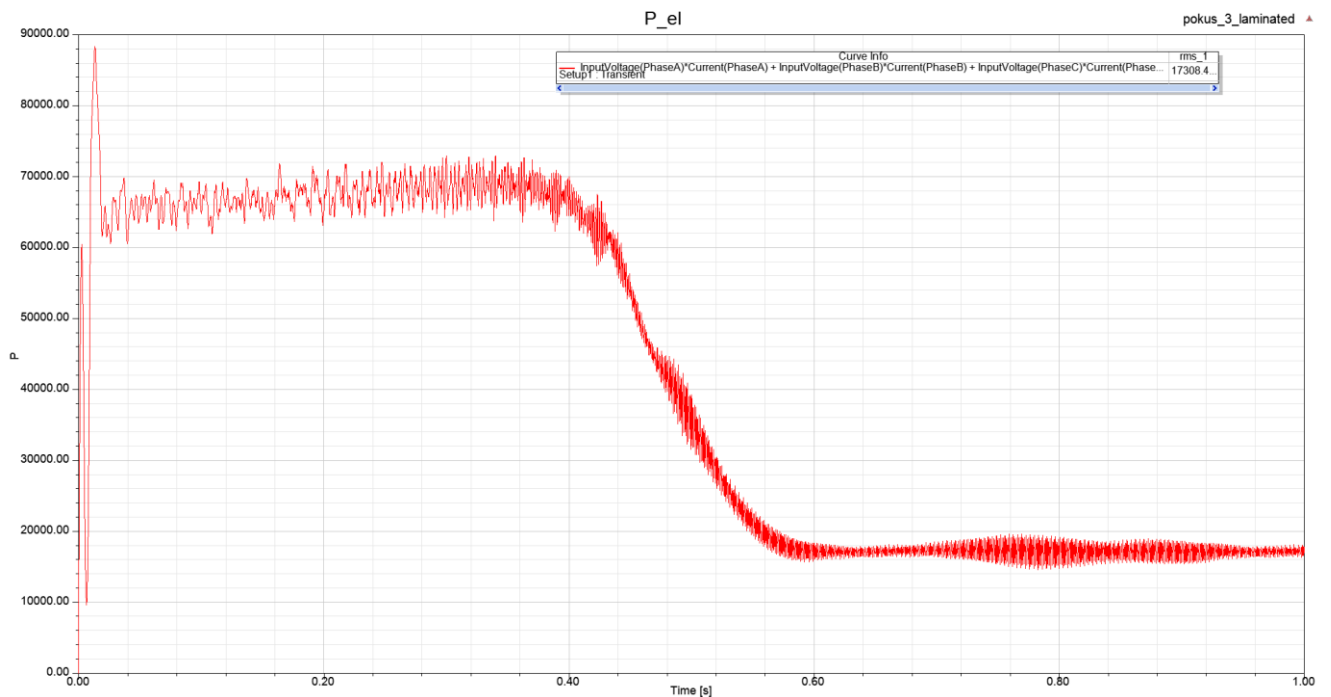
Maximální hodnota proudu je 250 A. Efektivní hodnota proudu při připnutí motoru na síť je přibližně 171 A. Tato hodnota odpovídá 5,9násobku jmenovitého proudu.

Z průběhu otáček je vidět, že motor dosáhne 1450 ot/min v čase 0,55 s. Hladký průběh otáček je způsobený velkým momentem setrvačnosti, který je u motorů s vnějším rotorem podstatně větší než u motorů s vnitřním rotorem.



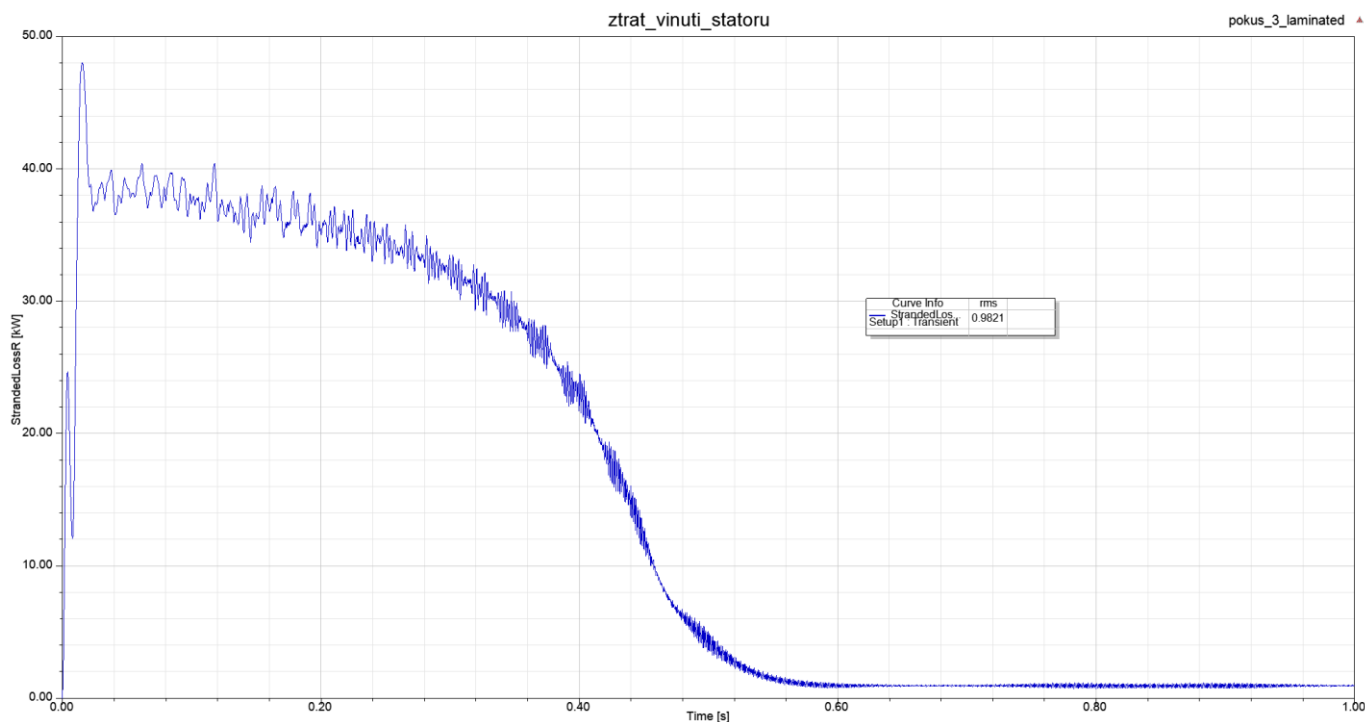
**Obrázek 4-19: Průběh otáček motoru, při proměnné zátěži**

Příkon motoru se ustaluje v čase 0,6 s, kdy se motor dostává do ustáleného stavu. Příkon v ustáleném stavu je 17,3 kW viz. Obrázek 4-20.



**Obrázek 4-20: Příkon motoru, při proměnné zátěži**

Na Obrázek 4-21 je průběh ztrát ve satorovém vinutí, ztráty se postupně ustaluje vlivem snižujícího se proudu procházející vinutím, k ustálení dochází při dosažení jmenovitých otáček rotoru.



**Obrázek 4-21: Průběh ztrát ve satorovém vinutí, při proměnné zátěži**

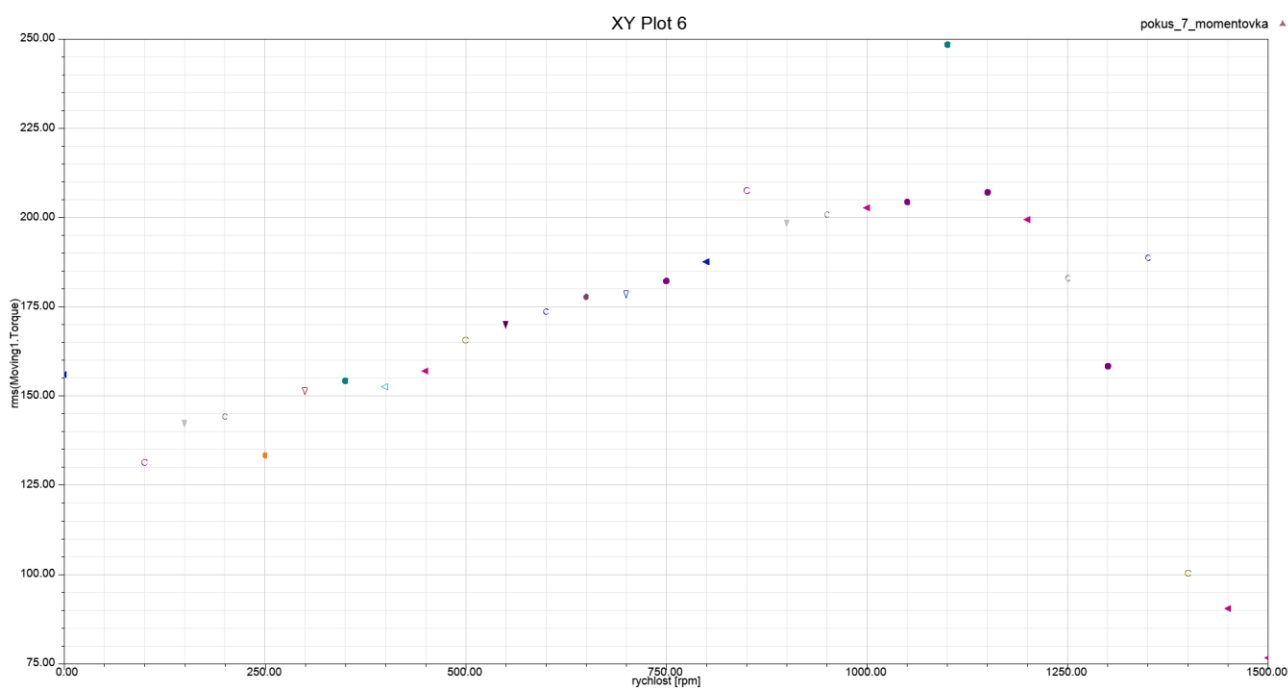
Velikost ztrát ve satorovém vinutí je 980 W v ustáleném stavu tedy od 0,6 s.

Při práci s modelem jsem provedl další simulaci rozběhu s konstantním momentem zátěže 25 Nm, tato simulace je uvedena v Příloha 12 až Příloha 17.

#### 4.5.5 Statická momentová charakteristika

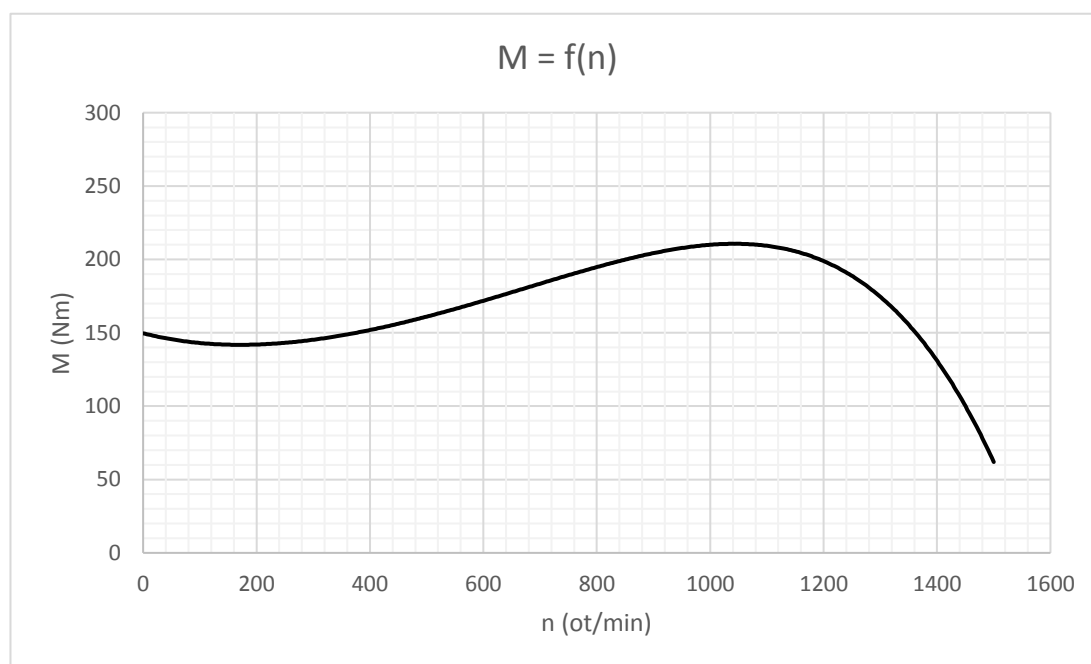
U tohoto typu motoru nelze vytvořit momentovou charakteristiku pomocí RMxprt, proto jsem jí vytvořil v transientním řešiči. Použil jsem funkci „Optimetrics“, kde jsem vytvořil proměnou „rychlost“ s hodnotami od 100 do 1500 ot/min s krokem 50. Proměnou jsem použil při nastavení „MotionSetup“, byly tedy počítány jednotlivé body na momentové charakteristice, pro danou rychlost byla dopočítána hodnota momentu. Tento postup je shodný při měření momentové charakteristiky na reálném motoru.

Tato úloha byla velice časově náročná, protože se jednalo o 30 samostatných úloh, výpočet trval kolem 21 hodin, výsledky této simulace jsou na Obrázek 4-22.



Obrázek 4-22: Momentová charakteristika – body

Hodnoty ze simulace jsem vyexportoval do programu Excel a proložil křivkou:



Obrázek 4-23: Momentová charakteristika – proložení

Pro proložení bodů jsem využil polynomické proložení pátého stupně. Z momentové charakteristiky je zřejmé, že jmenovitý moment 100 Nm je při 1450 ot/min. Maximální hodnota momentu je 210 Nm při 1050 ot/min.

#### 4.6 Napájení z frekvenčního měniče

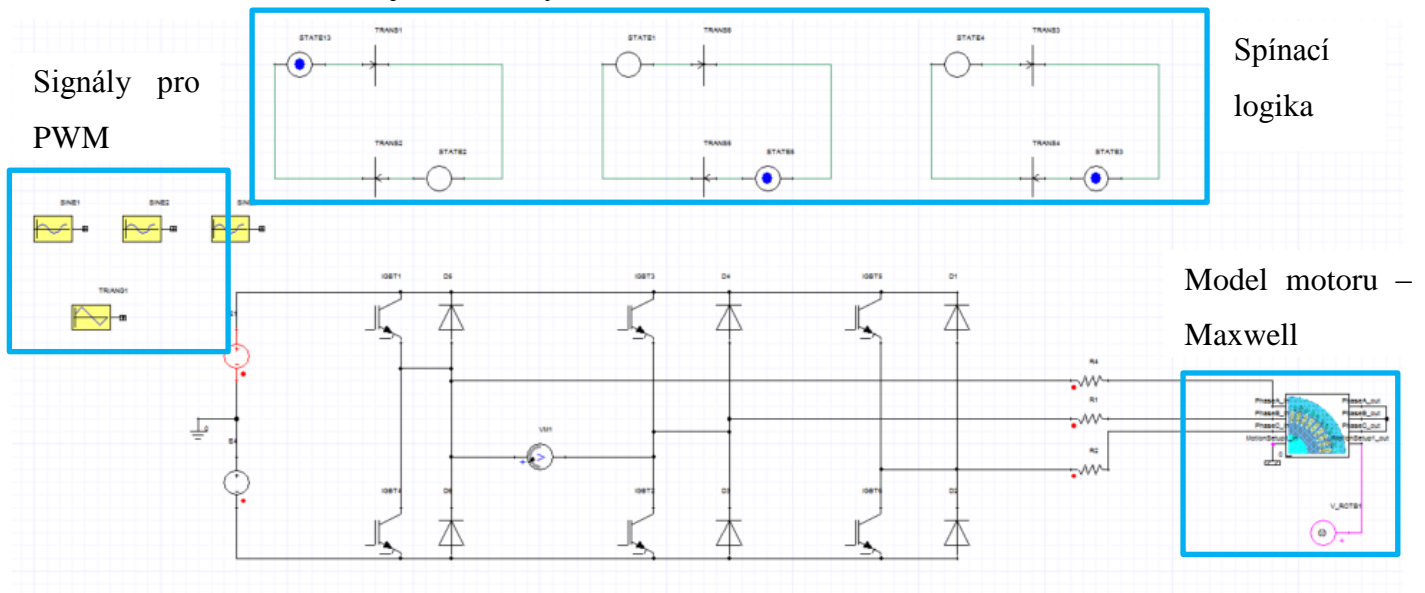
Frekvenční měnič jsem vytvořil v programu Simplorer, který je kompatibilní s programem Maxwell. Simplorer umožňuje vložit model, který byl vytvořen v Maxwell, provede se „Cosimulace“ Pro zapojení a logiku spínání tranzistorů jsem využil lit. [6] a [8].

V měniči je použito 6 tranzistorů IGBT se zpětnými diodami. Dále je použit zdroj SS napětí 540 V s uměle vyvedenou nulou. Tranzistory jsou řízeny PWM, pro spínání tranzistorů je vytvořena logika, tak aby nemohlo dojít k sepnutí obou tranzistorů v jedné větvi. Logika spínání je vytvořena porovnávacím členem, který porovnává hodnotu trojúhelníkového signálu s frekvencí 10 kHz s hodnotou sinusového signálu s hodnotou 50 Hz. Takto vytvořený PWM signál je připojen na řídicí elektrodu IGBT. [8]

Při použití takto vysokého kmitočtu je nutné zvolit nízký vzorkovací interval, pro simulaci jsem použil 10  $\mu$ s. Díky nízkému vzorkovacímu intervalu, je doba výpočtů velice časově náročná, simulace trvají řádově desítky hodin.

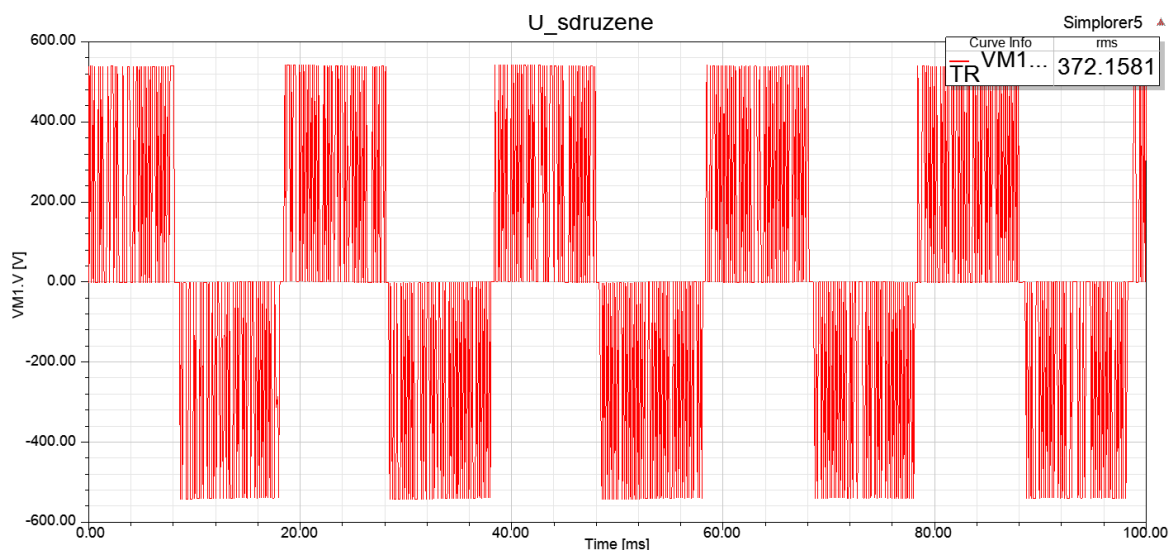
Motor byl při simulacích zatížen konstantními otáčkami 1450 ot/min, toto zatížení jsem uvažoval jako jmenovité.

Na Obrázek 4-24 je schéma vytvořeného měniče



Obrázek 4-24: Frekvenční měnič – Simplorer

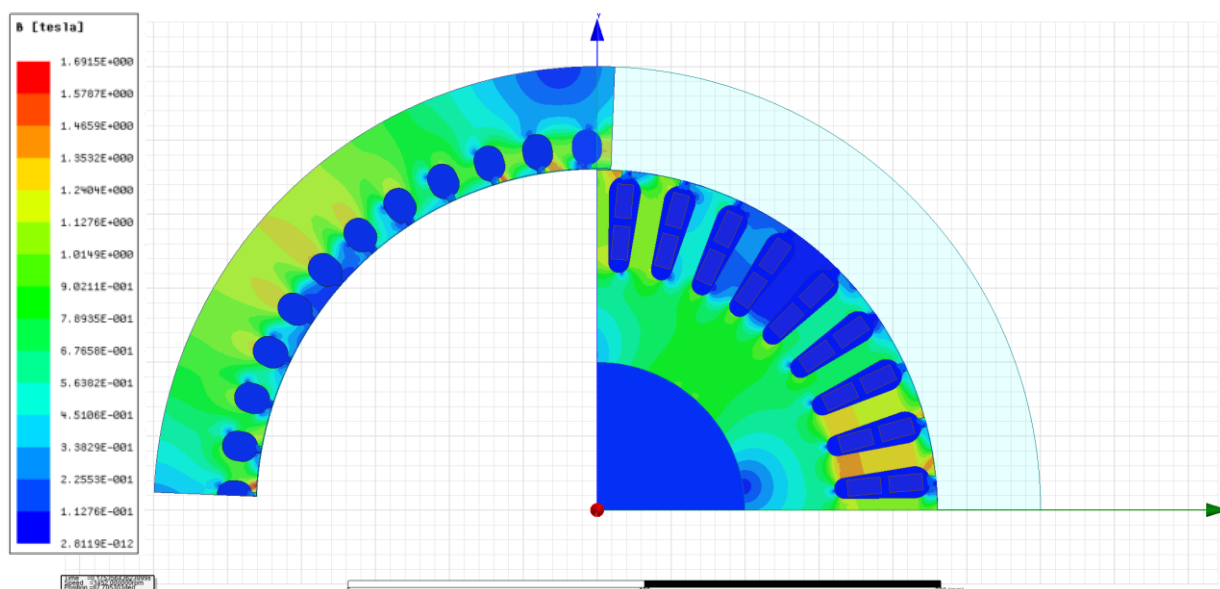
Velikost a průběh výstupního sdrúženého napětí z měniče je na Obrázek 4-25.



Obrázek 4-25: Výstupní sdrúžené napětí měniče

#### 4.6.1 Zatížený motor napájený z frekvenčního měniče

Rozložení magnetické indukce ve stroji při napájení z frekvenčního měniče je na Obrázek 4-26. Velikost magnetické indukce je nižší při napájení z měniče, z tohoto důvodu je možné usoudit, že motor nebyl zatížen na jmenovité hodnoty.



Obrázek 4-26: Rozložení magnetické indukce, při napájení z měniče v čase  $t=175$  ms.

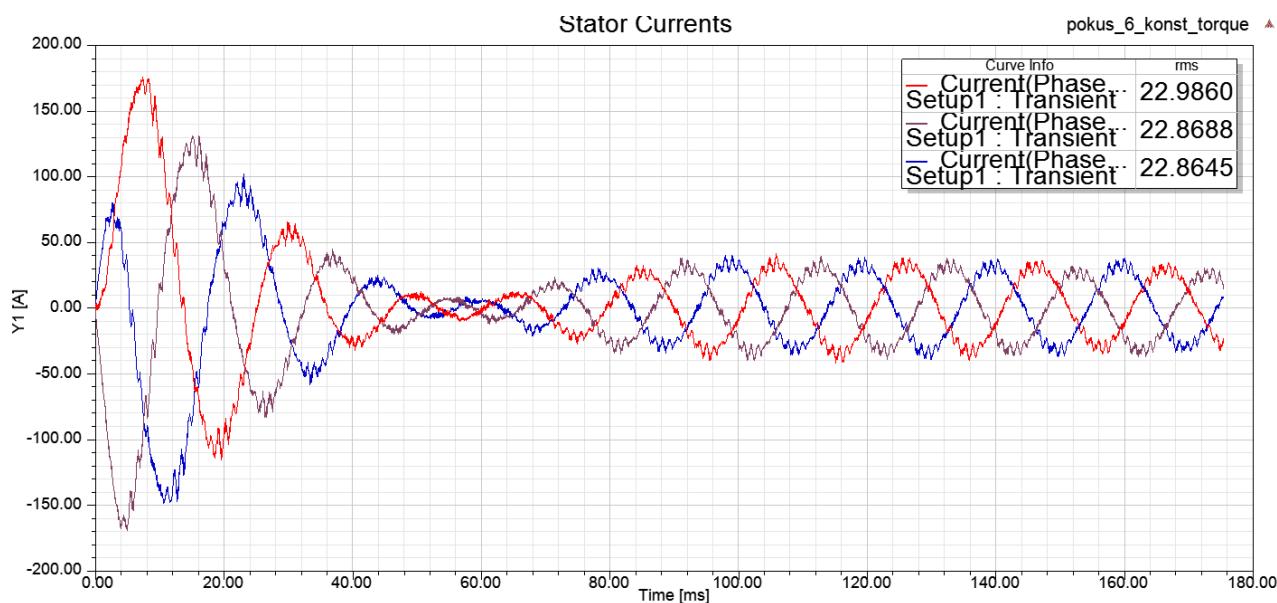
Hodnoty získané ze simulace jsou uvedeny v Tabulka 12.

Otáčky	$n$ (ot/min)	1450
Fázový proud	$I_f$ (A)	23
Fázové napětí	$U$ (V)	215
Příkon	$P$ (W)	10753,2
Ztráty ve vinutí statoru	$\Delta P_{js}$ (W)	127
Ztráty v kleci rotoru	$\Delta P_{jr}$ (W)	432,5
Ztráty v železe	$\Delta P_{Fe}$ (W)	160,8
Ztráty mechanické	$\Delta P_{Mech}$ (W)	0
Celkové ztráty	$\Delta P$ (W)	694,2
Výkon na hřídeli	$P_m$ (W)	10059
Moment na hřídeli	$M$ (Nm)	66,1

Tabulka 12: Hodnoty získané ze simulace motoru, při napájení z měniče.

Z výsledků simulace je patrné, že motor nebyl zatížen na jmenovité hodnoty. Mechanické ztráty jsou nulové, protože při použití externího obvodu vytvořeného v Simploreru, nejsou uvažována nastavení „Motion Setup“, tedy i mechanické ztráty.

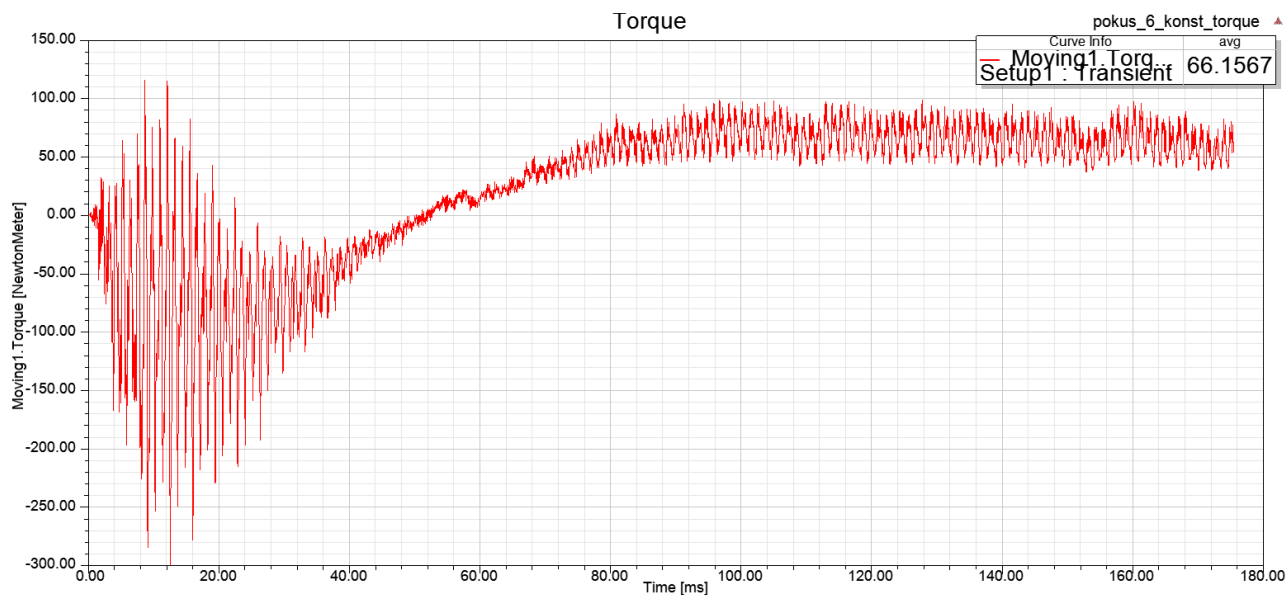
Průběh proudů je na Obrázek 4-27



Obrázek 4-27: Průběh proudů, při napájení z měniče



Průběh momentu stroje je na Obrázek 4-28.



**Obrázek 4-28: Průběh moment, při napájení z měniče**

Simulace byla provedena propojením SW Maxwell a Simplorer. Při napájení z frekvenčního měniče vznikají přídavné ztráty vlivem vyšších harmonických, které se u napájení z měniče vyskytují. Vyšší ztráty se projeví ve ztrátách v železe, které jsou vyšší než při jmenovitém zatížení.

Časová náročnost těchto simulací je příliš vysoká, proto jsem vytvořil pouze jednu simulaci motoru napájeného z měniče. Simulace trvala v řádech dní.

## 5 Analýza shromážděných dat

Mezi shromážděná data patří v první řadě geometrické rozměry stroje, statorových, respektive rotorových drážek, které jsou uvedeny v kapitole 2.3.3.1. Počet drážek byl zvolen tak, aby byl zachován počet statorových a rotorových drážek stejný, jako u asynchronního motoru s vnitřním rotorem. Geometrické rozměry drážek jsem konzultoval s vedoucím práce a s doc. Ing. Petrem Voženílkem, CSc. který se podrobně zabývá asynchronními motory. Při návrhu drážky jsem dále vycházel ze získaného motoru s vnějším rotorem od firmy ElektroDesign viz. Obrázek 2-17. Geometrické rozměry rotorových drážek ovlivňují tvar momentové charakteristiky, proto jsem považoval za účelné porovnat několik provedení.

Parametry stroje vypočtené dle lit. [3] jsou uvedeny v kapitole 2.2. Z vypočtených hodnot jsem sestrojil kruhový diagram, který je uveden v Příloha 11.

Data získaná ze simulací jsou uvedena v kapitole 4.5. První simulace byla provedena v magnetostatickém řešiči a sloužila k analýze využití magnetického obvodu statoru a rotoru, tato simulace byla velice podstatná pro určení geometrických rozměrů stroje. Simulace byla provedena jak ve 2D tak ve 3D modelu, na základě jejich porovnání jsem usoudil, že 2D modely jsou dostačující, protože hodnoty magnetické indukce ve 2D a v rovině centrálního řezu 3D jsou téměř shodné.

V transientním řešiči jsem provedl simulace přechodného děje do ustáleného chodu při jmenovitém zatížení, dále rovněž při chodu naprázdno a také rozběh motoru na jmenovité otáčky.

Hodnoty získané ze simulace při jmenovitém zatížení jsem porovnával s analyticky vypočtenými hodnotami viz. Tabulka 13.

		Simulace	Výpočet
Otáčky	n (ot/min)	1452	1450
Fázový proud	$I_f$ (A)	29	27,1
Fázové napětí	U (V)	230	230
Příkon	P (W)	17646	17174
Ztráty ve vinutí statoru	$\Delta P_{js}$ (W)	1037	788
Ztráty v kleci rotoru	$\Delta P_{jr}$ (W)	547	702
Ztráty v železe	$\Delta P_{Fe}$ (W)	144,6	202
Ztráty mechanické	$\Delta P_{Mech}$ (W)	393,4	365
Celkové ztráty	$\Delta P$ (W)	2122	2174
Výkon na hřídeli	$P_m$ (W)	15524	15000
Moment na hřídeli	M (Nm)	100	100
Účinnost	$\eta$ (%)	87,97	87,34

**Tabulka 13: Porovnání vypočtených hodnot a hodnot ze simulace**

Analyticky vypočtené hodnoty se oproti simulacím nutně liší, toto je jednak způsobeno koeficienty, které byly při výpočtech voleny a zejména odhadem nasycení magnetického obvodu jednotlivých částí stroje v analytickém postupu.

Největší rozdíl mezi vypočtenými hodnotami a hodnotami získaných ze simulace je v oblasti ztrát stroje, to je způsobeno odhadem nasycení magnetického obvodu stroje. Hodnota ze simulace je přesnější, protože při simulaci je velikost magnetické indukce přesně vypočítána pro danou část magnetického obvodu stroje.

Při simulaci chodu naprázdno odpovídá velikost ztrát příkonu stroje. Hlavními složkami ztrát při chodu naprázdno jsou, ztráty ve statorovém vinutí, ztráty v železe a mechanické ztráty viz. Tabulka 11. celkové ztráty činí 894 W z toho 397 W jsou ztráty ve vinutí statoru. Statorovým vinutím prochází proud naprázdno 13,4 A. Proud naprázdno činí  $0,46 \cdot I_f$ . To odpovídá předpokladů z lit. [5], kde se udává pro proud naprázdno  $(0,25 \div 0,6) I_f$ .

Simulace rozběhu motoru, jsem provedl s proměnlivým momentem zátěže viz. kapitola 4.5.4. Pro napájení stroje jsem použil třífázovou síť s 230 V a 50 Hz, jedná se tedy o přímé připojení k napájecí síti. Při přímém připojení k síti vzniká v motoru záběrný proud, v mém případě je efektivní hodnota záběrného proudu 171 A tedy přibližně 6násobek proudu jmenovitého. Z průběhu otáček viz. Obrázek 4-19 jsem určil dobu rozběhu na 0,6 s. Stroj s vnějším rotorem má velký moment setrvačnosti  $J = 0,485 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , proto je průběh otáček hladký.

Dále jsem sestrojil v transientním řešiči statickou momentovou charakteristiku motoru Obrázek 4-23, z této charakteristiky lze odečíst hodnoty, které jsou důležité pro použití stroje. Záběrný moment stroje je přibližně 150 Nm, maximální moment je 210 Nm při 1050 ot/min. Jmenovitý moment činí 100 Nm při 1450 ot/min. Momentová charakteristika není zcela optimální, optimalizací geometrických rozměrů se docílí zlepšení momentové charakteristiky.

Poslední simulaci jsem provedl pro stroj napájený z frekvenčního měniče. Měnič jsem vytvořil v SW Simplorer, kde jsem dle [6] vytvořil spínací logiku pro IGBT, pro napájení jsem použil SS zdroj s 540 V a s uměle vyvedenou nulou. PWM signál jsem vytvořil pomocí sinusového signálu a pilového signálu, pilový signál měl frekvenci 10 kHz. Motor jsem zatížil zdrojem otáček, tomuto zatížení odpovídal moment zátěže 66 Nm. Proudů na statoru při daném zatížení činí 23 A viz. Obrázek 4-27. Ztráty v železe při napájení z měniče jsou vyšší než při jmenovitém chodu, činí 160 W. Zvýšení ztrát je způsobeno frekvenčním měničem, protože se do stroje dostávají vyšší harmonické složky.

Další simulace s měničem jsem nerealizoval z důvodu dlouhé doby výpočtů simulace.

## 6 Závěr

Diplomová práce je zaměřená na návrh třífázového asynchronního motoru 15 kW s vnějším rotorem. Motor je určen k aplikaci v trakci se záměrem umožnit pozdější konstrukční úpravu, jako nábojového stroje.

Pro návrh stroje jsem využil program Electronics od společnosti ANSYS, který je zaměřen na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční analýzy. Pro návrh stroje jsem využil expertní modul RMXprt, který slouží k rychlému návrhu točivých strojů. RMXprt je pouze analytický návrhový modul, který obsahuje základní typy elektrických strojů. Návrh atypických provedení jako je i indukční stroj s vnějším rotorem není v modulu obsažen. Proto jsem k návrhu modelu pro simulace v RMXprt použil obecný modul GRM (Generic Rotation Machine), který slouží k tvorbě 3D respektive 2D modelů, možnost analytického návrhu však neposkytuje. Z tohoto důvodu jsem v kapitole 2.2 navrhl geometrické rozměry a parametry motoru „ručně“ dle [3].

Z takto získaných dat jsem dále pomocí modulu RMXprt vytvořil model stroje pro simulace MKP v programu Maxwell 3D. Nejprve jsem pomocí magnetostatického řešiče na 3D simulaci magnetického pole ověřil využití magnetického obvodu stroje. Nejvyšší hodnota magnetické indukce v oblasti drážkování nepřesahuje 1,83 T viz. Obrázek 4-4. To pro daný materiál, tj. elektrotechnickou ocel M27\_29G považuji za dostatečné využití.

U dalších simulacích jsem se zaměřil na přechodné děje motoru, proto jsem využil transientní řešič, který umožňuje časově závislé simulace. Nejprve jsem analyzoval ustálený stav při jmenovitém chodu, protože model navržený v RMXprt z něho vychází. Výsledky simulace jsem porovnal s analyticky vypočtenými daty, toto porovnání je uvedeno v kapitole 5.

Dále jsem provedl simulace stroje, při chodu naprázdno viz. kapitola 4.5.3. V této simulaci jsem ověřoval velikost proudu naprázdno v ustáleném stavu, který činí 13,3 A resp. 0,46 násobek proudu jmenovitého. Dále ztráty naprázdno, které jsou v daném případě 894 W což je cca 2,5krát méně než při jmenovitém chodu.

Dále jsem se v kapitole 4.5.4 zabýval dynamickým rozběhem motoru s proměnlivým zátěžným momentem a na základě 30 takto provedených analýz jsem odvodil statickou mechanickou (momentovou) charakteristiku viz. Obrázek 4-23.

Nakonec jsem, vzhledem k tomu, že stroj je určen pro aplikaci v trakci a bude rozbíhán frekvenčně, v kapitole 4.6.1 simuloval jeho napájení z měniče s PWM modulací.

Domnívám se, že vzhledem k výše uvedeným analýzám jsem všechny požadavky zadání DP splnil. Na závěr chci konstatovat, že některé výsledky analýz mě nyní inspirují k úpravám, které by přinesly zlepšení charakteristik navrženého motoru, to však již bylo nad mé časové možnosti a je mimo rámec DP.

## 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, Žilina, 2001
- [3] Kotal M., Novotný P., Voženílek P., Příklady výpočtu elektrických strojů točivých ČVUT FEL, 1974
- [4] Manuály ANSYS RMXprt, Maxwell 3D, Techsoft-engineering 2017
- [5] Voženílek P., Novotný V., Mind P., Elektromechanické měniče, ČVUT FEL 2011
- [6] Pavelka J., Čerovský Z., Lettl J., Výkonová elektronika, ČVUT FEL 2009
- [7] Chen Yicheng. An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitacion, Clarkson University NY, USA, 2002
- [8] Miroslav P., Matematický nástroj pro analýzu PWM signálů, jeho užití ve střídavých pohonech, VUT – Fakulta elektrotechniky a informatiky 2000
- [9] Kopylov, Igor Petrovič, Stavba elektrických strojů. Praha 1, 1988. Moskva nakladatelství Mir. 1980
- [10] Klíma J., Analýza vysokootáčkového asynchronního motoru, VUT – Fakulta elektrotechniky a informatiky 2014
- [11] Maged I., Modeling of Core Losses in Electrical Machine, Concordia University Canada 2011.
- [12] Virlan B., Simion A., Livadaru L., Benelghali S., Outbib R., Analysis of a Three Phase IM with outer Rotor for Multi-speed Applications, IEEE 2012.
- [13] Swathi S., Design of Outer Rotor IM Alternative to PMSM with Fixed Stator, McGill University Quebec 2015

## Přílohy

Solutions: outer\_rotor - ASM-porovnani

Simulation: Setup1 Performance

Design Variation: ...

Performance Design Sheet Curves

GENERAL DATA	
Given Output Power (kW):	13
Rated Voltage (V):	380
Winding Connection:	Wye
Number of Poles:	4
Given Speed (rpm):	1460
Frequency (Hz):	50
Stray Loss (W):	65
Frictional Loss (W):	100
Windage Loss (W):	200
Operation Mode:	Motor
Type of Load:	Fan Load
Operating Temperature (C):	115
STATOR DATA	
Number of Stator Slots:	36
Outer Diameter of Stator (mm):	291
Inner Diameter of Stator (mm):	184
Type of Stator Slot:	3
Stator Slot	
hs0 (mm):	0.6
hs1 (mm):	1.08
hs2 (mm):	23.82
bs0 (mm):	3.1
bs1 (mm):	9
bs2 (mm):	13.15
rs (mm):	0
Top Tooth Width (mm):	7.36147
Bottom Tooth Width (mm):	7.37936
Length of Stator Core (mm):	123
Stacking Factor of Stator Core:	0.97
Type of Steel:	steel_1008
Number of lamination sectors	0
Press board thickness (mm):	0
Magnetic press board	No
Number of Parallel Branches:	1
Type of Coils:	21
Coil Pitch:	7
Number of Conductors per Slot:	20
Number of Wires per Conductor:	3
Wire Diameter (mm):	1.45
Wire Wrap Thickness (mm):	0.11
Wedge Thickness (mm):	3
Slot Liner Thickness (mm):	0.3
Layer Insulation (mm):	0.3
Slot Area (mm <sup>2</sup> ):	272.2
Net Slot Area (mm <sup>2</sup> ):	220.327
Slot Fill Factor (%):	66.2723
Limited Slot Fill Factor (%):	75
Wire Resistivity (ohm.mm <sup>2</sup> /m):	0.0217
Conductor Length Adjustment (mm):	10
End Length Correction Factor	1
End Leakage Reactance Correction Factor	1

Příloha 1 RMXprt - Solution data: General, Stator



Solutions: outer\_rotor - ASM-porovnani

Simulation: Setup1 Performance

Design Variation: ...

Performance Design Sheet Curves

ROTOR DATA	
Number of Rotor Slots:	46
Air Gap (mm):	0.45
Inner Diameter of Rotor (mm):	60
Type of Rotor Slot:	3
Rotor Slot	
hs0 (mm):	0.4
hs1 (mm):	1.4
hs2 (mm):	28
bs0 (mm):	1.5
bs1 (mm):	3.5
bs2 (mm):	3.5
rs (mm):	1
Cast Rotor:	Yes
Half Slot:	No
Length of Rotor (mm):	123
Stacking Factor of Rotor Core:	0.97
Type of Steel:	steel_1008
Skew Width:	0
End Length of Bar (mm):	0
Height of End Ring (mm):	33
Width of End Ring (mm):	14
Resistivity of Rotor Bar at 75 Centigrade (ohm.mm <sup>2</sup> /m):	0.0434783
Resistivity of Rotor Ring at 75 Centigrade (ohm.mm <sup>2</sup> /m):	0.0434783
Magnetic Shaft:	No
MATERIAL CONSUMPTION	
Armature Copper Density (kg/m <sup>3</sup> ):	8900
Rotor Bar Material Density (kg/m <sup>3</sup> ):	2700
Rotor Ring Material Density (kg/m <sup>3</sup> ):	2700
Armature Core Steel Density (kg/m <sup>3</sup> ):	7872
Rotor Core Steel Density (kg/m <sup>3</sup> ):	7872
Armature Copper Weight (kg):	12.945
Rotor Bar Material Weight (kg):	1.60665
Rotor Ring Material Weight (kg):	1.17016
Armature Core Steel Weight (kg):	28.2877
Rotor Core Steel Weight (kg):	17.5309
Total Net Weight (kg):	61.5404
Armature Core Steel Consumption (kg):	56.2074
Rotor Core Steel Consumption (kg):	24.974

Příloha 2 RMxprt - Solution data: Rotor, Material consumption

Solutions: outer\_rotor - ASM-porovnaní

Simulation: Setup1 Performance

Design Variation:

Performance Design Sheet Curves

RATED-LOAD OPERATION	
Stator Resistance (ohm):	0.484019
Stator Resistance at 20C (ohm):	0.352642
Stator Leakage Reactance (ohm):	0.693948
Rotor Resistance (ohm):	0.264843
Rotor Leakage Reactance (ohm):	0.85798
Resistance Corresponding to Iron-Core Loss (ohm):	1.945e+007
Magnetizing Reactance (ohm):	30.7597
Stator Phase Current (A):	24.0297
Current Corresponding to Iron-Core Loss (A):	1.03965e-005
Magnetizing Current (A):	6.57391
Rotor Phase Current (A):	22.494
Copper Loss of Stator Winding (W):	838.453
Copper Loss of Rotor Winding (W):	402.017
Iron-Core Loss (W):	0.00630686
Frictional and Windage Loss (W):	297.898
Stray Loss (W):	65
Total Loss (W):	1603.37
Input Power (kW):	14.4868
Output Power (kW):	12.8834
Mechanical Shaft Torque (N.m):	84.5199
Efficiency (%):	88.9322
Power Factor:	0.911859
Rated Slip:	0.0295963
Rated Shaft Speed (rpm):	1455.61
NO-LOAD OPERATION	
No-Load Stator Resistance (ohm):	0.484019
No-Load Stator Leakage Reactance (ohm):	0.696252
No-Load Rotor Resistance (ohm):	0.264705
No-Load Rotor Leakage Reactance (ohm):	0.861657
No-Load Stator Phase Current (A):	6.985
No-Load Iron-Core Loss (W):	0.00708219
No-Load Input Power (W):	455.463
No-Load Power Factor:	0.0849315
No-Load Slip:	0.000614181
No-Load Shaft Speed (rpm):	1499.08
BREAK-DOWN OPERATION	
Break-Down Slip:	0.21
Break-Down Torque (N.m):	228.628
Break-Down Torque Ratio:	2.70502
Break-Down Phase Current (A):	98.9827

Příloha 3 RMxpřt - Solution data: Operation

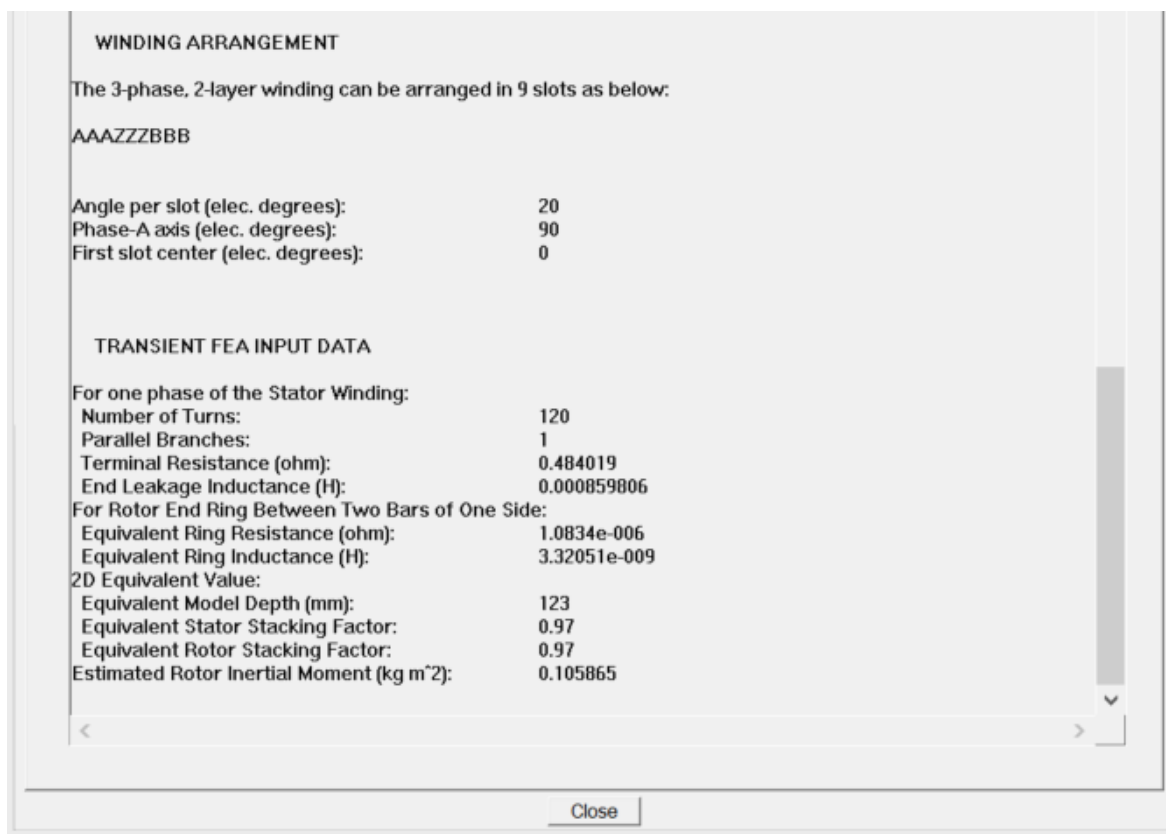
Solutions: outer\_rotor - ASM-porovnaní

Simulation: Setup1 Performance

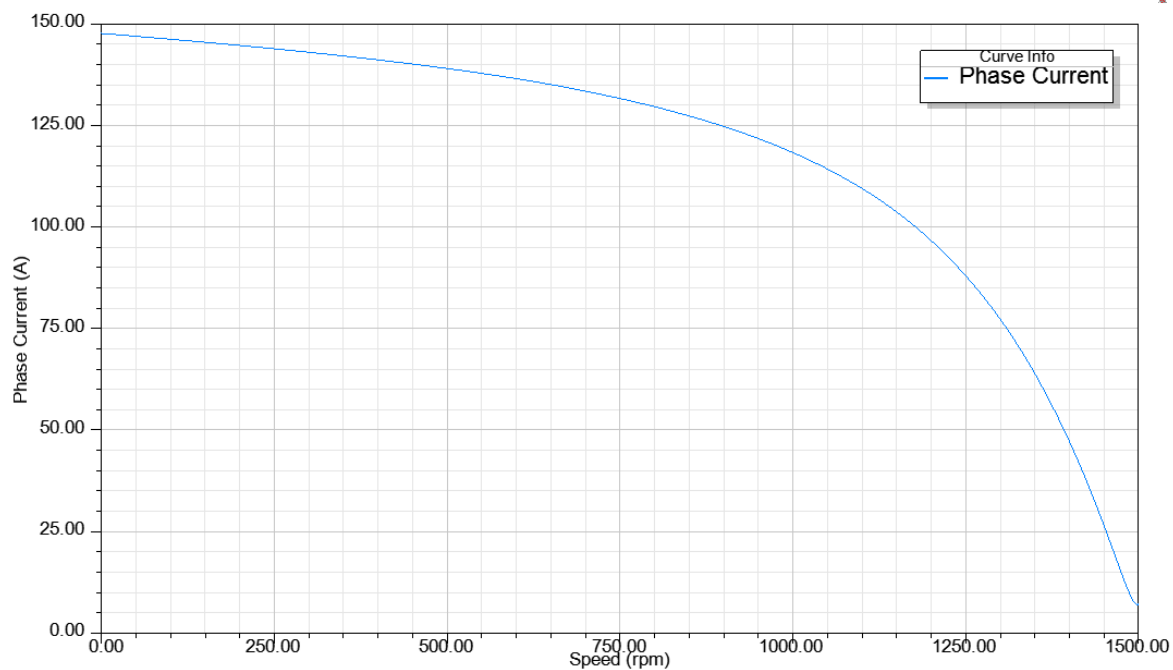
Design Variation: ...

Performance Design Sheet Curves

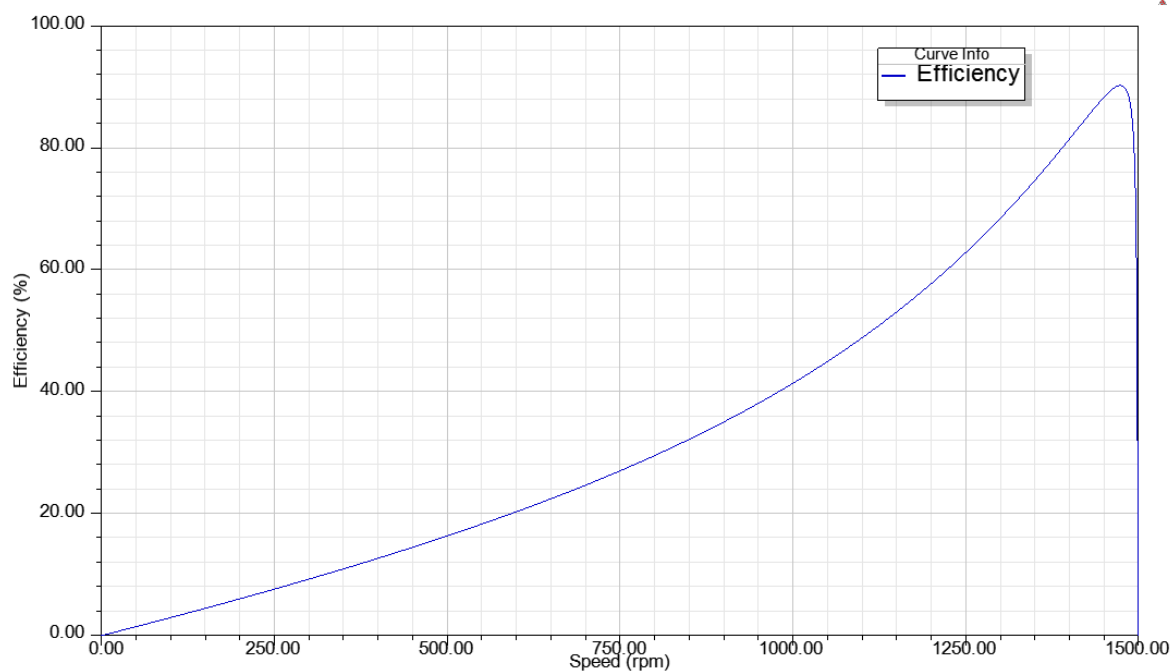
LOCKED-ROTOR OPERATION	
Locked-Rotor Torque (N.m):	155.121
Locked-Rotor Phase Current (A):	147.619
Locked-Rotor Torque Ratio:	1.83532
Locked-Rotor Current Ratio:	6.14319
Locked-Rotor Stator Resistance (ohm):	0.484019
Locked-Rotor Stator Leakage Reactance (ohm):	0.576008
Locked-Rotor Rotor Resistance (ohm):	0.390239
Locked-Rotor Rotor Leakage Reactance (ohm):	0.64594
DETAILED DATA AT RATED OPERATION	
Stator Slot Leakage Reactance (ohm):	0.23464
Stator End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.270116
Stator Differential Leakage Reactance (ohm):	0.189191
Rotor Slot Leakage Reactance (ohm):	0.538125
Rotor End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.0859601
Rotor Differential Leakage Reactance (ohm):	0.233893
Skewing Leakage Reactance (ohm):	0
Stator Winding Factor:	0.901912
Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.57729
Rotor-Teeth Flux Density (Tesla):	1.36508
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	1.29877
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	1.1628
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.702282
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	68.6163
Rotor-Teeth Ampere Turns (A.T):	28.3447
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	42.4151
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	9.39065
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	311.708
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.55795
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.487152
Saturation Factor for Teeth:	1.31106
Saturation Factor for Teeth & Yoke:	1.47726
Induced-Voltage Factor:	0.921685
Stator Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	4.85065
Specific Electric Loading (A/mm):	29.9304
Stator Thermal Load (A <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ):	145.182
Rotor Bar Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	3.01933
Rotor Ring Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	2.52385
Half-Turn Length of Stator Winding (mm):	407.786



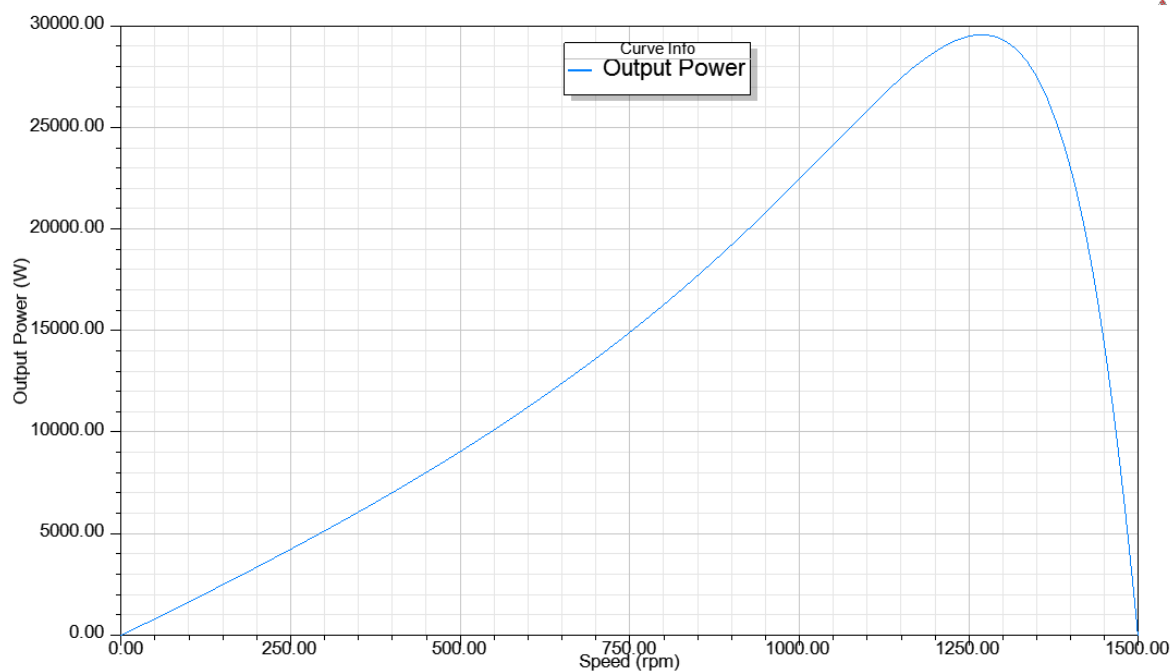
Příloha 5 RMxprt – Solution data: Hodnoty pro transientní úlohy



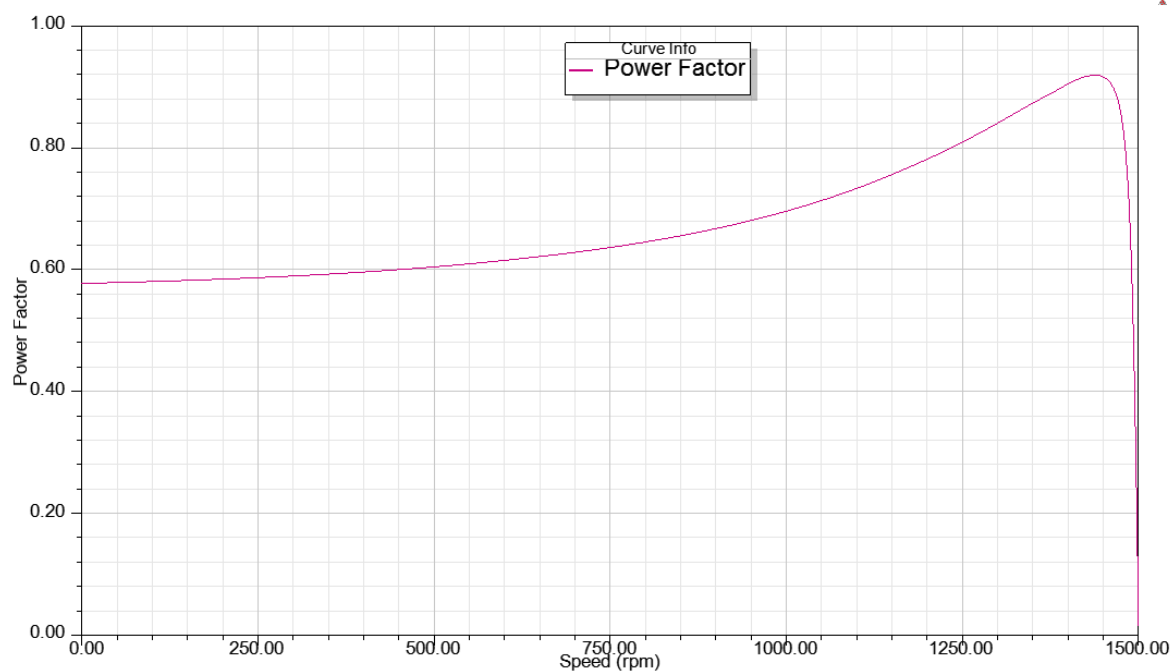
Příloha 6 RMxprt – Solution data: Průběh proudu v závislosti na otáčkách



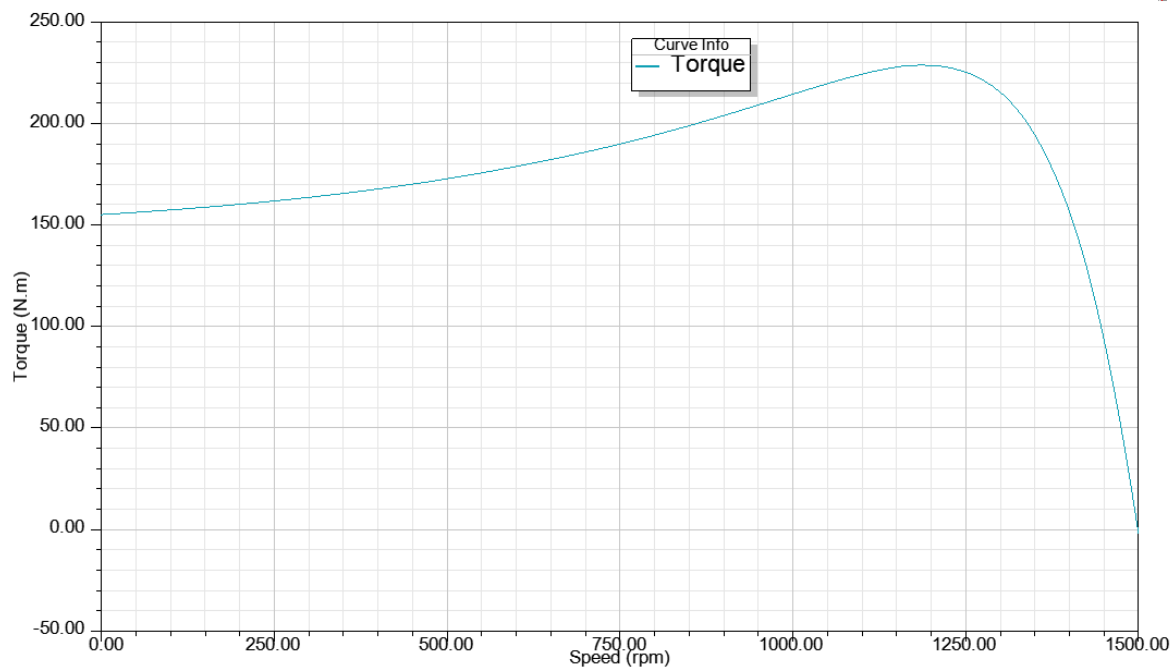
Příloha 7 RMxprt – Solution data: Účinnost v závislosti na otáčkách



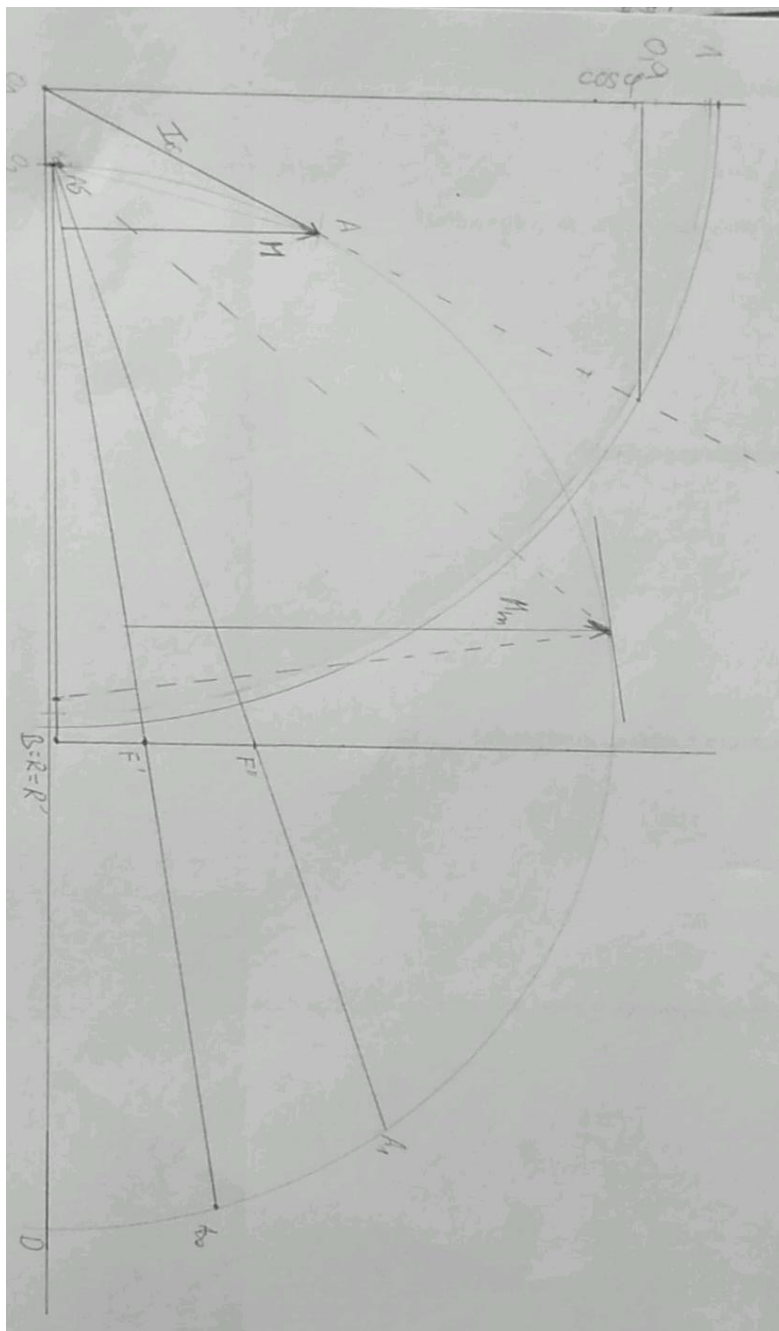
Příloha 8 RMxprt – Solution data: Výkon na hřídeli v závislosti na otáčkách



Příloha 9 RMxprt – Solution data: Účinník v závislosti na otáčkách

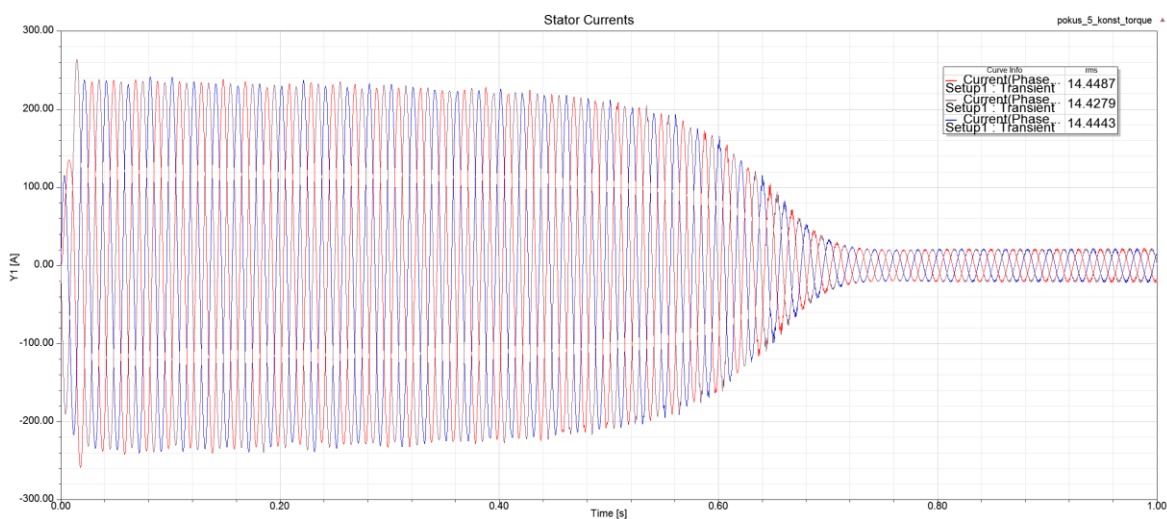


**Příloha 10 RMxprt – Solution data: Moment v závislosti na otáčkách**

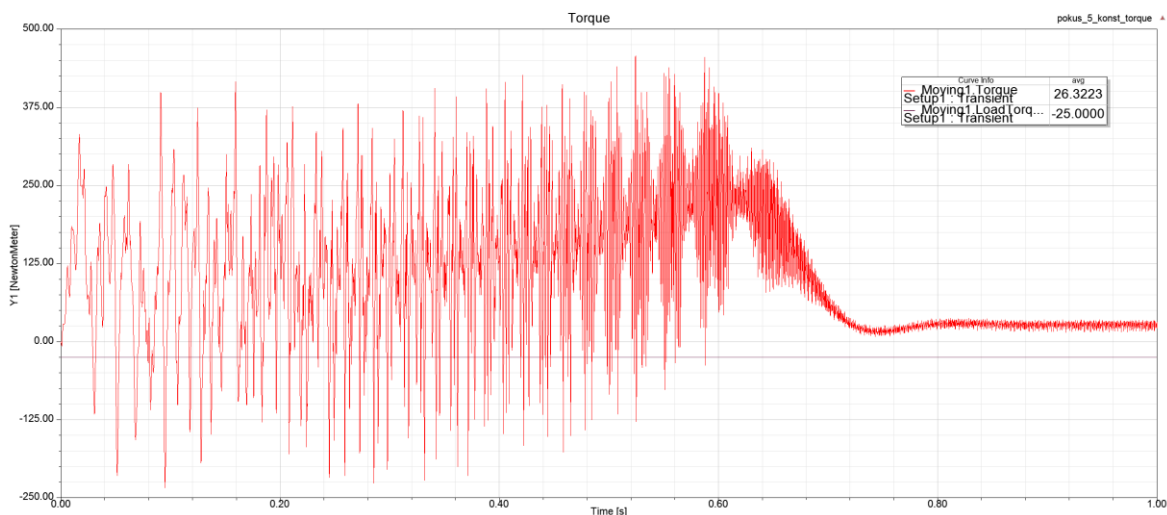


Příloha 11 Kruhový diagram ASM s vnějším rotorem, dle lit [3]

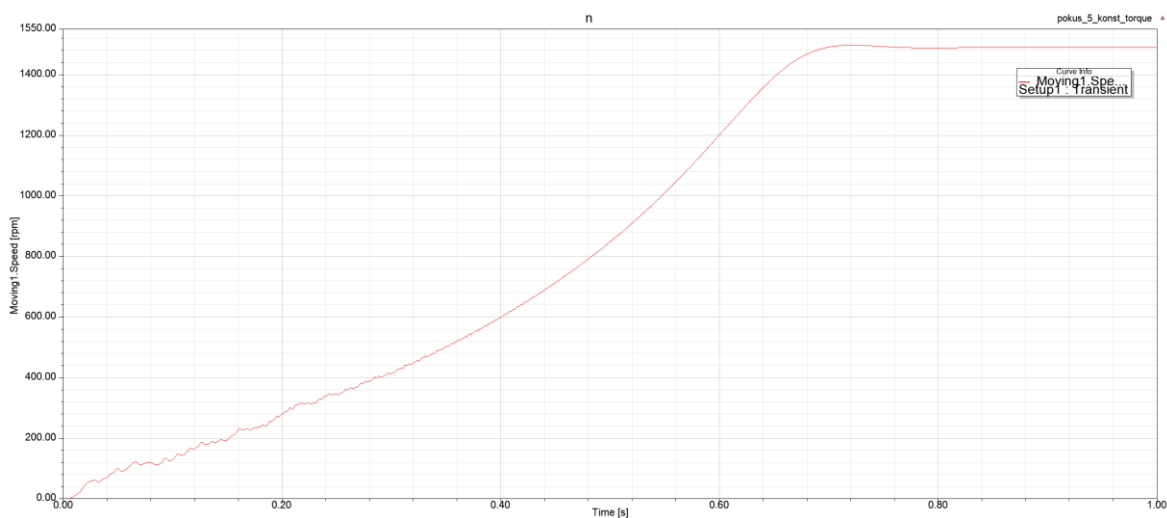




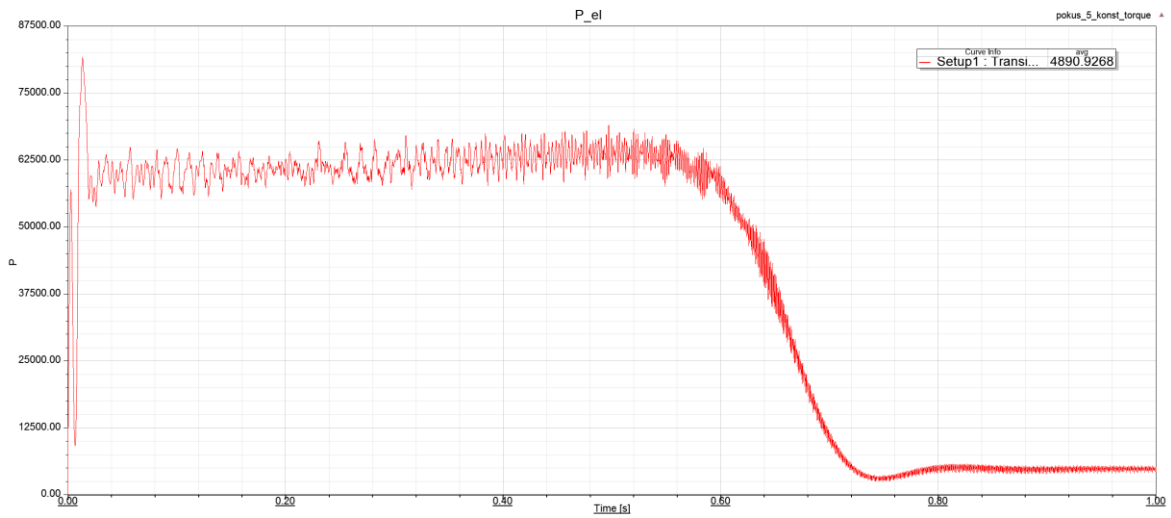
Příloha 12 Rozběh, konstantní zátěžný moment 25 Nm – statorové proudy



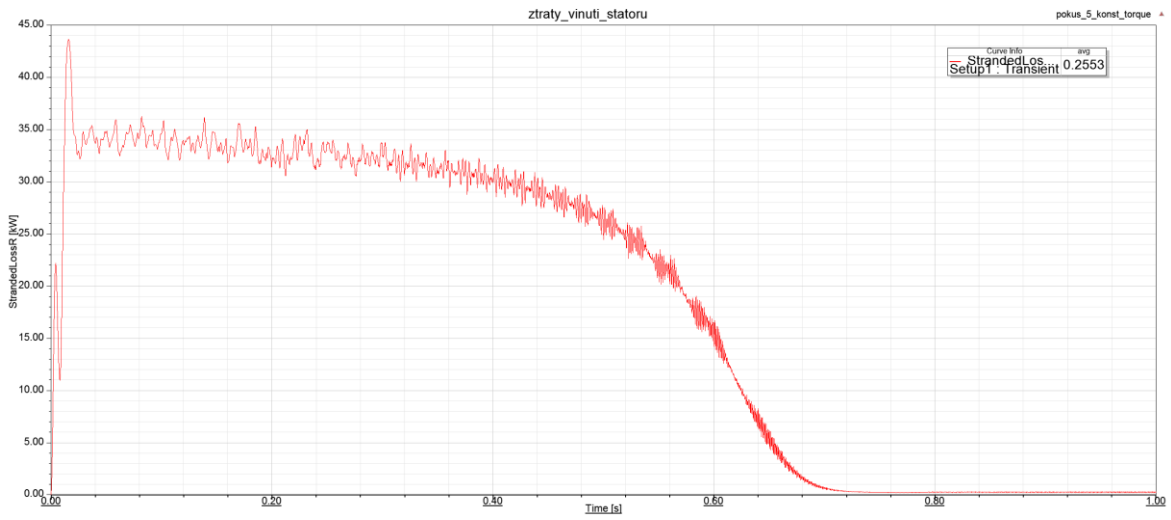
Příloha 13 Rozběh, konstantní zátěžný moment 25 Nm – průběh momentu



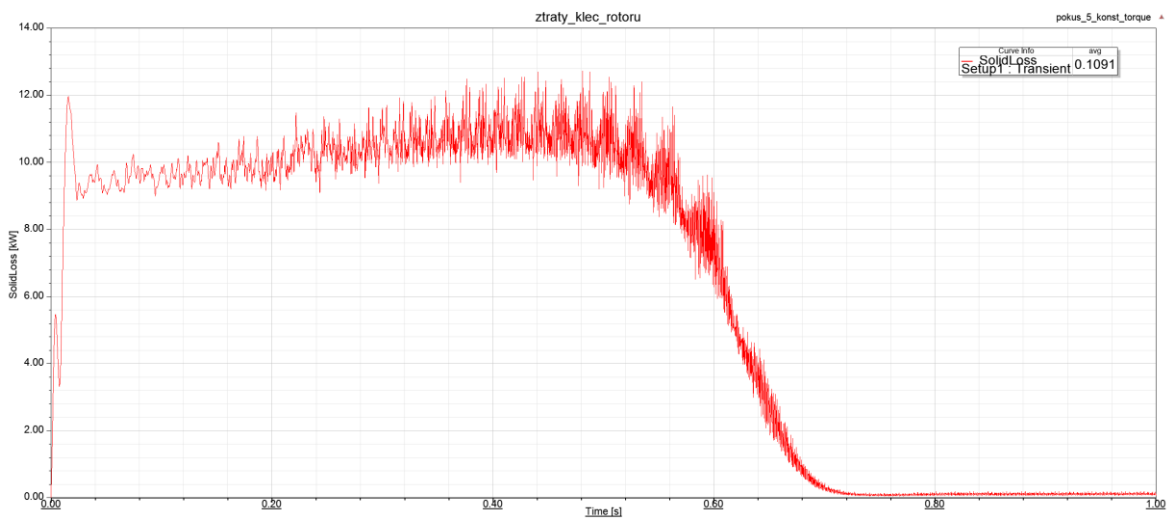
Příloha 14 Rozběh, konstantní zátěžný moment 25 Nm – průběh otáček




**Příloha 15 Rozběh, konstantní zátěžný moment 25 Nm – příkon stroje**



**Příloha 16 Rozběh, konstantní zátěžný moment 25 Nm – ztráty ve statorovém vinutí**



**Příloha 17 Rozběh, konstantní zátěžný moment 25 Nm – ztráty v kleci rotoru**

 View / Edit Material

Material Name:  Material Coordinate System Type:

Properties of the Material

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
- X Component	Unit Vector	1	
- Y Component	Unit Vector	0	
- Z Component	Unit Vector	0	
Thermal Conductivity	Simple	0	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		Electrical Steel	w/m^3
- Kh	Simple	196.8	
- Kc	Simple	0.417	
- Ke	Simple	0	
- Kdc	Simple	0	
Mass Density	Simple	7650	kg/m^3
Composition		Lamination	
- Stacking Factor	Simple	0.95	
- Stacking Direction		V[3]	
Specific Heat	Simple	0	J/kg-C
Young's Modulus	Simple	0	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0	
Thermal Expansion Coefficient	Simple	0	1/C

Příloha 18 Parametry materiálu M27\_29G – materiálová knihovna RMxpřt