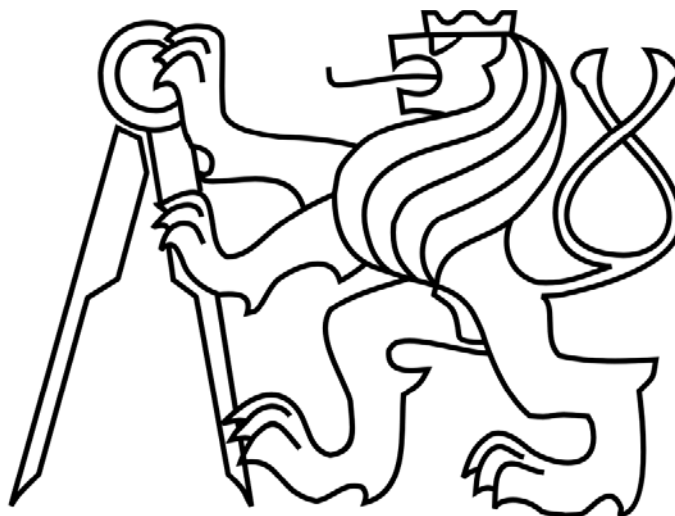


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů  
a trakce

Diplomová práce  
ADIP25

**Analýza charakteristik asynchronního motoru 13 kW  
pomocí moderních simulačních nástrojů**



Vypracovala: Bc. Pohanková Veronika

Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.

2015

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Veronika Pohanková**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Analýza charakteristik asynchronního motoru 13 kW pomocí moderních simulačních nástrojů**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte elektromagnetický návrh stroje analytickou metodou
- 2) Návrhněte stroj prostřednictvím expertního modulu RMXprt Maxwell 3D
- 3) Sestavte 3D a 2D model pro analýzu metodou konečných prvků (MKP ANSYS EM)
- 4) Proveďte simulace chování stroje v ustálených a přechodných stavech
- 5) Získané výsledky analyzujte

Seznam odborné literatury:

- [1] Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V., Design of Rotating Electrical Machines, Wiley 2014
- [2] Kotal M., Novotný P., Voženílek P.: Příklady výpočtu elektrických strojů točivých, CVUT 1980
- [3] Maxwell\_v16\_3D, ANSYS Academic Teaching EM, pdf manuals 2013

Vedoucí: Ing. Karel Buhr, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci Analýza charakteristik asynchronního motoru 13 kW pomocí moderních simulačních nástrojů vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Pohanková

Podpis studenta

V Praze dne 11.5.2015

# Abstrakt

## **Analýza charakteristik asynchronního motoru 13 kW pomocí moderních simulačních nástrojů**

Tato práce popisuje elektromagnetický návrh asynchronního stroje analytickou metodou a s využitím moderního simulačního softwaru ANSYS Maxwell 3D. Cílem práce je vytvoření 2 elektromagnetických modelů - analytickou metodou a prostřednictvím expertního modulu RMXprt, vytvoření 2D a 3D modelu stroje pro simulaci, její provedení a analýza výsledků uvedených metod.

## Klíčová slova

Analytická metoda, Maxwell 3D, RMXprt, Asynchronní stroj, Kotva nakrátko, 2D model, 3D model, Simulace

## Summary

### **Analysis of 13 kW Induction Motor Characteristics Using Modern Simulation Tools**

This thesis describes an electromagnetic design of an induction machine by an analytical method and by a modern simulation software ANSYS Maxwell 3D. Main goal of this thesis is creation of two electromagnetic models – by the analytical method and by the expert modul RMXprt, a creation of 2D and 3D model of the machine for simulation, its completion and the analysis of results of mentioned

## Keywords

Analytic Metod, Maxwell 3D, RMXprt, Induction Machine, Squirrel Cage, 2D model, 3D model, Simulation

# Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za odborné vedení, pomoc a vstřícnost při zpracovávání této práce.

Dále děkuji za podporu rodičům a přátelům.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE ANALYTICKOU METODOU</b> .....	<b>15</b>
1.1 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE .....	18
1.1.1 Štítkové hodnoty stroje.....	18
1.1.2 Návrh statoru.....	20
1.1.3 Návrh rotoru.....	26
1.1.4 Magnetizační proud .....	28
1.1.5 Parametry motoru pro pracovní režim.....	32
1.1.6 Ztráty.....	37
<b>2 NÁVRH ASYNCHRONNÍHO STROJE POMOCÍ PROGRAMOVÉHO PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL 3D</b> .....	<b>40</b>
2.1 TVORBA MODELU V EXPERTNÍM MODULU RMXprt .....	40
2.1.1 Elektromagnetický návrh stroje.....	41
2.1.2 Možnosti ladění návrhu a výsledky.....	51
2.1.3 Výsledky analýzy asynchronního stroje 13 kW v RMXprt.....	51
<b>3 STAVBA 3D A 2D MODELU PRO SIMULACI METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ</b> .....	<b>62</b>
3.1 MOŽNOSTI TVORBY 3D A 2D MODELU.....	62
3.2 2D A 3D MODEL VYTVOŘENÝ PROSTŘEDNICTVÍM RMXprt .....	65
<b>4 SIMULACE CHOVÁNÍ STROJE V USTÁLENÝCH A PŘECHODNÝCH STAVECH</b> .....	<b>69</b>
4.1 TYPY SIMULACÍ .....	69
4.1.1 Magnetické pole .....	69
4.1.2 Elektrické pole.....	71
4.2 PARAMETRY PRO NASTAVENÍ SIMULACE .....	71
4.3 SIMULACE STROJE .....	73
4.3.1 Indukované napětí a rozptylový magnetický tok .....	74
4.3.2 Odebíraný proud.....	74
4.3.3 Moment stroje.....	76
4.3.4 Mapa magnetického pole.....	78

<b>5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>81</b>
5.1 ANALYTICKÁ METODA A RMXprt .....	81
5.2 SIMULACE 2D RESP. 3D MODELU A RMXprt .....	84
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>86</b>
<b>SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>88</b>
<b>PŘÍLOHA A</b> .....	<b>90</b>
<b>PŘÍLOHA B</b> .....	<b>97</b>
<b>PŘÍLOHA C</b> .....	<b>105</b>
<b>PŘÍLOHA D</b> .....	<b>110</b>
<b>PŘÍLOHA E</b> .....	<b>116</b>

# Seznam použitých symbolů a zkratek

$A$	lineární proudová hustota (A/m)
$a_{\sim}$	počet paralelních větví (-)
$a_p$	počet paralelních drátů (-)
$B$	šířka vinutí (m)
$B_j$	magnetická indukce ve jhu (T)
$b_{kn}$	šířka kruhu (m)
$B_o$	amplituda kolísání indukce ve vzduchové mezeře (T)
$B_p$	amplituda pulzace indukce (T)
$b_z$	šířka zubu (m)
$B_z$	magnetická indukce zubu (T)
$B_{\delta}$	magnetická indukce vzduchové mezery (T)
$\cos\varphi$	účinník (-)
$D$	vnitřní průměr statoru (m)
$d$	vnější průměr rotoru (m)
$D_e$	vnější průměr statoru (m)
$d_i$	vnitřní průměr rotoru, průměr hřídele (m)
$D_j$	průměr jha (m)
$D_{kn}$	průměr kruhu (m)
$E_m$	elektromagnetické pole
$f$	frekvence (Hz)
$G$	hmotnost (jha, zubů) (kg)
$h_d$	výška zubu (m)
$h_j$	výška jha (m)
$H_j$	měrné magnetické napětí jha (A/m)
$h_{kn}$	výška kruhu (m)
$H_z$	měrné magnetické napětí zubu (A/m)
$I_0$	proud naprázdno (A)
$I_{1f}$	fázový proud (A)
$I_{kn}$	proud kruhem nakrátko (A)
$I_t$	proud tyčí (A)
$I_{\mu}$	magnetizační proud (A)
$J_{kn}$	proudová hustota kruhu nakrátko (A/mm <sup>2</sup> )
$J_s$	proudová hustota statoru (A/mm <sup>2</sup> )
$J_t$	proudová hustota tyče (A/mm <sup>2</sup> )
$k_B$	koeficient tvaru pole
$k_{Bl}$	koeficient vyložení čel vinutí Carterův koeficient, koeficient ztrát vířivými proudy (značení v Maxwell3D, (W/kg))
$k_c$	koeficient délky čela vinutí
$k_{cl}$	koeficient plnění drážky
$k_{dr}$	koeficient plnění drážky
$k_e$	koeficient přídavných ztrát (W/kg)



$k_E$	koeficient poklesu vnitřního napětí
$k_{Fe}$	koeficient plnění železa
$k_h$	koeficient hysterezních ztrát (W/kg)
$k_{jz}$	koeficient pro výpočet ztrát ve jhu statoru
$k_s$	koeficient respektující otevření drážky
$k_T$	koeficient pro výpočet ventilačních ztráty
$k_{v1}$	koeficient vinutí
$k_z$	koeficient nasycení
$k_{zz}$	koeficient pro výpočet ztrát v zubech statoru
$k_\beta$	koeficient závislý na zkrácení kroku
$k_\beta'$	koeficient závislý na zkrácení kroku
$l'$	ideální délka stroje
$l_{Bl}$	vyložení čela vinutí (m)
$l_{\bar{c}l}$	délka čela vinutí (m)
$l_{Fe}$	skutečná délka statoru (m)
$l_{Fer}$	délka rotoru (m)
$l_i$	ideální délka statoru (m)
$L_j$	délka střední siločáry (m)
$m$	počet fází
$N_1$	počet závitů jedné fáze vinutí
$n_s$	synchronní otáčky (ot/min)
$P$	jmenovitý výkon (kW)
$p$	počet pólových dvojic
$p_{1,0}$	měrné ztráty (W/kg)
$P_i$	vnitřní výkon (W)
$p_z$	koeficient přepočtu na stator
$p_{\delta p}$	povrchové ztráty na jednotku plochy (W/m <sup>2</sup> )
$Q_p$	pólová rozteč v počtu drážek
$Q_r$	počet drážek rotoru
$Q_s$	počet drážek statoru
$q_s$	počet drážek na pól
$r_1$	odpor statoru v poměrných jednotkách
$R_1$	ohmický odpor statoru ( $\Omega$ )
$R_2$	ohmický odpor rotoru ( $\Omega$ )
$R_2'$	ohmický odpor rotoru přepočtený na stator ( $\Omega$ )
$r_2'$	odpor rotoru přepočteného na stator v poměrných jednotkách
$R_t$	odpor tyče ( $\Omega$ )
$s_1$	požadovaný průřez vodiče (mm <sup>2</sup> )
$s_1'$	volná plocha drážky (mm <sup>2</sup> )
$s_{kn}$	průřez kruhu nakrátko (mm <sup>2</sup> )
$s_t$	průřez tyče (mm <sup>2</sup> )
$U_{1f}$	fázové napětí (V)
$U_m$	celkové magnetické napětí (A)

$U_{mj}$	magnetické napětí jha (A)
$U_{mz}$	magnetické napětí zubu (A)
$U_{m\delta}$	magnetické napětí vzduchové mezery (A)
$v_d$	celkový počet efektivních vodičů v drážce jedné fáze
$v_{d1}$	počet efektivních vodičů v drážce jedné fáze
$X_1$	rozptylová reaktance statoru ( $\Omega$ )
$x_1$	rozptylová reaktance statoru v poměrných jednotkách
$X_{12}$	hlavní (vzájemná reaktance) ( $\Omega$ )
$X_2$	rozptylová reaktance rotoru ( $\Omega$ )
$x_2'$	rozptylová reaktance rotoru po přepočtu na stator v poměrných jednotkách
$X_2'$	rozptylová reaktance po přepočtu na stator ( $\Omega$ )
$y_d$	zkrácený krok (počet drážek)
$\alpha_\delta$	koeficient poměru střední a maximální hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře
$\beta_o$	koeficient pro výpočet amplitudy kolísání
$\gamma$	koeficient pro výpočet amplitudy pulzace
$\delta$	velikost vzduchové mezery (mm)
$\Delta P_{Fej}$	ztráty ve jhu statoru (kW)
$\Delta P_{Fel}$	celkové ztráty v železe statoru (kW)
$\Delta P_{jo}$	ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno (kW)
$\Delta P_m$	ztráty mechanické a ventilační (kW)
$\Delta P_z$	tepavé ztráty v zubech (kW)
$\Delta P_{\delta p}$	povrchové ztráty v zubech (kW)
$\eta$	účinnost (%)
$\kappa$	pomocná konstanta
$\lambda_\epsilon$	činitel náhradní vodivosti čel vinutí
$\lambda_d$	činitel jednotkové magnetické vodivosti drážky
$\lambda_{dif}$	Činitel náhradní vodivosti diferenčního rozptylu
$\zeta$	činitel nerovnoměrného rozložení magnetické indukce ve jhu
$\rho$	rezistivita ( $\Omega\text{m}$ )
$\rho_{dif}$	koeficientem tlumení
$\sigma_{dif}$	činitel diferenčního rozptylu
$\sigma_z$	činitel zešikmení
$\tau_c$	rozteč cívky v polovině hloubky drážky (m)
$\tau_d$	drážková rozteč (m)
$\tau_p$	pólová rozteč (m)
$\Phi$	magnetický tok (Wb)
$\chi$	délkový poměr
$\omega$	úhlová rychlost ( $\text{rad}^{-1}$ )

<i>AM</i>	analytická metoda
<i>AS</i>	asynchronní stroj
<i>EMN</i>	elektromagnetický návrh
<i>EMP</i>	elektromagnetické pole
<i>M1</i>	metodika dle literatury [1]
<i>M2</i>	metodika dle literatury [2]

# Seznam obrázků

Obr. 1: Vývojový diagram postupu EMN stroje dle M2 .....	17
Obr. 2: Závislost účinnosti elektrických strojů na jejich výkonu pro různé třídy účinnosti dle normy EN (IEC) 60034-30. [3].....	19
Obr. 3: Závislost vrtání na vnitřním výkonu a počtu pólů. [1] .....	20
Obr. 4: Rozložení magnetické indukce podél pólové rozteče, kde $B_{\delta}$ je vrcholová hodnota magnetické indukce a $\alpha\delta B_{\delta}$ je její průměrná hodnota. [2] .....	22
Obr. 5: Tvar a rozměry statorové drážky (rozměry v mm).....	25
Obr. 6: Tvar a rozměry rotorové drážky (rozměry v mm).....	27
Obr. 7: Rozměry kruhu v průřezu (rozměry v mm).....	28
Obr. 8: Rozměry statorové drážky tvaru L pro výpočet činitele jednotkové magnetické vodivosti drážky .....	35
Obr. 9: Projektový manažer pro návrh stroje pomocí expertního modulu RMXprt v programovém prostředí ANSYS Maxwell 3D. [7] .....	41
Obr. 10: Základní rozměry zvoleného typu statorové drážky, [7] .....	43
Obr. 11: Typy vinutí dostupné v RMXprt. [8] .....	44
Obr. 12: Geometrie čel vinutí. [7],[9] .....	45
Obr. 13: Základní rozměry zvoleného typu statorové drážky. [7] .....	47
Obr. 14: Magnetický obvod - návrh statorového a rotorového řezu. [7] .....	49
Obr. 15: Náhradní schéma AS.....	52
Obr. 16: Závislost parametrů náhradního schématu na skluzu. [7].....	53
Obr. 17: Momentová charakteristika AS 13 kW – $M = f(n)$ . [7] .....	55
Obr. 18: Proudová charakteristika AS 13 kW – $I = f(n)$ . [7].....	56
Obr. 19: Závislost účinnosti na výstupním výkonu – $\eta = f(P)$ . [7] .....	57
Obr. 20: Závislost účinnosti na otáčkách – $\eta = f(n)$ . [7].....	58
Obr. 21: Závislost účiníku na otáčkách – $\cos\varphi = f(n)$ . [7].....	58
Obr. 22: Proud při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7] .....	59
Obr. 23: Moment při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7] .....	60
Obr. 24: Frekvence při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7] .....	60
Obr. 25: Výstupní výkon při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7].....	61
Obr. 26: 3D model 13 kW AS navržený pomocí User Defined Primitives. [9].....	63

Obr. 27: 2D model vytvořený pomocí User Defined Primitives v programovém prostředí ANSYS Maxwell 3D – příčný řez. [9].....	64
Obr. 28: Poloviční 3D model vyexportovaný z expertního modulu RMxprt. [9]..	65
Obr. 29: Poloviční 2D model vyexportovaný z expertního modulu RMxprt. [9]..	66
Obr. 30: Magnetický obvod statoru AS v polovičním řezu. [9].....	66
Obr. 31: Detailní pohled na čela vinutí statoru. [9].....	67
Obr. 32: Magnetický obvod rotoru AS v polovičním řezu. [9].....	67
Obr. 33: Natočení drážek na rotoru AS. [9].....	68
Obr. 34: Projektový manažer 3D designu. [9].....	72
Obr. 35: Časový průběh proudu. [9].....	75
Obr. 36: Časový průběh proudu ve 3D modelu. [9].....	76
Obr. 37: Časový průběh momentu. [9].....	77
Obr. 38: Časový průběh momentu pro 3D model. [9].....	78
Obr. 39: Rozložení magnetické indukce v čase 200 ms. [9].....	79
Obr. 40: Rozložení magnetické indukce na povrchu stroje. [9].....	80
Obr. A1: Závislost účinnosti na jmenovitém výkonu stroje a počtu pólových dvojic. [1].....	90
Obr. A2: Závislost velikosti účinníku na jmenovitém výkonu stroje a počtu pólových dvojic. [1].....	90
Obr. A3: Závislost koeficientu $k_E$ na výkonu stroje. [1].....	90
Obr. A4: Závislost lineární proudové hustoty resp. magnetické indukce ve vzduchové mezeře na pólové rozteči. [1].....	91
Obr. A5: Závislost koeficientu $\alpha_\delta$ na saturačním koeficientu $k_z$ : a) pro výpočet dle M1. [1], b) pro výpočet dle M2. [2].....	91
Obr. A6: Koeficient tvaru pole $k_B$ v závislosti na saturačním koeficientu. [1].....	92
Obr. A7: Poměr ideální délky statoru a pólové rozteče $\lambda$ v závislosti na výkonu stroje. [1].....	92
Obr. A8: Koeficient $k_I$ v závislosti na účinníku. [1].....	92
Obr. A9: Nomogram pro výpočet Carterova činitele. [1].....	93
Obr. A10: Magnetizační křivky plechů $\square 11$ , $\square 12$ a $\square 21$ ( $p_{1,0} = 3,3 \text{ W/kg}$ ). [1]...	94
Obr. A11: Závislost koeficientu $\xi$ na magnetické indukci. [1].....	95
Obr. A12: Závislost koeficientů $k_\beta$ a $k_{\beta'}$ na zkrácení kroku. [1].....	95

Obr. A13: Koeficient náhradní magnetické vodivosti diferenčního rozptylu v závislosti na počtu drážek na pól. [1].....	96
Obr. C1: Šablona Machine. [7].....	105
Obr. C2: Šablona Stator. [7] .....	105
Obr. C3: Šablona Slot. [7] .....	106
Obr. C4: Šablona Winding. [7].....	106
Obr. C5: Šablona Winding – End/Insulation. [7] .....	107
Obr. C6: Šablona Rotor. [7].....	107
Obr. C7: Šablona Slot (rotor). [7].....	108
Obr. C8: Šablona Winding (rotor) . [7].....	108
Obr. C9: Šablona Shaft. [7] .....	108
Obr. C10: Šablona Analysis Setup - General. [7] .....	109
Obr. C11: Šablona Analysis Setup – IndM3. [7] .....	109
Obr. E1: Časový průběh indukovaného napětí a spřaženého magnetického toku ve fázi A. [9] .....	116
Obr. E2: Časový průběh napětí a proudu ve fázi A. [9].....	117
Obr. E3: Časový průběh napětí a proudu ve fázi B. [9].....	118
Obr. E4: Časový průběh napětí a proudu ve fázi C. [9].....	119
Obr. E5: Siločáry magnetického pole v čase 200 ms. [9] .....	120

# Úvod

Hlavním cílem této práce je vytvoření elektromagnetického návrhu stroje. Ten bude proveden několika metodami. Dále budou porovnány výsledky metod, aby bylo možné říci, zda moderní softwarové prostředky podávají stejně kvalitní výsledky jako dříve běžně využívaná analytická metoda návrhu.

Nejprve bude proveden elektromagnetický návrh stroje zvolenou hlavní analytickou metodou. Část návrhu bude provedena pro srovnání i jinou metodou. Jelikož jsou v současné době na trhu dostupné simulační softwary, které by měly návrh stroje usnadňovat, bude vytvořen další elektromagnetický model stroje v modulu RMXprt. Následně bude třeba zhotovit 2D a 3D model stroje pro jeho simulace metodou konečných prvků. Ta by měla podat informace o chování stroje a rozložení elektromagnetického pole v modelu při ustáleném stavu a přechodném ději při spínání stroje.

Pro možnost porovnání metod byl vybrán již navržený 13kW asynchronní stroj. Samotný návrh bude ověřen novým analytickým výpočtem a původní model poskytne podklady pro zadání jeho parametrů do modulu RMXprt. Analytická metoda bude též aplikována na stejný stroj o typovém výkonu 15 kW, neboť současné výkonové řady neuvažují stroj o původním výkonu.

# 1 Elektromagnetický návrh stroje analytickou metodou

Asynchronní stroje (dále jen AS) jsou prakticky nejvyužívanější elektrické stroje v průmyslu. Důvodem je jejich jednoduchá konstrukce, tím i spolehlivost, nízká cena a fakt, že jsou prakticky bezúdržbové. Další jejich výhodou je, že v domácnostech, kde jsou obvykle jednofázové rozvody, lze využít jednofázové AS pro pohony spotřebičů (pračky, ruční nářadí apod.).

V současnosti je na trhu množství simulačních softwarů, s jejichž pomocí je poměrně rychlé a snadné vytvořit elektromagnetický návrh (dále jen EMN) stroje. Před jejich příchodem se používaly jen analytické metody (dále jen AM). Dnes se využívá kombinace obou metod.

Neexistuje pouze jediná AM. Různé metody mohou dávat různé výsledky, přestože všechny vycházejí ze stejné teorie návrhu elektrických strojů. Rozdíly mohou být ve využívaných podkladech (tabulky, grafy, závislosti, vzorce atd.). V jiných případech je rozdílné již vlastní pojetí a snaha návrh zjednodušit.

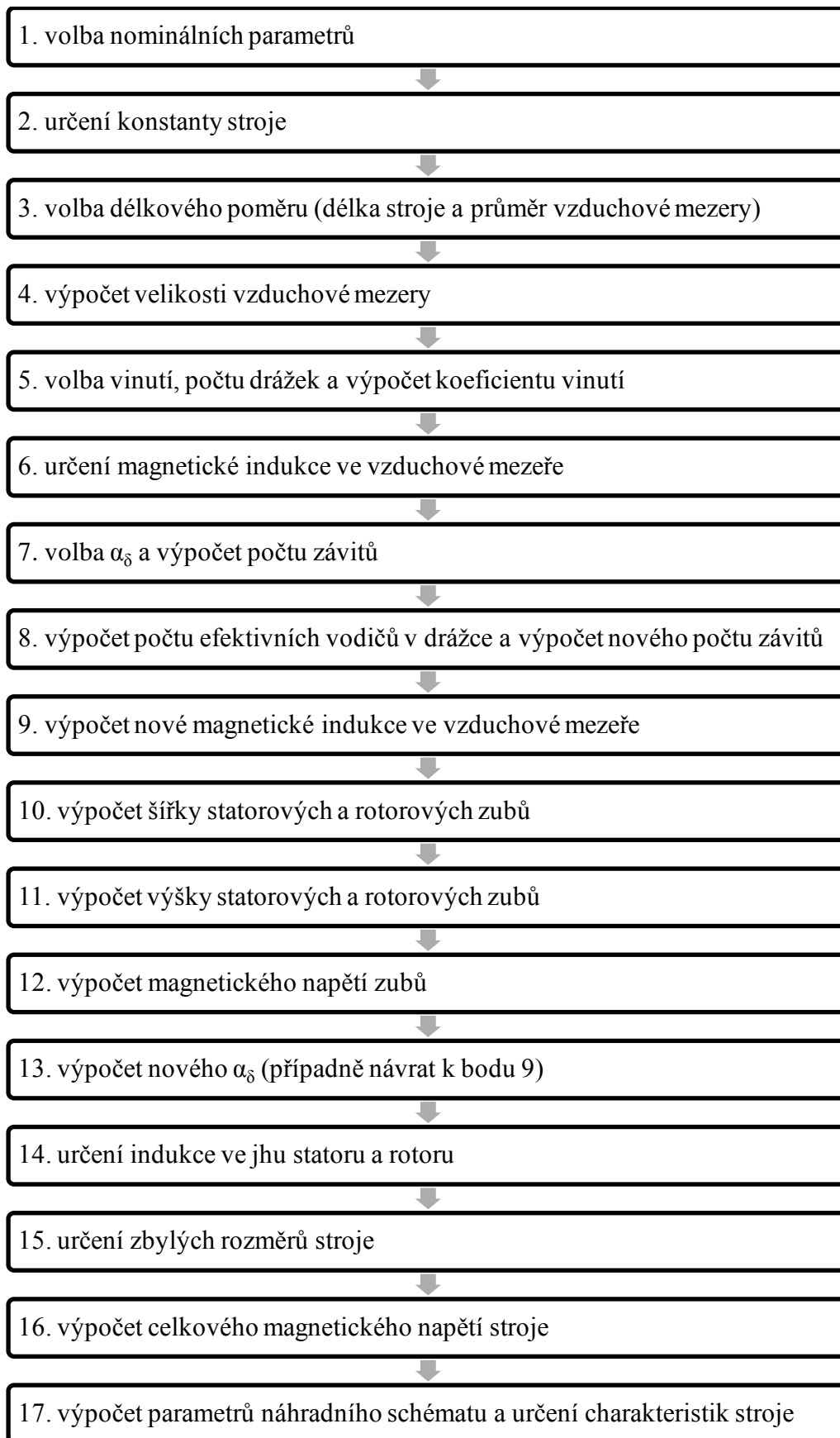
Příkladem rozdílných postupů a výsledků je návrh stejného stroje pomocí skript *Příklady výpočtu elektrických strojů točivých* z roku 1988 a knihy *Design of Rotating Electrical Machine* (Návrh elektrických točivých strojů) vydaná v roce 2010. První z nich využívá metodiky výpočtu závodu Elektrosila v Petrohradu uvedené v knize *Návrh elektrických strojů* (v originále [Projektování elektrických mašin]) od P.S.Sergejeva upravené dle tehdejších platných norem ČSN. Naopak druhá kniha nevychází z konkrétních podnikových norem. Využívá obecných elektromagnetických principů v elektrických točivých strojích, nejběžnějších metod pro analytický výpočet a norem platných v Evropské unii. [1], [2]

Postup metodiky z [1] (dále jen M1) je založen na 5 hlavních krocích. Prvním z nich je volba štítkových hodnot, jako jsou výkon, napětí, jmenovité otáčky apod. Druhou položkou v pořadí je volba hlavních rozměrů stroje a jeho využití, neboť právě to limituje rozměry stroje (vychází se z výkonové rovnice a výkonové konstanty). Poté je možné přistoupit k elektromagnetickému výpočtu (3. bod). Ten se skládá z návrhu magnetického obvodu a jeho využití, vinutí včetně izolací



a elektrického využití a určení vlastností navrhovaného stroje. Poté následuje tepelný výpočet (případně ventilační), aby bylo možné posoudit, zda vyhovuje zvolené tepelné třídě. Posledním bodem je kontrola, která není prováděna samostatně, ale prostupuje prakticky celým výpočtem. Kontrolují se indukce v magnetickém obvodu, proudové hustoty a další. [1]

Metodika dle [2] (dále jen M2) je složena ze 17 základních kroků, které vedou ke kompletnímu EMN stroje a charakteristikám potřebným k posouzení jeho správnosti. Kroky této metodiky jsou ve vývojovém diagramu na Obr. 1. [2]



Obr. 1: Vývojový diagram postupu EMN stroje dle M2. [2]

## 1.1 Elektromagnetický návrh stroje

Hlavní metodou zvolenou k návrhu AS je M1. Pro názornost a možnost porovnání je provedena část výpočtu i podle M2.

V současné době jsou nejbližší navrhovanému motoru varianty o výkonu 15 kW např. od firem Leroy Sommer, Siemens a dalších. Z toho důvodu je EMN oběma metodami proveden i pro stroj o tomto výkonu.

### 1.1.1 Štítkové hodnoty stroje

Základem návrhu každého stroje je volba jeho štítkových hodnot. Uvedený elektromagnetický výpočet je prováděn pro AS navržený v [1] s obměnami dle současných norem. Veškeré vypočtené hodnoty jsou dostupné v Příloze B pro všechny varianty návrhu.

Štítkové hodnoty jsou následující:

Jmenovitý výkon	13 resp. 15 kW
Jmenovité napětí	230/400 V
Frekvence	50 Hz
Synchronní otáčky	1500 ot/min
Zatížení	Trvalé
Třída izolace	F
Stupeň krytí	IP55
Třída účinnosti	IE2

První rozdíl je ve fázovém a sdruženém napětí, neboť od doby vydání použitých skript došlo ke změně norem. Dle normy ČSN EN 60038 je fázové napětí zvýšeno z 220 na 230 V a díky tomu vzrostlo i napětí sdružené z 380 na 400 V. Tato změna ovlivní výsledky uváděné v [1].

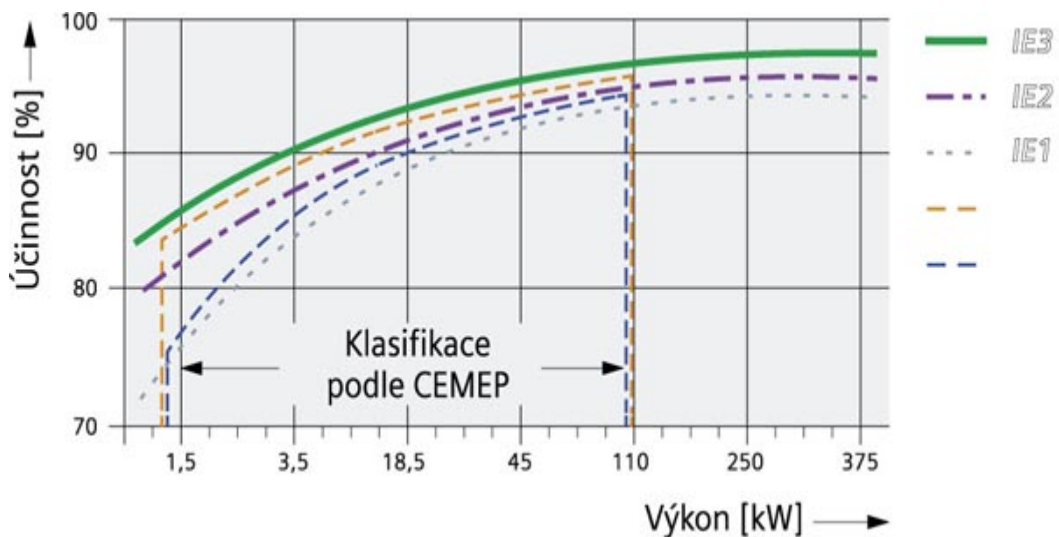
Třída izolace je zvýšena z původní E na F, konečná teplota je tedy vzrostla ze 120 na 155°C. Původní stupeň krytí je změněn z IP23 (ochrana před předměty nad 12 mm a před deštěm padajícím do 60° od vertikály) na IP55 (ochrana proti prachu a proudu vody ze všech stran), který lépe vyhovuje bezpečnostním požadavkům.

V současné době se navíc volí třída účinnosti, aby se snížila spotřeba energie. Směrnice EuP (*Energy using product*)-část 11 (resp. směrnice EU2009/125/ES) se

zabývá využitím energie a účinnosti asynchronních motorů a byla začleněna do legislativy všech členských zemí Evropské unie. V ČR se jedná o normu ČSN EN (IEC) 60034-30 ([3]). Od 1. 1. 2015 je platná nová norma ČSN EN (IEC) 60034-30-1: „Tato norma přesně vymezuje třídy účinnosti jednotáčkových elektrických motorů, které jsou posuzovány podle IEC 60034-1 nebo IEC 60079-0 a jsou dimenzovány pro provoz se zdrojem sinusového napětí. Zavádí soubor mezních hodnot účinnosti stanovený v závislosti na kmitočtu, počtu pólů a výkonu motoru. Nerozlišuje se mezi technologiemi motorů, napájecím napětím nebo motory se zesílenou izolací navrženými konkrétně pro provoz s měničem, i když tyto technologie motorů nemusí být všechny schopny dosáhnout vyšších tříd účinnosti. To činí různé technologie motorů plně srovnatelnými s ohledem na jejich potenciál energetické účinnosti.“ [4]

Nové třídy účinnosti jsou označovány IE (*International efficiency*) a jsou stanoveny následovně (grafická závislost viz Obr. 2) [3]:

- IE1 standardní účinnost (Standard),
- IE2 zvýšená účinnost (High),
- IE3 vysoká účinnost (Premium)
- IE4 velmi vysoká účinnost (Super-Premium)



**Obr. 2:** Závislost účinnosti elektrických strojů na jejich výkonu pro různé třídy účinnosti dle normy EN (IEC) 60034-30. [3]

Pro navrhovaný stroj je zvolena třída IE2 dle výkonu a zvolené účinnosti. Tu je možné odečíst z její závislosti na jmenovitém výkonu a počtu pólových dvojic (viz Obr. A1 Příloha A). Zvolená velikost je 0,88.

Počet pólových dvojic je dán známým vztahem:

$$p = \frac{f \cdot 60}{n_s} = \frac{50 \cdot 60}{1500} = 2 \quad (1.1).$$

Z podobné závislosti lze určit i účinník (viz Obr. A2, Příloha A), jež činí 0,885.

### 1.1.2 Návrh statoru

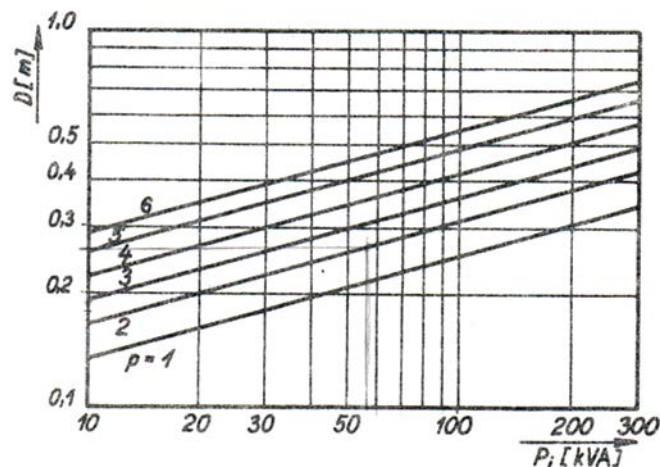
V následujících kapitolách jsou zpracovány oba postupy výpočtu konkrétně pro 13kW stroj. Tabelárně jsou výsledné hodnoty všech variant shrnuty v příloze B.

Jsou-li známy štítkové hodnoty stroje, lze přistoupit k návrhu magnetického obvodu a vinutí statoru. Nejprve je nezbytné vypočítat vnitřní výkon (viz rovnice 1.2), který je důležitý pro odhad vrtání stroje.

$$P_i = \frac{k_E \cdot P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,97 \cdot 13}{0,885 \cdot 0,88} = 16,2 \text{ kVA} \quad (1.2).$$

Koeficient  $k_E$ , který udává pokles vnitřního napětí proti svorkovému o úbytek na statorové reaktanci způsobený magnetizačním proudem, je odčten z grafu dostupného v příloze A (Obr. A3). [1]

Se znalostí vnitřního výkonu a počtu pólových dvojic lze určit vrtání dle Obr. 3. Příslušné vrtání  $D$  je rovno 0,19 m.



Obr. 3: Závislost vrtání na vnitřním výkonu a počtu pólů. [1]

Poměr  $D_e/D$  pro čtyřpólový stroj by měl být v rozmezí  $1,61 \div 1,56$  ([1]). Vynásobí-li se hranice intervalu pro poměr vrtáním  $D$ , vznikne rozmezí  $0,306 \div 0,298$  m pro vnější průměr  $D_e$ . Jelikož v řadě vnějších průměrů není vhodná hodnota spadající do intervalu, je vybrán nejbližší průměr  $0,291$  m (průměry viz [1]). Pokud je zvolen poměr  $D_e/D = 1,58$  ([1]), vnitřní průměr  $D$  bude roven  $0,184$  m.

Dle M2 existuje několik parametrů, které mohou být zvoleny volně, pouze s přihlédnutím k využití stroje. Vnější průměr patří mezi ně. Vnitřní průměr je nutno volit vzhledem k poměru délky stroje a průměru vzduchové mezery (vnitřní průměr statoru). Vnější i vnitřní průměr jsou stejné jako ve výpočtu dle M1. Délka stroje je podřízena délkovému poměru ([2]):

$$\chi \approx \frac{\pi}{2p} \sqrt[3]{p} = \frac{\pi}{4} \sqrt[3]{2} = 0,9895 \quad (1.3).$$

Pólová rozteč pro dané hodnoty je rovna  $0,145$  m. Z grafu závislosti lineární proudové hustoty resp. magnetické indukce ve vzduchové mezeře na pólové rozteči (Obr. A4, Příloha A) je možné velikost těchto parametrů odečíst. Lineární proudová hustota je  $31000$  A/m a indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  je  $0,72$  T. V M2 je velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře je dána dovolenými hodnotami pro daný typ stroje. Z Tab. 1 je zřejmé, že volba  $0,72$  T jako v případě druhé metodiky je možná, tudíž je tato hodnota ponechána.

**Tab. 1: Dovolené velikosti magnetické indukce magnetického obvodu. [2]**

<i>Magnetická indukce B [T]</i>				
	<i>Asynchronní stroj</i>	<i>Synchronní stroj s vyniklými póly</i>	<i>Synchronní stroj s hladkým rotorem</i>	<i>Stejnoseměrný stroj</i>
<i>Vzduchová mezera</i>	0,7-0,9	0,85-1,05	0,8-1,05	0,6-1,1
<i>Jho statoru</i>	1,4-1,7 (2)	1,0-1,5	1,1-1,5	1,1-1,5
<i>Zub</i>	1,4-2,1 (stator) 1,5-2,2 (rotor)	1,6-2,0	1,5-2,0	1,6-2,0 (kompenzační vinutí) 1,8-2,2 (vinutí kotvy)
<i>Jho rotoru</i>	1-1,6 (1,9)	1,0-1,5	1,3-1,6	1,0-1,5
<i>Pólové jádro</i>	-	1,3-1,8	1,1-1,7	1,2-1,7
<i>Komutační póly</i>	-	-	-	1,3

Je-li tímto způsobem navržen magnetický obvod statoru, je na řadě návrh statorového vinutí. Pro navrhovaný stroj je zvoleno dvouvrstvé trojfázové vinutí. Počet drážek a drážková rozteč statoru jsou vypočteny dle následujících vztahů:

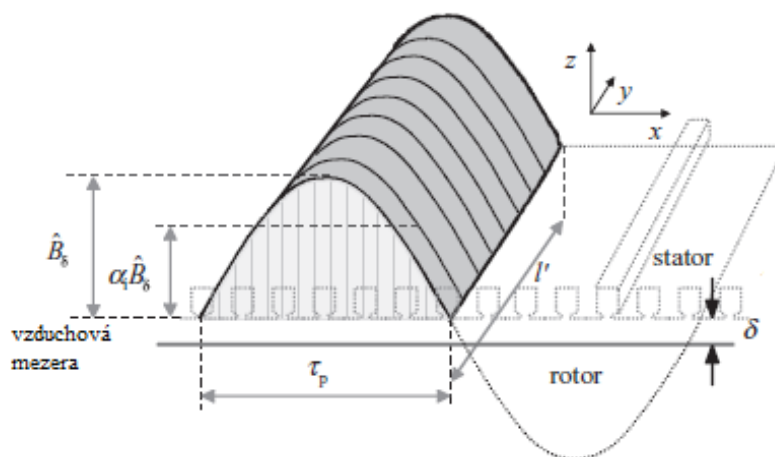
$$Q_s = 2 \cdot p \cdot q_s \cdot m = 4 \cdot 3 \cdot 3 = 36 \quad (1.4)$$

$$\tau_{ds} = \frac{\pi \cdot D}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 0,184}{36} = 0,0161 \text{ m} \quad (1.5)$$

Pro čtyřpólový stroj o výkonu vyšším než 7,5 kW by měl být počet drážek na pól ( $q_s$ ) roven 4. Jeho hodnota je ovšem omezena drážkovou roztečí statoru, která by měla být v rozmezí 15 ÷ 25 mm ([1]). Pro  $q_s = 4$  by byl počet drážek statoru 48 a tím by drážková rozteč činila 12,1 mm. Z toho důvodu je počet drážek na pól snížen na 3 a drážková rozteč je tedy rovna 16,1 mm.

K omezení vyšších harmonických je třeba provést zkrácení kroku. Obvykle se provádí zkrácení ( $y_d/Q_p$ ) 5/6, 7/9, 10/12, 12/15, 17/21 atd. Pólová rozteč v počtu drážek  $Q_p$  je 9, zkrácený krok je tudíž 7/9. Se znalostí všech výše uvedených skutečností, je možné vypočítat koeficienty vinutí statoru. Výsledky výpočtů dle obecně platných vztahů jsou následující činitele: kroku 0,940, rozlohy 0,960 a vinutí 0,902. Veškeré výpočty dle M1 jsou platné i pro M2.

Znalost výše vypočtených či zvolených parametrů, dovoluje vypočíst ideální délku statoru. Ve vzorci figuruje poměr střední a maximální hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Jeho vliv je ilustrován na následujícím obrázku (Obr. 4).



Obr. 4: Rozložení magnetické indukce podél pólové rozteče, kde  $\hat{B}_\delta$  je vrcholová hodnota magnetické indukce a  $\alpha_\delta \hat{B}_\delta$  je její průměrná hodnota. [2]

Přesný výpočet koeficientu je prováděn až v kapitole o výpočtu magnetizačního proudu, proto je nutné provést nejprve přibližnou volbu. Předběžně je předpokládán koeficient nasycení 1,325, čemuž odpovídá poměr 0,715 (viz Obr. A5a, Příloha A). Pro určení tohoto koeficientu podle M2 je využita jiná závislost, která je zobrazena v Obr. A5b v Příloze A. Odečtená hodnota je 0,825.

Ideální délka statoru je tedy:

$$l_i = \frac{6,1 \cdot P_i}{\alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2 \cdot n_s} = \frac{6,1 \cdot 16,2 \cdot 10^3}{0,715 \cdot 1,09 \cdot 0,902 \cdot 31000 \cdot 0,72 \cdot 0,184^2 \cdot 1500} = 0,123 \text{ m} \quad (1.6)$$

Koeficient  $k_B$  je určen dle Obr. A6 v příloze A.

Návrh nepředpokládá ventilační obvod a vzduchová mezera je malá, lze říci, že ideální délka statoru je prakticky rovna skutečné. Délka stroje dle M2 je o něco větší a činí 0,182 m (vyžitím 1.3 a zvoleného vnitřního průměru stroje).

Poměr ideální délky a pólové rozteče nesmí být příliš velký ani malý, musí odpovídat hranicím v Obr. A7 v příloze A. Pro ujištění, že zvolený vnější průměr byl správnou volbou, je vhodné provést výpočet všech předcházejících parametrů pro druhé dvě nejbližší možnosti vnějších průměrů v řadě (konkrétně pro 249 a 343 mm). Jelikož provedené výpočty v této části korespondují s výpočty v M1 lze konstatovat dle tabulky na straně 31 tamtéž, že volba byla správná, tudíž je možné pokračovat ve výpočtu.

Aby bylo možné zvolit vhodný průřez drátu, je nezbytné znát jmenovitý fázový proud statoru. Ten je dán vztahem:

$$I_{1f} = \frac{P \cdot 10^3}{m \cdot U_{1f} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{13 \cdot 10^3}{3 \cdot 230 \cdot 0,885 \cdot 0,88} = 24,2 \text{ A} \quad (1.7).$$

Výpočet fázového proudu odpovídá statorovému, který je důležitý pro určení potřebné plochy drážky v M2.

Průřezu drátu se nejprve počítá s počtem paralelních větví 1 a s počtem paralelních drátů 3. Nejprve je navrhováno spojení do jednoduché hvězdy (1 paralelní větev). Vyjde-li nevhodný průřez, zvyšuje se nejprve počet paralelních drátů a poté případně počet paralelních větví. Teprve pak je navrhováno zapojení do trojúhelníka. [1]



Proudová hustota je volena z rozmezí  $5,0 \div 6,5 \text{ A/mm}^2$  (určené v [1]) na velikost  $5,2 \text{ A/mm}^2$ . Průřez vodiče je dán vztahem, který je platný i pro M2. V ní není respektován počet paralelních drátů. Vzhledem k rozhodnutí zachovat tvar drážky pro oba návrhy, byl počet paralelních drátů do výpočtu přidán, neboť průměr drátu o požadovaném průřezu by nebylo možné do drážky umístit. Zmiňovaný vztah je následovný:

$$s_1 = \frac{I_{1f}}{a_{\sim} \cdot a_p \cdot J_s} = \frac{24,2}{1 \cdot 2 \cdot 5,2} = 1,55 \text{ mm}^2 \quad (1.8)$$

Je zvolen drát o průměru 1,45 mm, jehož průřez je  $1,65 \text{ mm}^2$  (drát je stejný jako v návrhu stroje dle M1). Drát s menším průměrem by byl příliš malý.

Počet efektivních vodičů v drážce je počítán dle vztahu:

$$v_{d1} = \frac{A \cdot \tau_{ds} \cdot a_{\sim}}{I_{1f}} = \frac{31000 \cdot 0,0161 \cdot 1}{24,2} = 20,6 \quad (1.9)$$

Výsledné číslo musí být celé a vzhledem k tomu, že bylo zvoleno dvouvrstvé vinutí, i sudé ([1]). Nejbližším vyšším číslem, které vyhovuje všem podmínkám, je 22. Pro menší otevření drážky byly ponechány 3 paralelní dráty, celkový počet dílčích vodičů v drážce  $v_d$  je 66. Nyní je možné určit počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_1 = p \cdot q_s \cdot \frac{v_{d1}}{a_{\sim}} = 2 \cdot 3 \cdot \frac{22}{1} = 132 \text{ závitů} \quad (1.10)$$

M2 považuje určení počtu závitů nadřazené výpočtu efektivních vodičů v drážce. Postup je následovný:

$$N_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot E_m}{\omega \cdot k_{v1} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \beta_{\delta} \cdot \tau_p \cdot l'} = \frac{\sqrt{2} \cdot 223,1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,825 \cdot 0,72 \cdot 0,145 \cdot 0,183} = 70,9 \text{ závitů} \quad (1.11)$$

$E_m$  je velikost indukovaného elektromagnetického pole (dále jen EMP) a je dána součinem fázového napětí a koeficientu  $k_E$  (odečet výše).

Číslo je nutné zaokrouhlit na celé.  $N_1$  je tedy 71 závitů v jedné fázi. Počet efektivních vodičů ve fázi je vypočten ze vztahu:

$$v_{d1} = \frac{2 \cdot a_{\sim} \cdot m \cdot N}{Q_s} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 71}{36} = 11,8 \text{ vodičů} \quad (1.12)$$

Jako vždy musí být počet vodičů ve fázi celé číslo, proto je  $v_{d1} = 12$ . Celkový počet je tedy ještě třikrát vyšší, díky 3 zvoleným paralelním drátům ( $v_d = 36$ ).

Nyní je možné vypočítat magnetický tok jednoho pólu ve vzduchové mezeře a jeho prostřednictvím skutečnou indukci v ní. Výpočet je prováděn dle následujících vztahů:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1f}}{4 \cdot k_B \cdot f \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{0,97 \cdot 230}{4 \cdot 1,09 \cdot 50 \cdot 132 \cdot 0,902} = 0,0086 \text{ Wb} \quad (1.13)$$

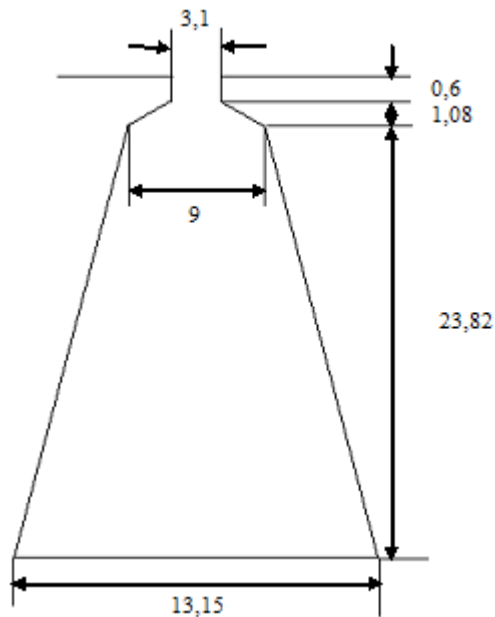
$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \cdot \tau_p \cdot l_i} = \frac{0,0086}{0,715 \cdot 0,145 \cdot 0,123} = 0,672 \text{ T} \quad (1.14).$$

Volná plocha drážky je důležitá pro volbu jejích rozměrů. K výpočtu je třeba určit koeficient plnění volného prostoru drážky  $k_{dr}$ , který bývá v praxi v rozmezí  $0,6 \div 0,8$  ([1]). Aby nemusel být měněn rozměr drážky uvedený v [1] je zvolen koeficient  $k_{dr} = 0,78$ . Volná plocha drážky je rovna:

$$s'_{d1} = \frac{v_d \cdot d_{v1}^2}{k_{dr}} = \frac{66 \cdot 1,56^2}{0,78} = 205 \text{ mm}^2 \quad (1.15).$$

M2 udává, že koeficient plnění drážky je v rozmezí  $0,6 \div 0,66$ , dle kvality vinutí. Pro případ výpočtu byla zvolena horní hranice 0,66. Plocha drážky by poté měla být dána stejnou rovnicí jako v M1.

Je volena lichoběžníková drážka dle následujícího obrázku (Obr. 5). Rozměry pro 13kW AS jsou shodné. Pro 15kW stroj jsou pouze orientační z důvodu nedostatku podkladů pro výpočet přesných rozměrů. Jak již bylo zmíněno, jednotlivé hodnoty pro stroj o výkonu 15 kW jsou uvedeny v příloze B.



Obr. 5: Tvar a rozměry statorové drážky (rozměry v mm).

Velikost magnetické indukce v zubu je zvolena přibližně dle rozmezí  $1,6 \div 2,1$  T v jeho nejužším průřezu. Zvolená hodnota činí 1,65 T. Šířka zubu pro tuto hodnotu indukce je:

$$b_{zs} = \frac{\tau_{ds} \cdot l_i \cdot B_\delta}{k_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot B_{zs}} = \frac{0,0161 \cdot 0,123 \cdot 0,672}{0,95 \cdot 0,123 \cdot 1,65} = 0,007 \text{ m} \quad (1.16).$$

Pro dané rozměry drážky je indukce v zubech statoru určena vynásobením původní zvolené indukce poměrem vypočtené šířky zubu se zvolenou.  $B_{zs}$  je tedy 1,545 T. Šířka zubu dle M2 je volena libovolně s respektováním základních pravidel návrhu stroje. Volba je tedy ponechána stejná jako v prvním případě. Hodnoty indukce statorového zubu jsou stejně jako pro indukci vzduchové mezery dány mezními hodnotami v Tab. 1. Pro obě varianty stroje byla zvolena velikost 1,65 T.

Výška jha statoru je dána vnějším a vnitřním průměrem statoru a hloubkou drážky. Je rovna 0,028 m. Pomocí ní je možné vypočítat magnetickou indukci ve jhu dle vztahu:

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{js} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0086}{2 \cdot 0,028 \cdot 0,123 \cdot 0,95} = 1,318 \text{ T} \quad (1.17).$$

Indukce ve jhu statoru je pro M2 opět volena dle rozmezí v Tab. 1. Zvolená hodnota je 1,4 T.

Poslední položkou, kterou je třeba vypočítat při návrhu statoru, je velikost vzduchové mezery. Existuje mnoho způsobů. Velikost vzduchové mezery může být vypočtena v obou metodách například podle následujícího vztahu (platný pro  $p > 1$ ):

$$\delta = \frac{0,18 + 0,006P^{0,4}}{1000} = \frac{0,18 + 0,006 \cdot 13000^{0,4}}{1000} = 0,45 \text{ mm} \quad (1.18).$$

### 1.1.3 Návrh rotoru

Tato kapitola je věnována výpočtům magnetického obvodu rotoru a jeho vinutí.

Počet drážek rotoru je 46. Tato volba je závislá na počtu pólů, drážek statoru, drážek na pól a případně natočení drážek. Potřebné řady jsou uvedeny v [1] na straně 109. Stejná hodnota je předpokládána i pro výpočet dle M2.

Vnější průměr rotoru je menší o dvě velikosti vzduchové mezery, než je vnitřní průměr statoru. Pro oba typy stroje navržené dle obou metodik je roven 183 mm.

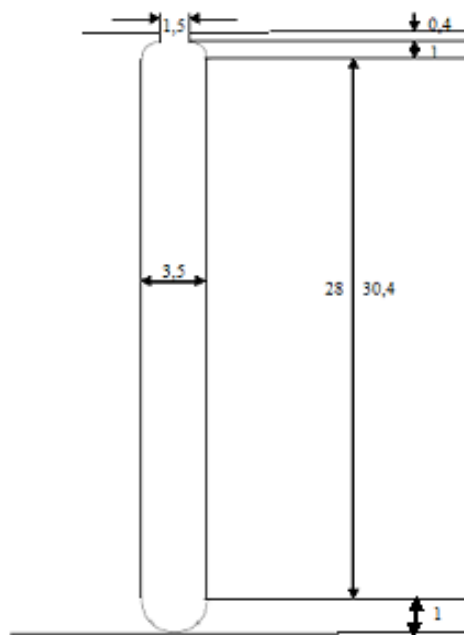
Aby bylo možné určit průřezy tyčí a kruhu nakrátko, je nezbytné znát proudy v nich a jejich proudové hustoty. Pro výpočet jsou použity následující vztahy:

$$I_t = k_I \cdot I_{1f} \cdot \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{\nu 1}}{Q_r} = 0,92 \cdot 24,2 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 132 \cdot 0,902}{46} = 345,6 \text{ A} \quad (1.19)$$

$$I_{kn} = I_t \frac{1}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q_r}\right)} = 345,6 \cdot \frac{1}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{46}\right)} = 1269,1 \text{ A} \quad (1.20).$$

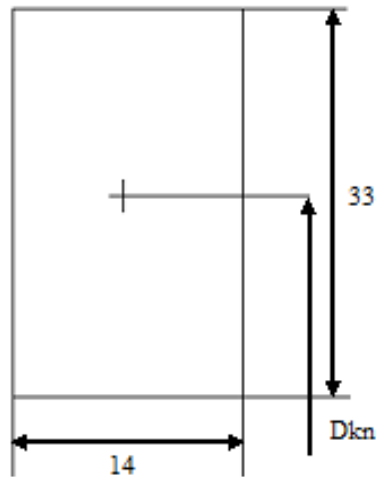
Koeficient  $k_I$  je závislý na účinníku (Obr. A8, Příloha A). Jmenovatel ve výpočtu proudu v kruhu, je možné označit jako  $\Delta$  a je roven 0,272 ([1]). Pod tímto označením bude používán v dalších výpočtech. Velikosti proudových hustot jsou  $J_t = 3,4 \text{ A/mm}^2$  (má být v rozmezí  $2,2 \div 4,5 \text{ A/mm}^2$ ) a  $J_{kn} = 2,6 \text{ A/mm}^2$  (z rozmezí  $(0,65 \div 0,8)J_t$ ). Průřez tyče i kruhu je dán podílem proudu a proudové hustoty. Průřez tyče  $S_t$  je tedy  $102 \text{ mm}^2$  a  $S_{kn}$  je  $488 \text{ mm}^2$ . [1]

Tvar vybrané drážky je zobrazen na Obr. 6. Rozměry drážky odpovídají průřezu  $103 \text{ mm}^2$ , lze je tedy pro stroj o výkonu 13 kW ponechat.



**Obr. 6:** Tvar a rozměry rotorové drážky (rozměry v mm)

Další obrázek (Obr. 7) ilustruje rozměry kruhu nakrátko. Jeho průřez je roven obsahu obdélníku o stranách 33 a 14 mm.



**Obr. 7: Rozměry kruhu v průřezu (rozměry v mm)**

Pro výpočet plochy drážky dle M2 je třeba znát rotorový proud, který je přibližně dán následovně:

$$I_r \approx \frac{v_{d1} Q_s}{a \cdot Q_r} I_{1f} \cos \varphi = \frac{12 \cdot 36}{1 \cdot 46} \cdot 24,2 \cdot 0,88 = 200 \text{ A} \quad (1.21).$$

Ostatní vztahy jsou stejné jako pro drážku statoru, pouze s obměnou na rotorové veličiny.

Rotor bude nasazen přímo na hřídel, tudíž její průměr je stejný jako vnitřní průměr rotoru 60 mm. Délka rotoru se v případě navrhovaného stroje volí o 5 mm větší než délka statoru ( $l_{\text{Fer}} = 0,128 \text{ m}$ ). ([1]) Výška jha rotoru je dána prakticky stejným vztahem jako u statoru, pouze zvětšena o vhodnou poměrnou část průměru hřídele. Tím je respektována skutečnost, že rotor je nasazený přímo na hřídeli a nelze tak zanedbat hloubku vniku při skluzové frekvenci. ([1]) Výška jha rotoru bude tedy 36,5 mm. Indukce ve jhu rotoru lze vypočítat podle rovnice 1.17., pouze se zaměněním statorových veličin za rotorové. Výsledná hodnota  $B_{jr}$  je 0,98 T. Dle M2 je magnetická indukce volena mezi hranicemi uvedenými v Tab. 1.

### 1.1.4 Magnetizační proud

Výpočet magnetizačního proudu se skládá z několika částí. Nejprve je nezbytné vypočítat magnetické napětí vzduchové mezery a statorových a rotorových zubů na pólpar, které jsou závislé na koeficientu  $\alpha_\delta$  a koeficientu nasycení  $k_z$ . Bude-li vypočtený koeficient nasycení odlišný od koeficientu zvoleného v návrhu statoru o více než 3 %, je nutné přepočítat všechny vypočtené indukce v příslušném

poměru. Poté se vypočte nové  $k_z$  a určí se příslušné  $\alpha_\delta$ . Pokud se bude  $\alpha_\delta$  lišit například až na třetím desetinném místě od původního, není třeba tento cyklus opakovat. [1]

Po dokončení přepočtu je třeba ještě určit magnetizační napětí jha statoru a rotoru, na které nesmí být zapomenuto při výpočtu celkového magnetického napětí stroje.

- Magnetické napětí vzduchové mezery

Na počátku je nezbytné vypočítat Carterův činitel. Ten je dán součinem Carterova činitele statoru a rotoru, které lze určit z Obr. A9 v příloze A dle následujících poměrů:  $\frac{b_{o1}}{\tau_{ds}} = 0,19$ ,  $\frac{b_{o1}}{\delta} = 6,89$  (pro stator),  $\frac{b_{o2}}{\tau_{dr}} = 0,12$  a  $\frac{b_{o2}}{\delta} = 3,33$  (pro rotor).

Carterův činitel statoru  $k_{c1}$  je 1,14 a pro rotor je  $k_{c2}$  je 1,07. Celkový  $k_c$  je tedy je 1,21.

Magnetické napětí vzduchové mezery na pólpár dle M1 lze vypočíst podle vztahu:

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,67 \cdot 0,00045 \cdot 1,21 \cdot 10^2 = 584,5 \text{ A} \quad (1.22).$$

Dle M2 jsou Carterovy koeficienty počítány jiným způsobem, a to přes konstantu  $\kappa$ , která je přibližně dána vztahem:

$$\kappa \approx \frac{\frac{b_{o1}}{\delta}}{5 + \frac{b_{o1}}{\delta}} \quad (1.23).$$

Pro stator je roven 0,58 a pro rotor 0,4. Carterův činitel je pak vztahem:

$$k_c = \frac{\tau_d}{\tau_d - \kappa b_{o1}} \quad (1.24).$$

Pro stator je 1,13 a pro rotor je 1,05. Celkový Carterův činitel je tedy 1,18.

Výsledné magnetické napětí vzduchové mezery bude:

$$U_{m\delta} = \frac{B_\delta \cdot k_c \cdot \delta}{\mu_0} = \frac{0,72 \cdot 1,18 \cdot 0,45}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 301,6 \text{ A} \quad (1.25).$$

- Magnetické napětí zubů statoru

Další součástí výpočtu magnetizačního proudu je určení magnetického napětí zubů statoru. Aby bylo možné výpočet uskutečnit, je nutné znát jejich měrné magnetické napětí. To je dáno magnetizační charakteristikou dostupnou na Obr.

A10 v příloze A. Jelikož je magnetická indukce zubu 1,54 T je měrné magnetické napětí 3200 A/m. Výsledné magnetické napětí zubu je pak:

$$U_{mzs} = 2 \cdot H_{zs} \cdot h_{ds} = 2 \cdot 3200 \cdot 0,0255 = 163,2 \text{ A} \quad (1.26).$$

Výpočet pro M2 je shodný s výjimkou počátečních hodnot magnetické indukce (1,65 T – odpovídající  $H_{zs} = 5500 \text{ A/m}$ ) a magnetické napětí je počítáno pouze přes jednu hloubku zubu a je rovno 116,6 A.

- Magnetické napětí zubů rotoru

Jelikož rotorové zuby nemají po celé své výšce konstantní šířku, je nezbytné rozdělit výpočet magnetické indukce na tři dílčí část: u hlavy, ve středu zubu a u paty.

Indukce v zubech u hlavy se vypočítá:

$$B_{Zr} = \frac{B_{\delta} \cdot \tau_{dr} \cdot l_i}{b_{Zr} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,67 \cdot 0,0125 \cdot 0,123}{0,0088 \cdot 0,128 \cdot 0,95} = 0,97 \text{ T} \quad (1.27).$$

Tomu odpovídající měrné magnetické napětí 470 A/m.

Ve středu zubu a u paty je nezbytné přepočítat drážkovou rozteč a pomocí ní určit konkrétní šířku zubu. Ve středu zubu je průměr rotoru zmenšen o hloubku drážky, u paty o její dvojnásobek. Šířka zubu v daném místě je drážková rozteč zmenšená o šířku zubu. Magnetická indukce v daném místě je indukce původní násobená poměrem šířky zubu u hlavy a šířky v daném místě. Výsledné hodnoty jsou následující:

Ve středu zubu:

$$\tau_{dr}' = 0,01 \text{ m}, b_{Zr}' = 0,007 \text{ m}, B_{Zr}' = 1,22 \text{ T}, H_{Zr}' = 880 \text{ A/m}.$$

U paty:

$$\tau_{dr}'' = 0,008 \text{ m}, b_{Zr}'' = 0,005 \text{ m}, B_{Zr}'' = 1,75 \text{ T}, H_{Zr}'' = 9000 \text{ A/m}.$$

Jsou-li známá všechna měrná magnetická napětí, je třeba spočítat jejich střední hodnotu (běžný aritmetický průměr,  $H_{Zr}''$  počítána 4krát). Ta činí 2165 A/m. Magnetické napětí zubů na půlpár je (dle rovnice 1.26) 131,6 A.

M2 zanedbává skutečnost, že se zuby rozšiřují. Výpočet je stejný jako pro zuby statorové. Pro indukci 1,825 T je měrné magnetické napětí 15000 A/m a magnetické napětí 264,8 A.

- Koeficient nasycení zubů a koeficient  $\alpha_\delta$

Koeficient nasycení zubů je závislý na jejich magnetickém napětí a na magnetickém napětí vzduchové mezery. Vypočten je podle vztahu:

$$k_z = \frac{U_{m\delta} + U_{mzs} + U_{mzr}}{U_{m\delta}} = \frac{584,5 + 163,2 + 131,6}{584,5} = 1,505 \quad (1.28).$$

Tomu dle opravné křivky přísluší koeficient  $\alpha_\delta$  přibližně o velikosti 0,735. Je evidentní, že se vypočtený koeficient  $k_z$  od předpokládaného (1,325) liší o více než 3%, je proto nutné opakovat výpočet magnetických napětí pro novou hodnotu  $\alpha_\delta$ . Poměr původního a nového koeficientu  $\alpha_\delta$  je 0,98. V tomto poměru je nutné přepočítat magnetické indukce a získat tak nové hodnoty měrného magnetického napětí. ([1]) Všechny potřebné hodnoty jsou uvedené v tabulce v příloze B.

Nově vypočtený koeficient  $k_z = 1,44$  a tomu příslušný  $\alpha_\delta = 0,73$ . Hodnoty  $\alpha_\delta$  se liší až na 3. desetinném místě, není tudíž nutné tento cyklus opakovat.

Saturační koeficient pro metodiku M2 je dán následujícím vztahem:

$$k_z = \frac{U_{mzs} + U_{mzr}}{U_{m\delta}} = \frac{116,6 + 264,8}{301,6} = 1,26 \quad (1.29).$$

Odpovídající koeficient  $\alpha_\delta$  je 0,822. Původní koeficient se od nového liší až na třetím desetinném místě a není též nutné opakovat výpočty.

- Magnetické napětí jha statoru a rotoru

Aby bylo magnetické napětí stroje kompletní, je třeba určit magnetické napětí jha statoru a rotoru. Postup je prakticky stejný jako u ostatních částí stroje. Indukce jha statoru je 1,32 T a rotoru 0,98 T, k nim příslušná měrná magnetická napětí jsou 1200 (stator) a 500 A/m (rotor). K výpočtu je ještě třeba znát činitel  $\xi$ , který respektuje nerovnoměrné rozložení indukce ve jhu. Odečítá se z Obr. A11 v Příloze A. Činitel statoru je 0,45 a rotoru 0,57.

Posledním nezbytným parametrem je střední délka siločáry. Ve jhu statoru je dána vztahem:

$$L_{js} = \frac{\pi \cdot D_{js}}{2p} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{js})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,291 - 0,028)}{4} = 0,206 \text{ m} \quad (1.30).$$

Pro rotor je průměr jha rotoru dán součtem vnitřního průměru a jeho výšky. Délka střední siločáry je rovna 0,0755 m.



Magnetické napětí jha je tedy:

$$U_{mj} = \xi \cdot H_j \cdot L_j \quad (1.31).$$

Výsledné hodnoty magnetického napětí jsou následující: jho statoru 111,5 A a jho statoru 21,5 A.

M2 počítá konečné hodnoty jako součin měrného magnetického napětí pro danou indukci a výšky jha. Výsledné magnetické napětí jha statoru je 52 A a rotoru 24,5 A.

- Magnetizační proud

K určení magnetizačního proudu je nezbytná znalost celkového magnetického napětí. To je dáno součtem všech pěti dílčích magnetických napětí vypočtených výše. Dle M1 je konečné napětí 959,5 A, dle M2 759,3 A.

Magnetizační proud dle M1 je následující:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot U_m}{0,9 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 959,5}{0,9 \cdot 3 \cdot 132 \cdot 0,902} = 6 \text{ A} \quad (1.32).$$

Pro metodiku M2 je výpočet podobný, pouze s jinou konstantou. V rovnici 33 je 0,9. Změna konstanty je na 0,45 ( $\sqrt{2}/\pi$ ). Výsledný magnetizační proud je 17,6 A.

### 1.1.5 Parametry motoru pro pracovní režim

Výpočet parametrů náhradního schématu je proveden pouze pro M1. Pro druhou metodiku není dostupný dostatek údajů.

- Odpory vinutí

Výpočet odporu vinutí statoru i rotoru se značně liší vzhledem k různé konstrukci.

- Odpor vinutí statoru

Vinutí statoru je vsypávané. Nejprve je tedy nutné vypočítat délku čela vinutí. Ve výpočtu figuruje parametr udávající rozteč cívky v polovině hloubky drážky.

$$\tau_{c1} = y_{d1} \cdot \frac{\pi \cdot (D + h_{ds})}{Q_s} = 7 \cdot \frac{\pi \cdot (0,184 + 0,0255)}{36} = 0,128 \text{ m} \quad (1.33).$$

Koeficienty pro výpočet délky čela a jeho vyložení je třeba znát koeficienty  $k_{e1}$  a  $k_{B1}$ , které jsou závislé na počtu pólů. Pro čtyřpólový stroj je  $k_{e1} = 1,55$  a  $k_{B1} = 0,5$ .

Mimo jiné je ještě nezbytné znát šířku vinutí (též závisí na počtu pólů), která je 0,01 m (hodnoty dostupné v [1]). Délka čela vinutí je:

$$l_{\xi l} = k_{\xi l} \cdot \tau_{c1} + 2 \cdot B = 1,55 \cdot 0,128 + 2 \cdot 0,01 = 0,219 \text{ m} \quad (1.34).$$

Důležitou hodnotou pro konstrukční návrh stroje je vyložení čel vinutí. Ta je dána vztahem:

$$l_{Bl} = k_{Bl} \cdot \tau_{c1} + B = 0,5 \cdot 0,128 + 0,01 = 0,074 \text{ m} \quad (1.35).$$

Střední délka závitů vinutí statoru je dána dvojnásobkem součtu délky statoru a čela. Je-li tato hodnota vynásobena počtem závitů, získá se celková délka vodičů jedné fáze, která je potřebná pro výpočet odporu jedné fáze vinutí při pracovní teplotě.

Ohmický odpor jedné fáze statorového vinutí (při 75°C –  $\rho$  mědi je asi 1/46) je:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{L_s}{a \cdot a_p \cdot s_1} = \frac{1}{46} \cdot \frac{90,2}{1 \cdot 3 \cdot 1,651} = 0,4 \Omega \quad (1.36).$$

V náhradním schématu stroje jsou obvykle parametry udávány v poměrných jednotkách. Přepočet je následující:

$$r_1 = \frac{I_{1f} \cdot R_1}{U_{1f}} = \frac{24,2 \cdot 0,4}{230} = 0,042 \quad (1.37).$$

- Odpor vinutí rotoru

Vinutí rotoru je tvořeno hliníkovým odlítkem klece nakrátko. Celkový odpor je dán odporem tyčí a kruhu.

Odpor tyče (při 75°C -  $\rho$  hliníku je asi 1/23) je:

$$R_t = \rho \cdot \frac{l_{Fer}}{s_t} = \frac{1}{23} \cdot \frac{0,128}{103} = 5,47 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (1.38).$$

Odpor části kruhu mezi dvěma sousedními tyčemi je:

$$R_{kn} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_r \cdot s_{kn}} = \frac{1}{23} \cdot \frac{\pi \cdot 0,15}{46 \cdot 488} = 0,1 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (1.39).$$

Ohmický odpor jedné fáze tedy bude:

$$R_2 = R_t + \frac{2 \cdot R_{kn}}{\Delta^2} = 5,4 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-5}}{0,272^2} = 7,9 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (1.40).$$

$\Delta$  bylo vypočítáno již výše (kapitola o návrhu rotoru).

Rotorové parametry v náhradním schématu se udávají přepočtené na stator. K tomu slouží koeficient přepočtu:

$$p_z = \frac{m_1 \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{m_2 \cdot (N_2 \cdot k_{v2})^2} = \frac{3 \cdot (132 \cdot 0,902)^2}{46 \cdot (0,5 \cdot 1)^2} = 3697 \quad (1.41)$$

Pro klecový rotor platí, že počet fází  $m_2$  odpovídá počtu tyčí  $Q_r$  (počet tyčí je 46), koeficient vinutí  $k_{v2}$  je roven 1 a počet závitů  $N_2$  je 0,5.

Ohmický odpor přepočtený na stator je tedy roven  $0,3 \Omega$  a v poměrných hodnotách (viz 1.37) 0,031.

- Rozptylové reaktance

Druhým typem parametrů náhradního schématu jsou rozptylové reaktance statoru a rotoru.

- Rozptylová reaktance statoru

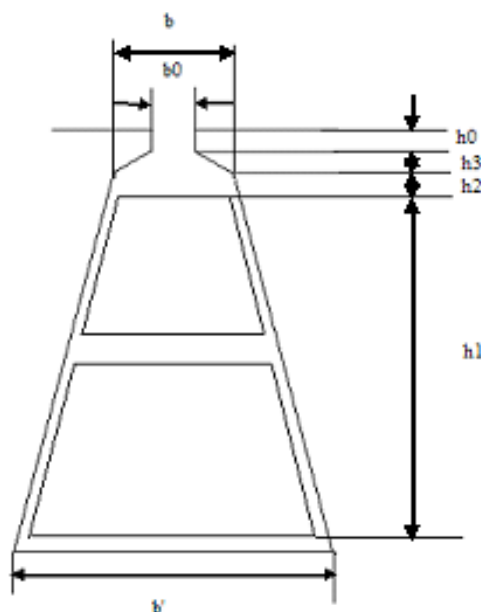
K výpočtu rozptylové reaktance vinutí statoru je třeba znát činitel celkové náhradní magnetické vodivosti. Ten je součtem dílčích činitelů:

- Činitel jednotkové magnetické vodivosti drážky statoru

Tento činitel je dán geometrickými rozměry drážky a je následující:

$$\lambda_{ds} = \frac{h_1}{3 \cdot b} k_\beta + \left( \frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_3}{b + 2 \cdot b_o} + \frac{h_o}{b_o} \right) k'_\beta = \frac{20}{3 \cdot 9} 0,873 + \left( \frac{3}{9} + \frac{3 \cdot 1,08}{9 + 2 \cdot 3,1} + \frac{0,6}{3,1} \right) 0,83 = 1,26 \quad (1.42).$$

Koeficienty  $k_\beta$  a  $k'_\beta$  jsou závislé na zkrácení kroku. Jejich velikost je odečtena z grafu v Příloze A (Obr. A12). Konkrétní rozměry drážky jsou zobrazeny na Obr. 8.



Obr. 8: Rozměry statorové drážky tvaru L pro výpočet činitele jednotkové magnetické vodivosti drážky

- Činitel náhradní vodivosti diferenčního rozptylu

Tento činitel je dán rovnicí:

$$\lambda_{difs} = \frac{0,9 \cdot \tau_{ds} \cdot (q_s \cdot k_{v1})^2 \cdot \rho_{difs} \cdot k_{s1} \cdot \sigma_{difs}}{\delta \cdot k_c} = \frac{0,9 \cdot 16,1 \cdot (3 \cdot 0,902)^2 \cdot 0,8 \cdot 0,95 \cdot 0,011}{0,45 \cdot 1,21} = 1,65$$

(1.43).

$\rho_{difs}$  je koeficientem tlumení,  $k_{s1}$  je činitel respektující otevření drážky (výpočet viz [1]) a  $\sigma_{difs}$  je činitel diferenčního rozptylu (odečteno z Obr. A13).

- Činitel náhradní vodivosti rozptylu čel statoru

Výpočet je prováděn dle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned} \lambda_{\check{c}s} &= 0,34 \cdot \frac{q_s}{l_{Fe}} \cdot \left( l_{\check{c}l} - 0,64 \cdot \frac{y_{dl}}{Q_p} \cdot \tau_p \right) = \\ &= 0,34 \cdot \frac{3}{0,123} \left( 0,219 - 0,64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0,145 \right) = 1,22 \end{aligned} \quad (1.44).$$

Činitel celkové náhradní vodivosti je dán součtem předchozích a jeho velikost je 4,13. Rozptylová reaktance vinutí statoru poté bude:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left( \frac{N_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{Fe}}{p \cdot q_s} \cdot \Sigma \lambda_s \cdot 10^2 = \\ &= 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left( \frac{132}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,123}{2 \cdot 3} \cdot 4,13 \cdot 10^2 = 1,17 \, \Omega \end{aligned} \quad (1.45)$$

V poměrných jednotkách (viz 1.37) je 0,12.

- Rozptylová reaktance rotoru

Stejně jako v případě statoru je činitel celkové náhradní magnetické vodivosti součtem dílčích činitelů:

- Činitel jednotkové magnetické vodivosti drážky rotoru

Tento činitel je dán geometrickými rozměry drážky a je:

$$\lambda_{dr} = \frac{h_1}{3 \cdot b} + \frac{3 \cdot h_3}{b + 2 \cdot b_o} + \frac{h_o}{b_o} = \frac{28}{3 \cdot 3,5} + \frac{3 \cdot 1}{3,5 + 2 \cdot 1,5} + \frac{0,4}{1,5} = 1,39 \quad (1.46).$$

- Činitel náhradní vodivosti diferenčního rozptylu

Činitel je počítán stejně jako u statoru tedy dle rovnice 1.43. Činitel vinutí pro klecový rotor činí 1, koeficient tlumení pro rotor je též 1, činitel respektující otevření drážky je pro rotorové drážky uzavřené a polozavřené roven 1, koeficient diferenčního rozptylu je 0,0062 pro  $q_r = Q_r/m \cdot 2p = 3,84$ .

- Činitel náhradní vodivosti rozptylu čel rotoru

Velikost činitele je počítána následovně:

$$\lambda_{\check{c}r} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_r \cdot l_{Fer} \cdot \Delta^2} \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{h + 2 \cdot b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 0,15}{46 \cdot 0,128 \cdot 0,272^2} \log \frac{4,7 \cdot 0,15}{0,033 + 2 \cdot 0,014} = 0,84 \quad (1.47).$$

Celkový činitel náhradní magnetické vodivosti rotoru je 6,12.

Rozptylová reaktance rotoru je následující:

$$X_2 = 7,9 \cdot f \cdot l_{Fer} \cdot \Sigma \lambda_r \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,128 \cdot 6,12 \cdot 10^{-6} = 3,1 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (1.48).$$

Po přepočtení na stator je její velikost 1,14  $\Omega$  a v poměrných jednotkách 0,12.

- Reaktance vzájemné indukčnosti a vliv natočení drážek

Reaktance vzájemné (ve schématu obvykle nazývána hlavní) indukčnosti je dána vztahem:

$$X_{12} = \frac{U_{1f} - I_{\mu} \cdot X_1}{I_{\mu}} = \frac{230 - 6 \cdot 1,17}{6} = 37,4 \Omega \quad (1.49).$$

Na rotoru jsou uvažovány zešikmené drážky (o jednu drážku -> úhel 15,6°), proto je nezbytné vliv natočení započítat. K tomu slouží činitel zešikmení:

$$\sigma_z = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{2p}{Q_r}\right)^2 \cdot \frac{U_{1f}}{I_{\mu} \cdot X_1} = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{4}{46}\right)^2 \cdot \frac{230}{6,1,17} = 1,1 \quad (1.50).$$

Rozptylové reaktance statoru a rotoru (přepočtené na stator) budou po vynásobení tímto činitelem 1,28 a 1,26.

### 1.1.6 Ztráty

Důležitým ukazatelem kvality návrhu stroje jsou jeho ztráty. Tato kapitola se zabývá ztrátami při chodu na prázdko, které jsou tvořeny ztrátami v železe, mechanickými a ventilačními a ve vinutí statoru.

Nejprve je nezbytné spočítat hmotnost dílčích částí stroje – jhu statoru, zubů statoru a rotoru. S jejich znalostí je možné spočítat ztráty v těchto částech. Ztráty ve jhu statoru jsou následující:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= k_{jz} \cdot p_{1,0} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot G_{js} \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,6 \cdot 3,3 \cdot (1,317 \cdot 0,98)^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 21 \cdot 10^{-3} = 0,185 \text{ kW} \quad (1.51) \end{aligned}$$

Pro ztráty v zubech statoru platí stejná rovnice, pouze koeficient je roven 1,8. Výsledná hodnota je 0,084 kW. Součet těchto hodnot udává hlavní ztráty v železe statoru  $\Delta P_{Fel}$ , které činí 0,269 kW.

Přídavné ztráty jsou tvořeny povrchovými ztrátami v zubech statoru a rotoru a tepavými ztrátami v nich. Povrchové v zubech statoru způsobené rotorem jsou dány:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\delta ps} &= \pi \cdot D \cdot l_{Fe} \cdot \frac{b_{zs\delta}}{\tau_{ds}} \cdot p_{\delta ps} \cdot 10^3 = \\ &= \pi \cdot 0,184 \cdot 0,123 \cdot \frac{0,0161-0,0031}{0,0161} \cdot 112,2 \cdot 10^3 = 0,007 \text{ kW} \quad (1.52) \end{aligned}$$

Ve výpočtu figuruje parametr  $p_{\delta ps}$ , což jsou povrchové ztráty na jednotku plochy:

$$\begin{aligned}
p_{\delta ps} &= 0,5 \cdot k_p \cdot \left(\frac{Q_s \cdot n_s}{10000}\right)^{1,5} \cdot (1000 \cdot B_o \cdot \tau_{dr})^2 = \\
&= 0,5 \cdot 2 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (1000 \cdot 0,199 \cdot 0,0125)^2 = 112,2 \text{ W/m}^2
\end{aligned}
\tag{1.53}$$

$B_o$  je amplituda kolísání indukce, která je dána součinem Carterova činitele, indukce ve vzduchové mezeře po přepočtu na nové  $\alpha_s$  a koeficientu  $\beta_o$ , jež závisí na poměru  $b_{o1}/\delta$  a je pro konkrétní poměr 3,33 roven 0,25. Pro rotorové zuby je výpočet stejný, pouze se změnou pro rotorové veličiny. Výsledné povrchové ztráty jsou 0,018 kW.

Tepavé ztráty v zubech statoru způsobené rotorem lze vypočítat dle vztahu:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{zs} &= 0,11 \cdot \left(\frac{Q_r \cdot n_s}{1000} \cdot B_{p1}\right)^2 \cdot G_{zs} \cdot 10^{-3} = \\
&= 0,11 \cdot \left(\frac{46 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,028\right)^2 \cdot 6,1 \cdot 10^{-3} = 0,003 \text{ kW}
\end{aligned}
\tag{1.54}$$

Konstanta 0,11 je platná pro ocel o měrných ztrátách větších než 2,6 W/kg.  $B_{p1}$  je amplituda pulzace indukce statoru, jež je dána vztahem:

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot \tau_{ds}} \cdot B_{zs} = \frac{1,33 \cdot 0,45}{2 \cdot 16,1} \cdot 1,513 = 0,028
\tag{1.55}$$

Koeficient  $\gamma_2$  je počítán podle:

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{o2}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{o2}}{\delta}\right)^2} = \frac{\left(\frac{1,5}{0,45}\right)^2}{5 + \left(\frac{1,5}{0,45}\right)^2} = 1,33
\tag{1.56}$$

Tepavé ztráty v zubech rotoru jsou dány stejnými vztahy. Výsledná hodnota je 0,022 kW. Celkové přídavné ztráty  $\Delta P_{Fed}$  je 0,048 kW. Ztráty v železe celkem jsou tedy součtem hlavních a přídavných a činí 0,317 kW.

Do celkových ztrát naprázdno je třeba připočítat i ztráty mechanické a ventilační.

$$\begin{aligned}
\Delta P_m &= k_T \cdot \left(\frac{n_s}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D)^3 \cdot 10^{-3} = \\
&= 7 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot 0,184)^3 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ kW}
\end{aligned}
\tag{1.57}$$

Koeficient  $k_T$  je volen pro stroj bez radiálních ventilačních kanálů s lopatkami na kruhu nakrátko. Ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno, při uvažování proudu naprázdno rovnému proudu magnetizačnímu, jsou:

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 0,396 \cdot 5,97 \cdot 10^{-3} = 0,042 \text{ kW} \quad (1.58).$$

Celkové ztráty naprázdno jsou tedy 0,458 kW.



## **2 Návrh asynchronního stroje pomocí programového prostředí ANSYS Maxwell 3D**

Programové prostředí ANSYS Maxwell 3D je software sloužící k simulaci EMP 2D či 3D modelů elektromagnetických (např. transformátorů, toroidních cívek atd.) a elektromechanických zařízení (elektrické točivé stroje – asynchronní motory, stejnosměrné motory, BLDC motory atd.). K řešení statických, frekvenčně i časově závislých EMP využívá metodu konečných prvků. Pro vlastní řešení těchto polí zkoumaných zařízení stačí znát jejich geometrii, vlastnosti použitých materiálů a požadovaný výstup. Se znalostí těchto položek Maxwell automaticky generuje přesnou a účinnou matici řešení. [5]

V programovém prostředí je integrován grafický editor pro 2D i 3D provedení (z 2D modelu lze následně vytvořit 3D model či naopak), v němž je možné vytvořit model stroje. V editoru lze také využít již definovaných tvarů (User Defined Primitive). Tato možnost obsahuje základní prvky pro magnetické obvody a vinutí většiny existujících známých elektrických zařízení. Pro snadné vytvoření modelů elektrických točivých strojů je prostředí vybaveno expertním modulem RMxprt.

### **2.1 Tvorba modelu v expertním modulu**

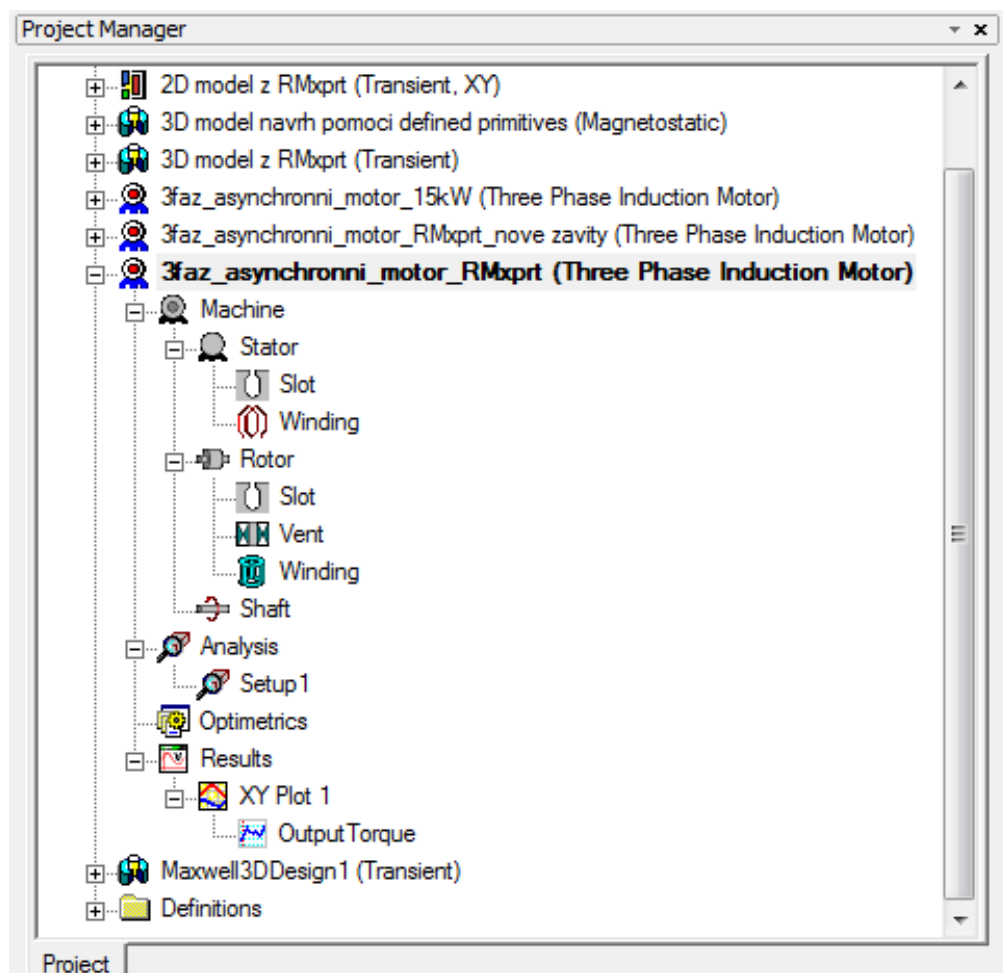
#### **RMxprt**

RMxprt je modul pro návrh elektrických točivých strojů založený na využití šablon. Výpočet provádí dle klasické analytické teorie strojů a ekvivalentních magnetických obvodů. [5]

Využití RMxprt usnadňuje návrh stroje především z hlediska prováděných změn. Pokud je model stroje vytvářen pomocí AM, sebemenší změna parametrů znamená opakování složitých výpočtů (v současné době je toto zjednodušeno za použití programů jako je MS Excel či Mathematica). RMxprt provádí rychlé výpočty, díky nimž je možné prakticky okamžitě získat charakteristiky potřebné pro další optimalizaci navrhovaného stroje.

Aby mohl být vytvořen geometrický model stroje, je třeba do šablony v modulu RMxprt zadat detailní rozměry stroje, např. průměry statoru a rotoru, jejich délky, vyložení čel vinutí atd. Kromě geometrie stroje je nezbytné definovat i jeho elektromagnetické zatížení aktivní části, napájení a druh zatížení. [6]

Zadávání výše uvedených parametrů usnadňuje projektový manažer. Ten je v expertním modulu RMxprt rozčleněn na čtyři základní části, které názorně ukazují postup návrhu a řešení modelu stroje (viz Obr. 9).



Obr. 9: Projektový manažer pro návrh stroje pomocí expertního modulu RMxprt v programovém prostředí ANSYS Maxwell 3D. [7]

### 2.1.1 Elektromagnetický návrh stroje

EMN stroje se provádí prostřednictvím šablon, do nichž jsou postupně zadávány potřebné údaje. Jednotlivé šablony určené pro návrh AS s kotvou nakrátko s popisem všech položek jsou shrnuty v následujících podkapitolách. Uváděné číselné údaje se týkají varianty stroje s typovým výkonem 13 kW.

### 2.1.1.1 Šablona Machine (stroj)

Základní šablonou návrhu AS je Machine (viz Obr. C1, Příloha C), která slouží pro zadání následujících údajů:

1. Machine Type	<i>typ stroje</i>	3f asynchronní
2. Number of Poles	<i>počet pólů</i>	4
3. Stray Loss Factor	<i>koeficient dodatečných ztrát</i>	0,005
4. Frictional Loss	<i>ztráty třením</i>	20 W
5. Windage Loss	<i>ztráty ventilační</i>	80 W
6. Reference Speed	<i>vztažné otáčky</i>	1500 rpm

Pozn.:

- koeficient dodatečných ztrát je zadáván jako desetinné číslo, např. 0,02 značí, že ztráty budou tvořit 2 % z výkonu stroje a respektuje vliv skinefektu ve vodičích a rozptylového magnetického pole na velikost celkových ztrát
- ztráty třením v ložiscích a ventilační ztráty jsou udávány pro zadané vztažné otáčky

### 2.1.1.2 Šablona Stator

Pro nastavení geometrických rozměrů magnetického obvodu statoru slouží záložka Stator (viz Obr. C2, Příloha C). V této šabloně jsou následující parametry:

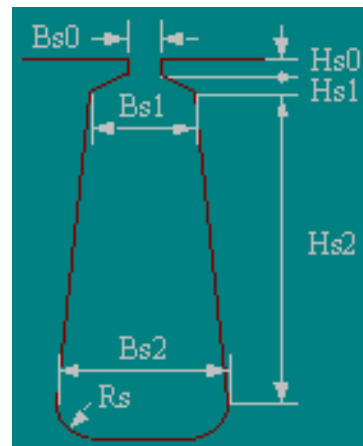
1. Outer Diameter	<i>vnější průměr statoru</i>	291 mm
2. Inner Diameter	<i>vnitřní průměr statoru</i>	184 mm
3. Length	<i>délka statoru</i>	123 mm
4. Stacking Factor	<i>činitel plnění železa</i>	0,95
5. Steel Type	<i>materiál magnetického obvodu statoru</i>	D21_50
6. Number of Slots	<i>počet statorových drážek</i>	36
7. Slot Type	<i>typ statorové drážky</i>	3
8. Lamination Sectors	<i>počet sekcí (paketů)</i>	1
9. Press Board Thickness	<i>tloušťka stahovací desky</i>	0
10. Skew Width	<i>zkosení drážek</i>	0

Pozn.:

- svazek plechů je možné dělit do několika paketů oddělených radiálními ventilačními kanály
- svazek plechů lze stahovat několika způsoby, ale použití stahovacích desek ze stejného materiálu, jako jsou plechy, ovlivňuje výsledné magnetické pole ve stroji
- natočení drážek se využívá k zeslabení pulzací momentu a obvykle se z technologických důvodů drážky natáčejí na rotoru nikoliv na statoru.

### 2.1.1.3 Šablona Slot (statorová drážka)

Šablona Slot slouží k zadávání rozměrů drážky daného typu zvoleného v záložce Stator. Zvolená drážka 3 je zobrazena na Obr. 10.



**Obr. 10: Základní rozměry zvoleného typu statorové drážky. [7]**

Rozměry zvolené drážky (viz Obr. C3, Příloha C) jsou následující:

- |        |          |
|--------|----------|
| 1. Hs0 | 0,6 mm   |
| 2. Hs1 | 1,08 mm  |
| 3. Hs2 | 23,82 mm |
| 4. Bs0 | 3,1 mm   |
| 5. Bs1 | 9 mm     |
| 6. Bs2 | 13,15 mm |
| 7. Rs  | 0 mm     |

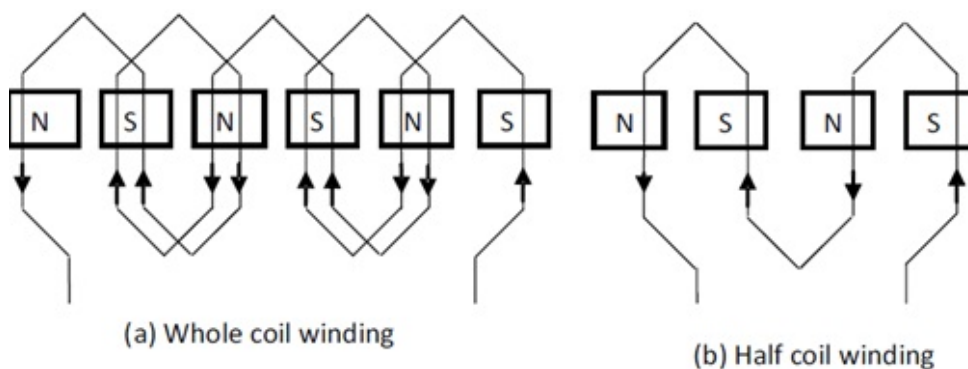
### 2.1.1.4 Šablona Winding (vinutí statoru)

Vinutí statoru je zadáváno prostřednictvím šablony Winding. Ta je rozdělena do dvou záložek. První z nich, stejnojmenná záložka Winding (viz Obr. C4, Příloha C), obsahuje následující údaje pro vyplnění:

1. Winding Layers	<i>počet vrstev vinutí</i>	2
2. Winding Type	<i>typ vinutí</i>	Whole-Coiled
3. Parallel Branches	<i>počet paralelních větví</i>	1
4. Conductors per Slot	<i>počet vodičů na drážku</i>	20
5. Coil Pitch	<i>cívkový krok v počtu drážek</i>	7
6. Number of Strands	<i>počet drátů na vodič</i>	0
7. Wire Wrap	<i>izolace vodiče</i>	0,11
8. Wire Size	<i>velikost/průměr vodiče</i>	1,45

Pozn.:

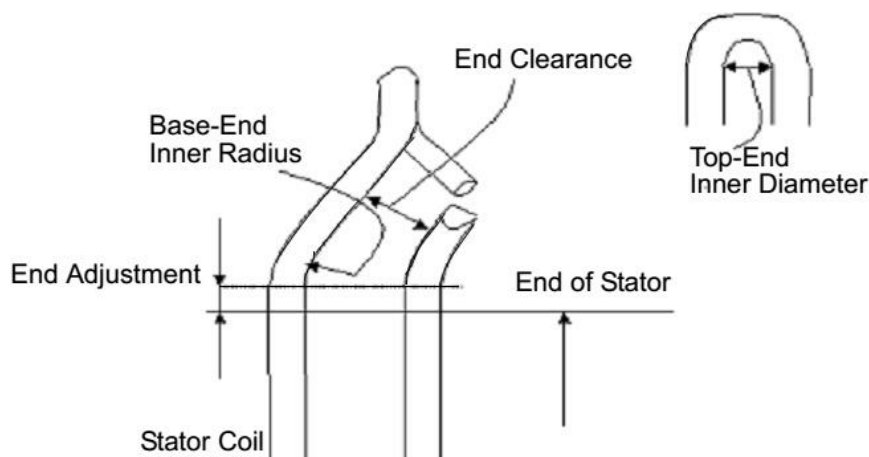
- položka Winding type obsahuje dvě možnosti Whole-Coiled (cívkové vinutí) a Half-Coiled (vlnové vinutí). Obě možnosti jsou zobrazené na Obr. 11.
- pokud není otevření drážky dostatečné, aby do drážky prošel vodič o potřebném průměru, je nutné zvolit menší průměr drátu a znásobit jejich počet tak, aby vyhovovaly původnímu průměru. Tomu odpovídá položka Number of Strands. Pokud je ponechána 0, program sám vyhodnotí situaci a nastaví automaticky počet drátů na vodič.



Obr. 11: Typy vinutí dostupné v RMxpřt. [8]

Druhá záložka s názvem End/Insulation (viz Obr. C5, Příloha C) definuje čela (geometrie čel zobrazena na Obr. 12) a izolaci vinutí. Obsahuje následující položky pro vyplnění:

1. Input half – turn length	<i>délka přívodu</i>	Nezaškrtnuto
a. Half turn length	<i>poloviční délka vinutí</i>	-
(1 je zaškrtnutá)		
b. End extension	<i>přesah vinutí</i>	10 mm
(1 není zaškrtnutá)		
2. Base inner radius	<i>vnitřní poloměr čela vinutí</i>	10 mm
3. Tip inner diameter	<i>vnitřní průměr přechodu čela z horní do spodní vrstvy</i>	5 mm
4. End clearance	<i>vzdálenost mezi dvěma přiléhajícími cívkami v čelech vinutí</i>	5 mm
5. Slot liner	<i>tloušťka vložky pod klín</i>	0,54 mm
6. Wedge thickness	<i>tloušťka klínu</i>	2,56 mm
7. Layer insulation	<i>tloušťka drážkové izolace</i>	0,27 mm
8. Limited fill factor	<i>činitel plnění drážky vodiči</i>	0,73



Obr. 12: Geometrie čel vinutí. [7],[9]

### 2.1.1.5 Šablona Rotor

Geometrické rozměry magnetického obvodu jsou zadávány prostřednictvím šablony Rotor (viz Obr. C6, Příloha C), která obsahuje následující položky:

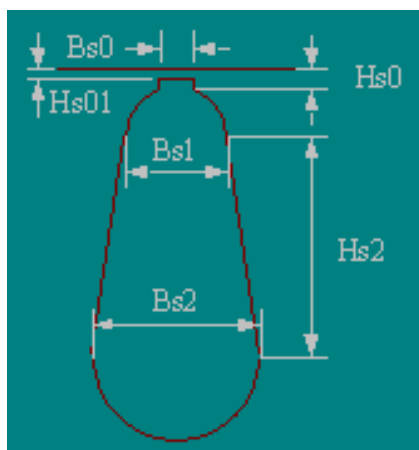
1. Stacking Factor	<i>činitel plnění železa rotoru</i>	0,95
2. Number of Slots	<i>počet drážek rotoru</i>	46
3. Slot Type	<i>typ rotorové drážky</i>	1
4. Outer Diameter	<i>vnější průměr magnetického obvodu rotoru</i>	183,1
5. Inner Diameter	<i>vnitřní průměr magnetického obvodu rotoru</i>	60
6. Length	<i>délka rotoru</i>	128
7. Steel Type	<i>materiál magnetického obvodu rotoru</i>	D21_50
8. Skew Width	<i>natočení drážek rotoru (v počtu drážek)</i>	1
9. Cast Rotor	<i>odlitek rotoru</i>	nezaškrtnuto
10. Half Slot	<i>tvar drážky</i>	nezaškrtnuto
11. Double Cage	<i>dvojitá klec</i>	nezaškrtnuto

Pozn.:

- je-li položka Cast Rotor zaškrtnutá, je rotor vytvořen jako odlitek, v opačném případě je vytvořen přivařením tyčí na kruh dokrátka
- drážka rotoru může být symetrická či nesymetrická. Je-li tato položka (Half slot) zaškrtnutá, jedná se o druhou variantu.
- dvojitá klec je užívána pro zvětšení záběrného momentu a zpravidla se využívá u větších strojů

### 2.1.1.6 Šablona Slot (rotorová drážka)

Rozměry rotorové drážky, která byla vybrána v předchozím bodu, jsou zadávány do šablony Slot. Zvolená drážka 1 je na následujícím obrázku (Obr. 13).



**Obr. 13: Základní rozměry zvoleného typu statorové drážky. [7]**

Rozměry drážky (viz Obr. C7, Příloha C) zadané do RMxprt jsou následovné:

- |    |           |        |
|----|-----------|--------|
| 1. | $H_{s0}$  | 0,4 mm |
| 2. | $H_{s01}$ | 0 mm   |
| 3. | $H_{s2}$  | 28 mm  |
| 4. | $B_{s0}$  | 1,5 mm |
| 5. | $B_{s1}$  | 3,5 mm |
| 6. | $B_{s2}$  | 3,5 mm |

### 2.1.1.7 Šablona Vent (ventilační obvod)

Ventilační obvod je součástí magnetického obvodu rotoru. Jeho rozměry jsou zadávány prostřednictvím šablony Vent. Jednotlivé parametry, které je třeba zadat, jsou následující:

- |    |                       |  |
|----|-----------------------|--|
| 1. | Vent duct             | <i>počet radiálních ventilačních kanálů</i>  |
| 2. | Duct width            | <i>šířka radiálních ventilačních kanálů</i>  |
| 3. | Magnetic spacer width | <i>tloušťka magnetické distanční rozpěrky držící kanály</i>                            |
| 4. | Duct pitch            | <i>rozteč ventilačních otvorů (od středu do středu vedlejších ventilačních kanálů)</i> |
| 5. | Holes per row         | <i>počet axiálních ventilačních otvorů v řadě</i>                                      |
| 6. | Inner hole diameter   | <i>vnitřní průměr ventilačního otvoru</i>  |
| 7. | Outer hole diameter   | <i>vnější průměr ventilačního otvoru</i>   |
| 8. | Inner hole location   | <i>umístění vnitřního ventilačního otvoru</i>  |
| 9. | Outer hole location   | <i>umístění vnějšího ventilačního otvoru</i>   |



Pozn.:

- navrhovaný stroj není vybaven ventilačním obvodem, tudíž jsou všechny hodnoty nulové a nejsou v popisu uvedeny

### 2.1.1.8 Šablona Winding (rotorové vinutí)

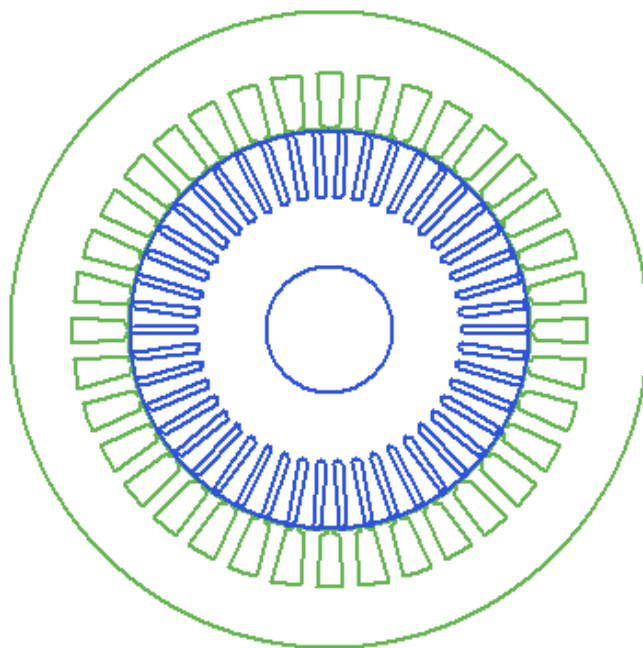
Pro návrh vinutí rotoru slouží šablona Winding (viz Obr. C8, Příloha C). V případě AS s kotvou nakrátko jsou zadávány následující údaje:

1. Bar Conductor Type	<i>materiál tyče</i>	aluminium_EC
2. End Length	<i>přesah tyče přes rotor</i>	0
3. End Ring Width	<i>rozpětí kruhu (v axiálním směru)</i>	14
4. End Ring Height	<i>výška kruhu (v radiálním směru)</i>	33
5. End Ring Conductor Type	<i>materiál kruhu</i>	aluminium_EC

### 2.1.1.9 Šablona Shaft

Šablona Shaft se zabývá návrhem hřídele. Obsahuje pouze jednu položku, která je ovšem velmi důležitá. Jedná se o položku s názvem Magnetic Shaft (viz Obr. C9, Příloha C) Ta určuje, zda bude hřídel magnetická či nemagnetická. Je-li rotor nasazen na hřídel přímo, bude jí procházet část magnetického toku a je tuto položku nutné respektovat (viz kap. Návrh rotoru).

Řez magnetickým obvodem takto navrženým strojem je zobrazen na Obr. 14.



**Obr. 14: Magnetický obvod - návrh statorového a rotorového řezu. [7]**

### 2.1.1.10 Šablona Analysis

Pro posouzení správnosti EMN stroje je nezbytné provést jeho simulaci. Aby bylo možné ji provést, je nezbytné vyplnit šablonu Analysis, jenž obsahuje dvě záložky. První z nich je General (viz Obr. C10, Příloha C), která obsahuje následující položky:

1. Name	<i>název typu analýzy</i>	Setup1
2. Enabled	<i>aktivovaný</i>	zaškrtnuto
3. Operation Type	<i>typ chodu (Motor, Generátor)</i>	Motor
4. Load Type	<i>typ zatížení</i>	Fan Load (ventilátorová charakteristika)
5. Rated Output Power	<i>jmenovitý výkon</i>	13 kW
6. Rated Voltage	<i>jmenovité napětí</i>	400 V
7. Rated Speed	<i>jmenovité otáčky</i>	1450 rpm
8. Operating Temperature	<i>pracovní teplota</i>	115 °C



v předcházejícím případě zadat nelze. Tyto údaje ovlivní výsledné ztrátové koeficienty.<sup>2</sup>

## **2.1.2 Možnosti ladění návrhu a výsledky**

Kromě návrhu stroje a nastavení parametrů jeho simulace projektový manažer obsahuje ještě dvě položky – Optimetrics a Results (výsledky).

Položka Optimetrics umožňuje vytvořit nejlepší návrh mezi všemi možnými variacemi modelu. Například je možné namodelovat hlavní model a následně definovat některé jeho parametry jako proměnlivé (rozměry stroje či materiálové vlastnosti). Existuje několik základních typů analýz, jako je analýza parametrická, optimalizační, citlivostní či statistická.<sup>3</sup>

Je-li dokončena analýza projektu, pomocí záložky Results je možné zobrazit její výsledky. Ty mohou být ve dvou formách – datové a grafické. Datová forma obsahuje shmutí návrhu a vypočtené parametry. Nejdůležitějšími z nich jsou parametry náhradního schématu pro různé stavy (jmenovitý chod, chod naprázdno či nakrátko). Obecně mezi nejpodstatnější grafická vyjádření výsledků patří momentová charakteristika či závislost proudu na rychlosti, které je možné spolu s množstvím dalších zobrazit jako grafický výsledek.

## **2.1.3 Výsledky analýzy asynchronního stroje 13 kW v RMXprt**

Jak již bylo zmíněno výše, modul RMXprt poskytuje výsledné parametry navrženého stroje. Pomocí nich lze posoudit, zda je stroj navržen správně, nebo je-li třeba provést úpravy. Pokud dosavadní návrh není optimální, je možné změny provést pomocí parametrické či optimalizační analýzy. Další variantou je změna konkrétních parametrů, které ovlivňují daný problém.

### **2.1.3.1 Parametry náhradního schématu**

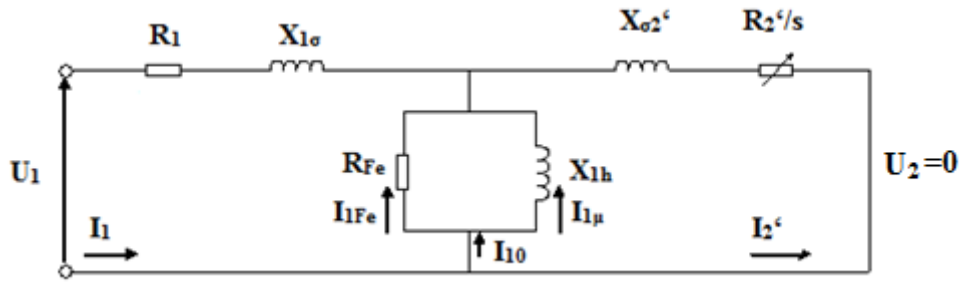
Pro každé elektromechanické či elektromagnetické zařízení lze vytvořit elektrické náhradní schéma, jehož parametry jsou dány napět'ovými rovnicemi. Náhradní

---

<sup>2</sup> vliv tloušťky plechů a velikosti konduktivity číselně popsán v [6]

<sup>3</sup> popis položky a detailní popis jednotlivých typů analýz v nápovědě Maxwell 3D

schéma AS je zobrazeno na Obr. 15 (napětí  $U_2$  je nulové, jelikož je rotor spojen nakrátko).



Obr. 15: Náhradní schéma AS

Z výsledků simulace v RMXprt je možné získat parametry náhradního schématu. Všechny dostupné hodnoty pro typické pracovní oblasti navrženého stroje jsou shrnuty v Tab. 2. Pro chod naprázdno a nakrátko nejsou v RMXprt vypočteny parametry  $R_{Fe}$  a  $X_{1h}$ . Výpočet těchto parametrů je možný jen pro chod naprázdno, v druhém případě není dostupný dostatek parametrů.

Ztráty naprázdno  $P_0$  činí 646 W, účinník  $\cos\varphi$  0,087, proud naprázdno  $I_0$  9,62 A a přiložené napětí  $U_0$  400 V. Proud odporem reprezentujícím ztráty v železe  $I_{Fe}$  je roven součinu proudu naprázdno a účinníku a činí tedy 0,837 A.

Odpor  $R_{Fe}$  vychází ze vztahu pro výkon a je tedy roven:

$$R_{Fe} = \frac{P_0}{3 \cdot I_{Fe}^2} = \frac{646}{3 \cdot 0,837^2} = 307,369 \, \Omega \quad (2.1)$$

Proud hlavní reaktancí je součinem proudu naprázdno a  $\sin$  úhlu  $\varphi_0$ . Jeho velikost je tedy 9,58 A. Velikost reaktance je dána:

$$X_{1h} = \frac{U_i}{I_\mu} = \frac{390,42}{9,58} = 40,754 \, \Omega \quad (2.2)$$

Tab. 2: Parametry náhradního schématu AS vypočtené pomocí modulu RMXprt. [7]

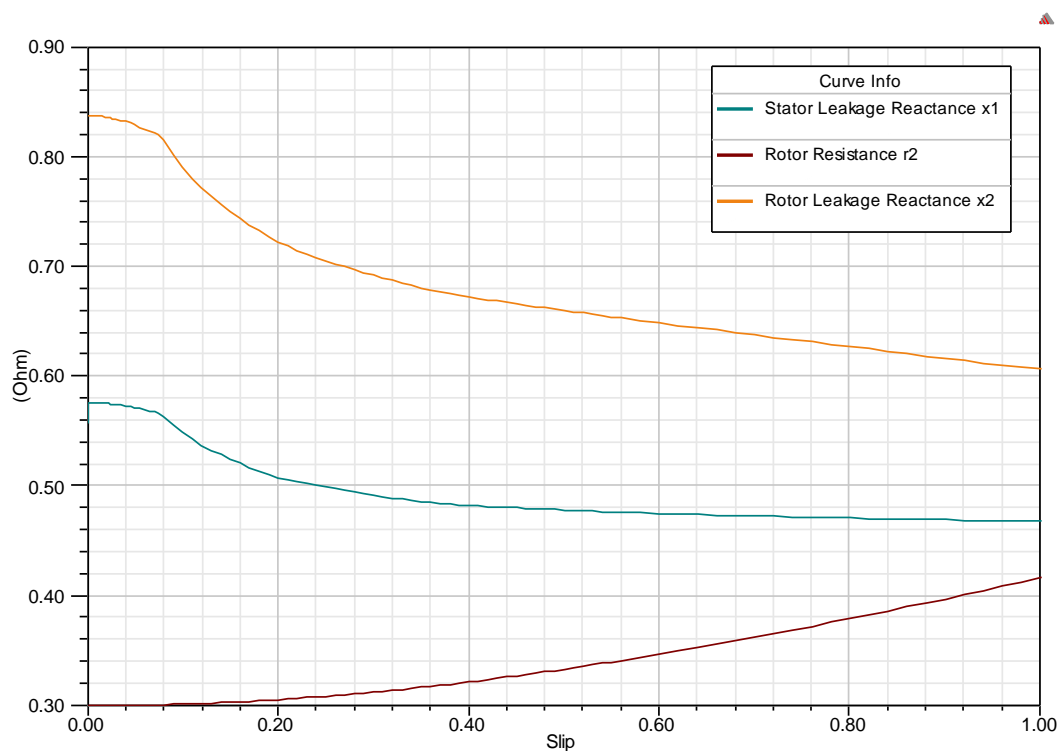
Pracovní oblast	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$X_{1\sigma}$ [ $\Omega$ ]	$R_2$ [ $\Omega$ ]	$X_{2\sigma}$ [ $\Omega$ ]	$R_{Fe}$ [ $\Omega$ ]	$X_{1h}$ [ $\Omega$ ]
Jmenovitý chod	<b>0,416</b>	<b>0,574</b>	<b>0,301</b>	<b>0,834</b>	<b>420,358</b>	<b>23,451</b>
Chod naprázdno	<b>0,416</b>	<b>0,576</b>	<b>0,301</b>	<b>0,837</b>	<b>307,369</b>	<b>40,754</b>
Chod nakrátko	<b>0,416</b>	<b>0,469</b>	<b>0,417</b>	<b>0,606</b>	-	-

V náhradním schématu se odpor a rozptylová reaktance uvádějí přepočtené na stator. Aby bylo možné provést přepočet, je nezbytné znát pro stator i rotor

následující: počet fází ( $m_1$ ,  $m_2$ ), činitele vinutí ( $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$ ) a počet závitů ( $N_1$ ,  $N_2$ ). Koeficient přepočtu impedancí rotoru na stator je počítán prostřednictvím rovnice 1.41 a jeho hodnota je 3697.

Vzhledem k velikosti koeficientu přepočtu a obvyklých hodnot odporu a rozptylové reaktance rotoru po přepočtu, lze předpokládat, že výsledky získané simulací v RMxprt jsou již přepočteny.

Modul RMxprt též umí vykreslit závislost parametrů náhradního schématu na skluzu. Při porovnání Tab. 2 a Obr. 16 je zjevná vzájemná shoda. Zároveň je tímto potvrzena skutečnost, že parametry náhradního schématu nejsou ve všech pracovních oblastech konstantní, což je typickým znakem reálného stroje. To se projeví při konstrukci kruhového diagramu, který se více či méně bude odchylovat od kruhového průběhu.



Obr. 16: Závislost parametrů náhradního schématu na skluzu. [7]

### 2.1.3.2 Ztráty

Pro posouzení správnosti návrhu je důležitá znalost ztrát ve stroji. Obecně se ztráty v asynchronním stroji dělí na ztráty ve statorovém vinutí, ztráty v železe statoru, Jouleovy ztráty v rotoru a ztráty mechanické. Velikost ztrát ovlivňuje množství

tepla, které je nutné ze stroje odvést. Znalost jejich velikosti je tudíž nezbytná pro návrh ventilačního obvodu.

RMxprt podává informace o ztrátách při jmenovitém chodu. Jednotlivé druhy ztrát, které je možné získat jako výsledek simulace v RMxprt, a jejich velikosti jsou zobrazeny v Tab. 3.

**Tab. 3: Ztráty modelu AS 13 kW získané prostřednictvím expertního modulu RMxprt. [7]**

Ztráty při jmenovitém chodu	[W]
Ztráty ve statorovém vinutí	<b>708,7</b>
Ztráty v rotorovém vinutí	<b>388,8</b>
Ztráty v železe	<b>332,2</b>
Ztráty třením a ventilační ztráty	<b>99,4</b>
Ztráty rozptylem	<b>65</b>
Celkové ztráty	<b>1594,1</b>

Je evidentní, že velikost ztrát v modelu stroje je značná. Navržený stroj nemá ventilační obvod, veškeré teplo, které takto vznikne, je odváděno pouze přirozeným prouděním vzduchu v jeho okolí. V tomto případě je vhodné zvážit, zda nenavrhnou stroji ventilační obvod, nebo alespoň zvýšit konvekci vzduchu v okolí stroje pomocí externího ventilátoru.

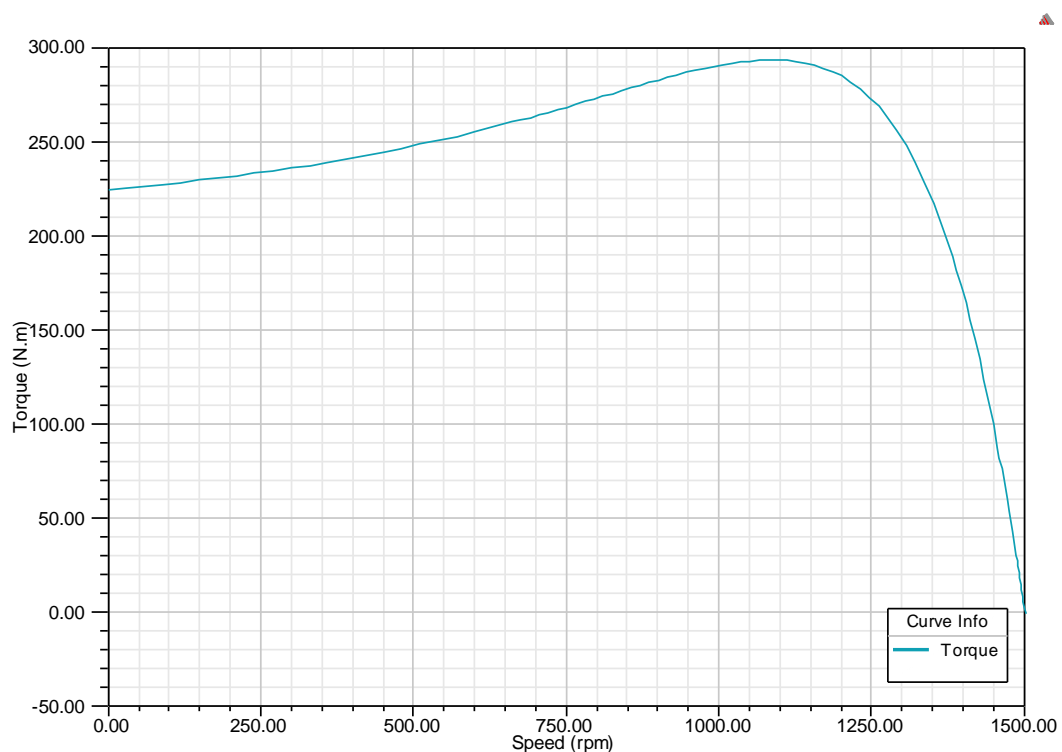
### **2.1.3.3 Typické charakteristiky**

Každé elektrické zařízení je charakterizováno svými charakteristikami. Například u transformátorů to může být časový průběh proudu naprázdno, či průběh účinnosti v závislosti na jeho výkonu. U točivých elektrických strojů jsou v technických dokumentacích zpravidla uváděny následující závislosti.

- Momentová charakteristika

Nejčastěji uváděnou a měřenou charakteristikou je charakteristika momentová. Jedná se o závislost momentu stroje na rychlosti nebo skluzu. Podává informaci o velikosti momentu pro jednotlivé jeho stavy – motor, brzda a generátor. Tato charakteristika je například z hlediska posuzování účinnosti snižování záběrného momentu při rozběhu stroje.

Momentová charakteristika navrženého AS pro motorický chod z výsledků získaných modulem RMxpřt je zobrazena na následujících obrázcích (Obr. 17). Je možné určit například jmenovitý moment tedy moment při jmenovitých otáčkách (1450 ot/min). Odečtením z příslušné charakteristiky je jeho velikost 90 Nm.



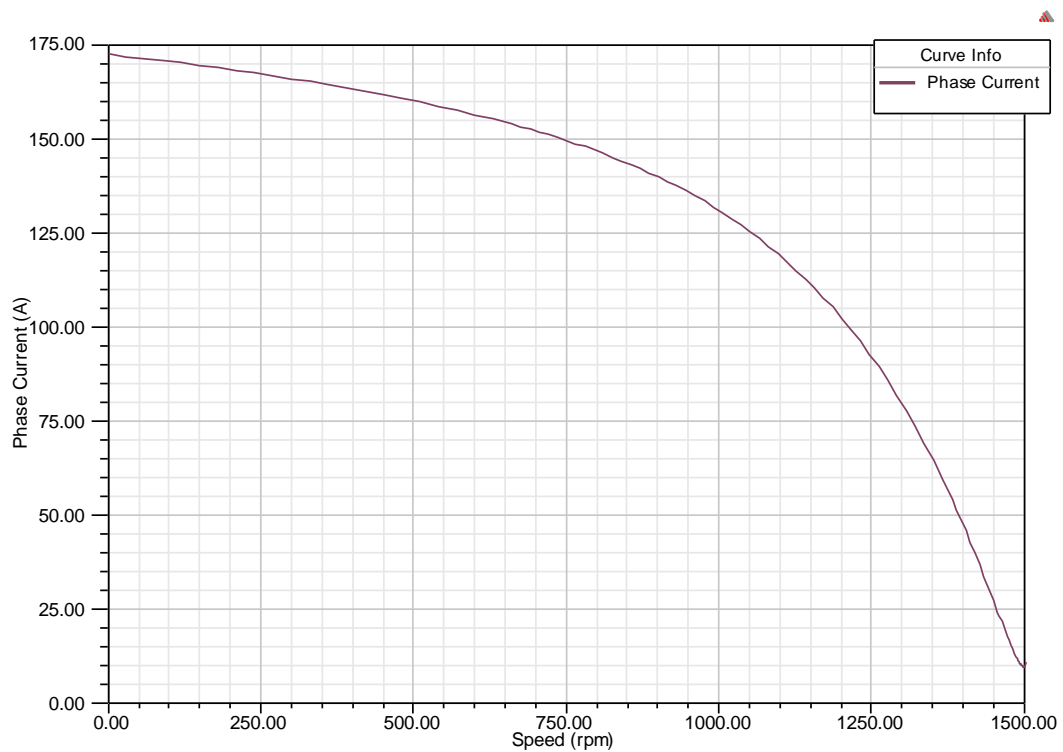
**Obr. 17: Momentová charakteristika AS 13 kW –  $M = f(n)$ . [7]**

- Proudová charakteristika

Druhou důležitou charakteristikou stroje je charakteristika proudová. Stejně jako u momentové je možné vynášet závislost proudu na rychlosti i na skluzu. Vzhledem k této skutečnosti jsou často obě charakteristiky vynášeny do společného grafu.

Ze závislosti zobrazené na Obr. 18, je možné určit, že proud při jmenovitých otáčkách je 25 A. Proud při startu stroje je asi 175 A, což odpovídá předpokladu, že záběrný proud asynchronních strojů může být v rozmezí 4 až 7 násobku proudu jmenovitého. V tomto případě se jedná o malý stroj s poměrně nízkým výkonem, tudíž ani záběrný proud není extrémní, přesto by mohl způsobit nepřipustný úbytek napětí v síti. Bylo by vhodné přistoupit k jiným technikám spouštění, než je přímé připojení na síť (přepínání hvězda-trojúhelník, vřazení rotorového odporu, frekvenční spouštění apod.).

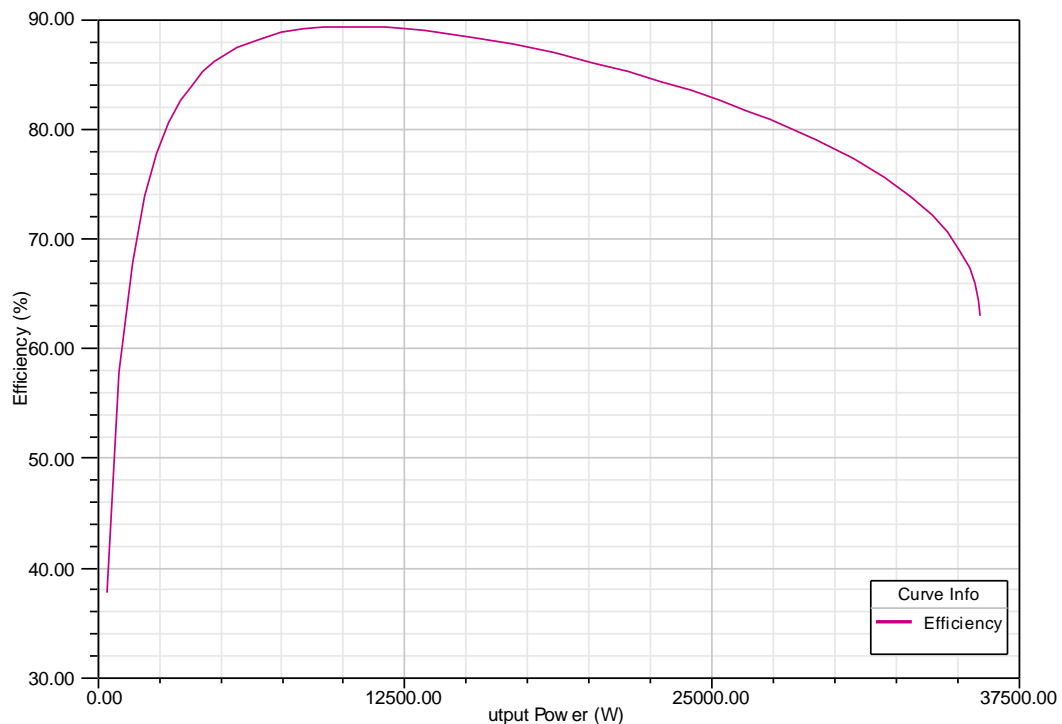




**Obr. 18: Proudová charakteristika AS 13 kW –  $I = f(n)$ . [7]**

- Závislost účinnosti na výstupním výkonu

Další důležitou charakteristikou je závislost účinnosti na výstupním výkonu (Obr. 19). Prakticky u každého stroje nejvyšší účinnost nedosahuje při jmenovitém výkonu nýbrž při výkonu nižším. Závislost pro navržený 13kW motor je na následujícím obrázku. Nejvyšší účinnosti, která činí 89,5 %, dosahuje při výkonu 12,5 kW. Při jmenovitém výkonu dochází k malému poklesu účinnosti na 88 %.

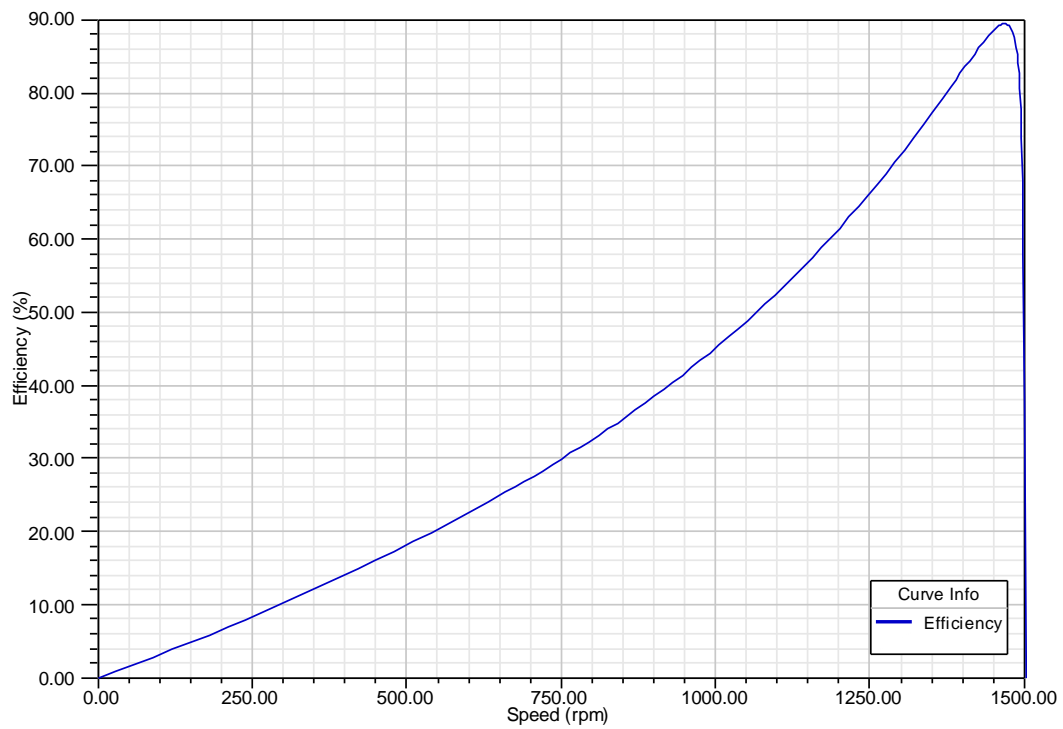


**Obr. 19: Závislost účinnosti na výstupním výkonu –  $\eta = f(P)$ . [7]**

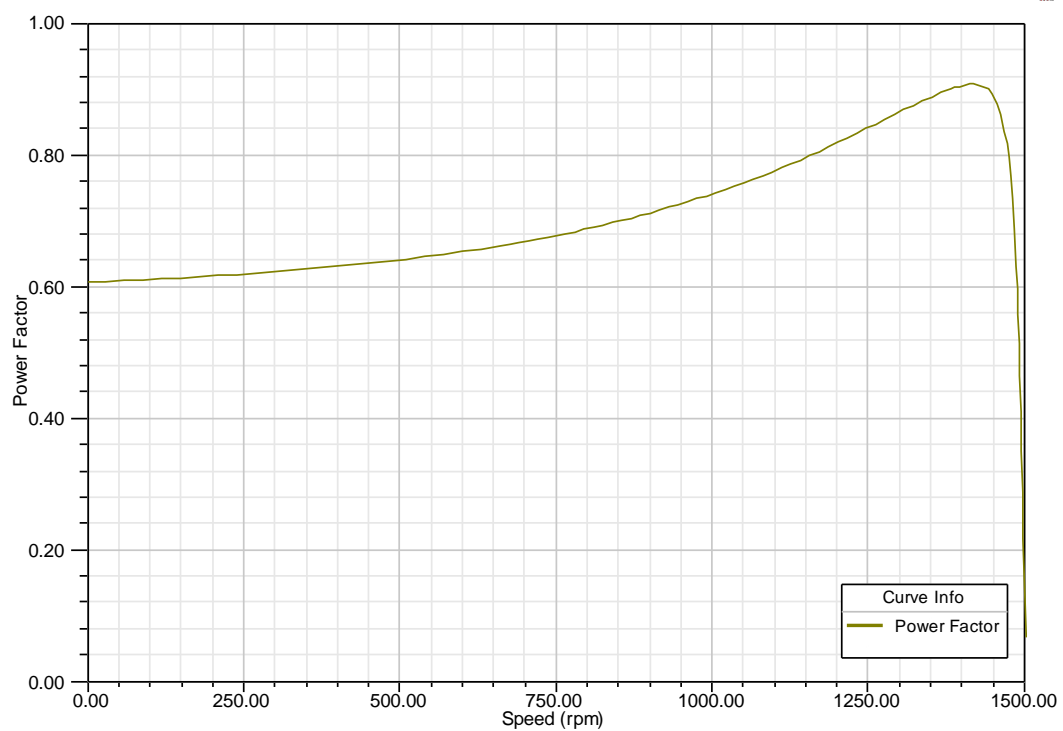
- Další charakteristiky

Dalšími podstatnými závislostmi jsou například závislost účinnosti na rychlosti (Obr. 20), či závislost účinnosti na rychlosti (Obr. 21). Tyto charakteristiky podávají informaci o tom, v jakém stavu je stroj nevhodnější provozovat. Standardní požadavek na provoz stroje je při maximální účinnosti přeměny energie. Pro AS je navíc požadován co nejvyšší účinník (tzn. účinník co nejbližší 1).

Podle Obr. 20 je evidentní, že navržený stroj má nejvyšší účinnost při otáčkách o něco málo vyšších než jsou otáčky jmenovité a činí 89,5 % (stejně jako v případě závislosti účinnosti na výkonu). Z příslušného obrázku je zjevné, že nejvyšší účinník je asi 0,91 přibližně při otáčkách 1425 ot/min.



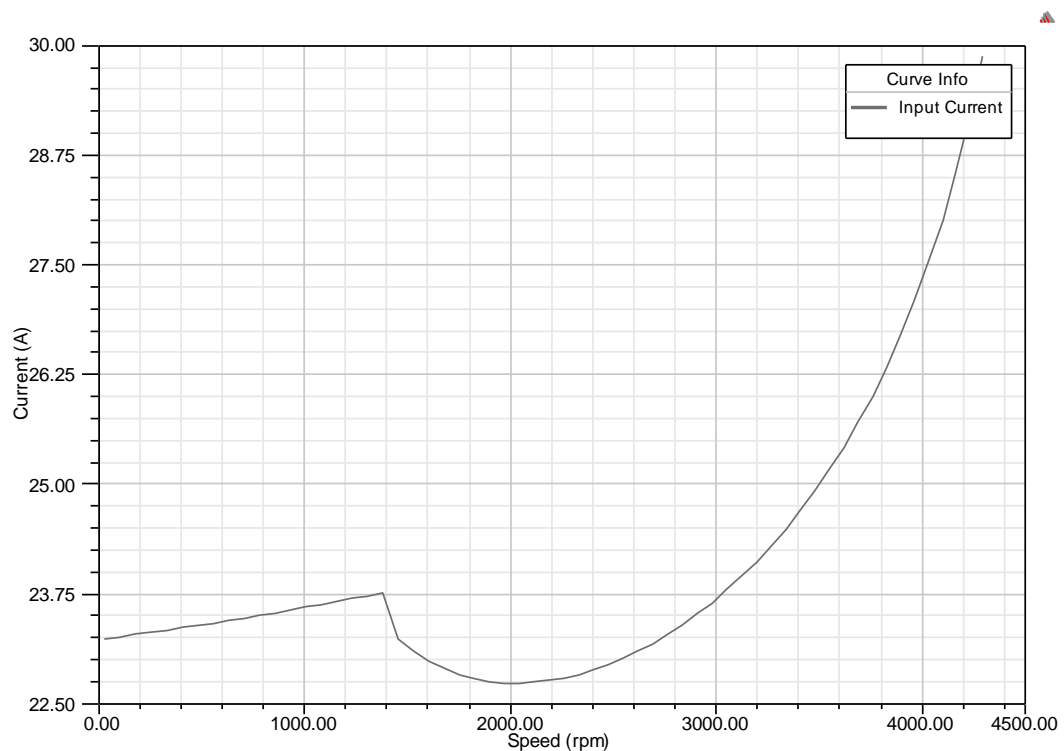
Obr. 20: Závislost účinnosti na otáčkách –  $\eta = f(n)$ . [7]



Obr. 21: Závislost účiníku na otáčkách –  $\cos\varphi = f(n)$ . [7]

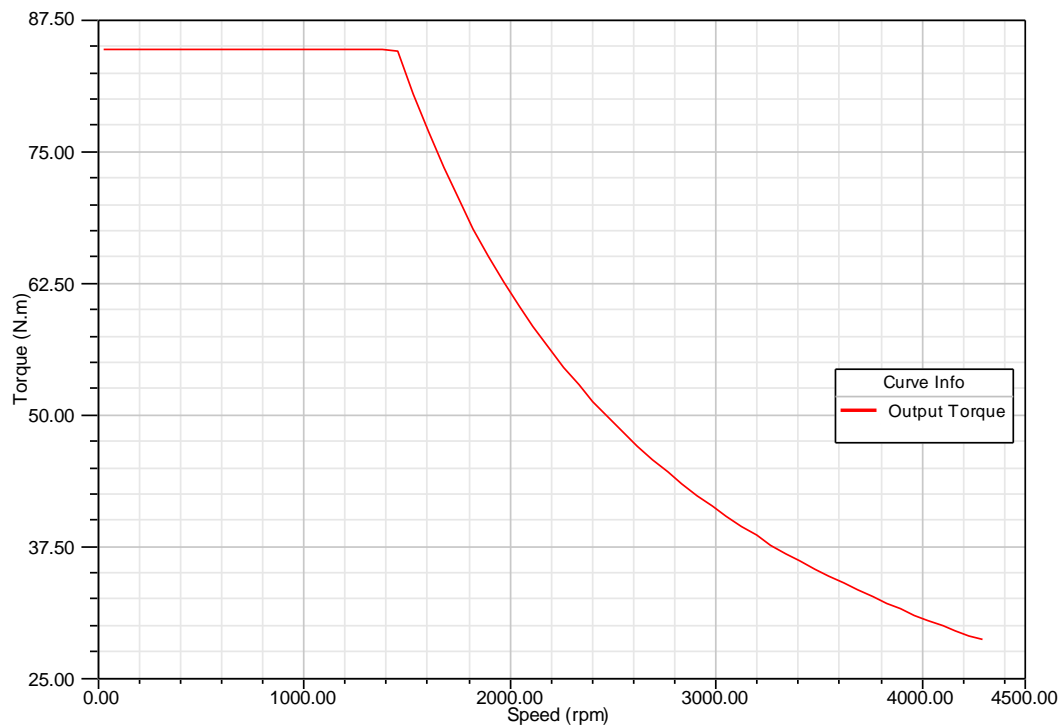
- Zeslabení pole

V některých aplikacích, jako je například trakce, je třeba zvyšovat rychlost a udržovat konstantní výkon. K tomu je možné použít zeslabení pole ([10]). RMXprt poskytuje informace o základních elektrických veličinách stroje. Průběh proudu při tomto druhu řízení je na Obr. 22. Proud roste přibližně do dosažení jmenovitých otáček, následně dojde k jeho poklesu. Přibližně při 2000 ot/min začne narůstat (křivka odpovídá parabolě).



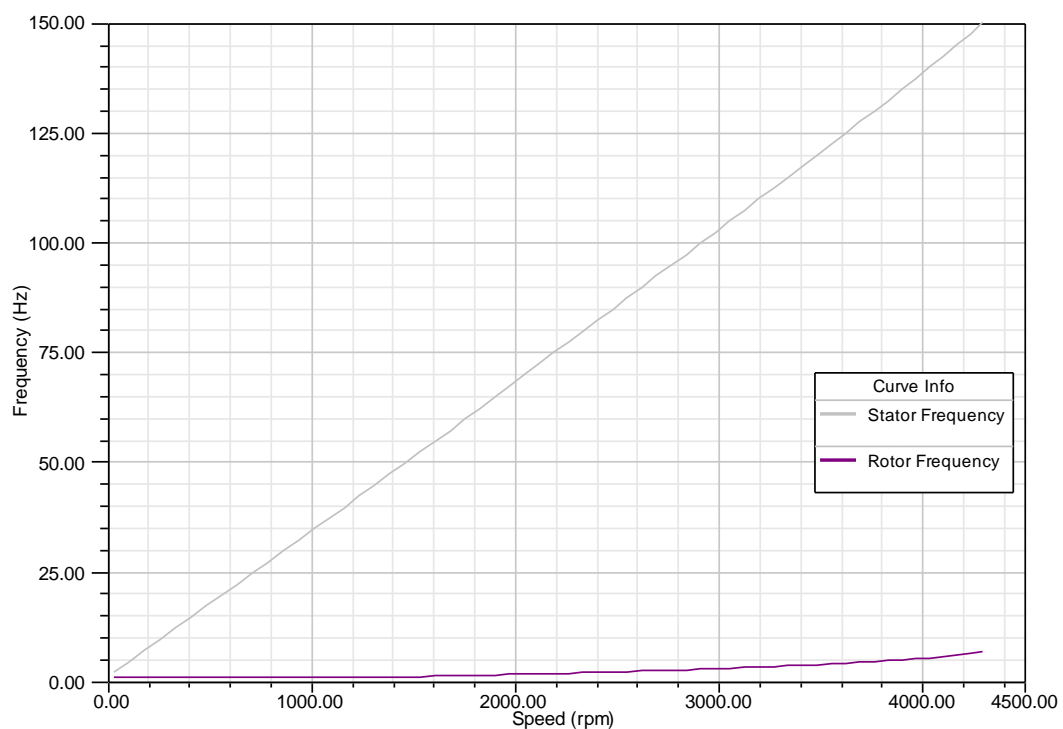
**Obr. 22: Proud při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7]**

Moment je naopak konstantní, dokud není dosaženo jmenovitých otáček a následně klesá (viz Obr. 23).



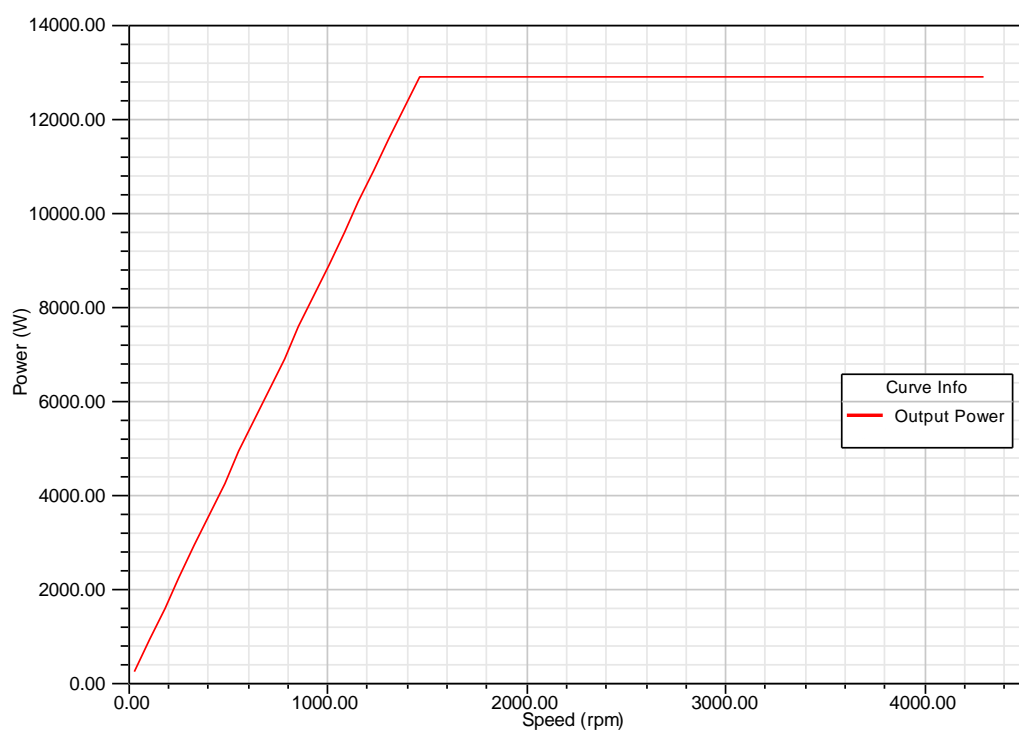
**Obr. 23: Moment při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7]**

Frekvence statoru v celém průběhu lineárně roste, jak je vidět na Obr. 24 a 50 Hz dosahuje při jmenovitých otáčkách. Rotorová frekvence se nemění lineárně a roste pomaleji.



**Obr. 24: Frekvence při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7]**

Výstupní výkon roste lineárně, dokud není dosaženo jmenovitých otáček. Následně je udržován na své jmenovité hodnotě (Obr. 25).



**Obr. 25: Výstupní výkon při řízení rychlosti zeslabováním pole. [7]**

## **3 Stavba 3D a 2D modelu pro simulaci metodou konečných prvků**

RMxprt poskytuje základní představu o správnosti navrženého stroje. Jak již bylo zmíněno výše, lze získat informace o parametrech náhradního schématu, ztrátách a dále například o hmotnosti stroje, velikosti magnetické indukce v zubech statoru, jhu statoru a rotoru a další. Dále umožňuje zobrazení nejdůležitějších charakteristik stroje. Není ovšem možné získat přehled například o rozložení magnetického pole ve stroji (př. velikost magnetického pole a směr siločar). K tomu slouží simulace 2D či 3D modelu v Maxwell 3D.

### **3.1 Možnosti tvorby 3D a 2D modelu**

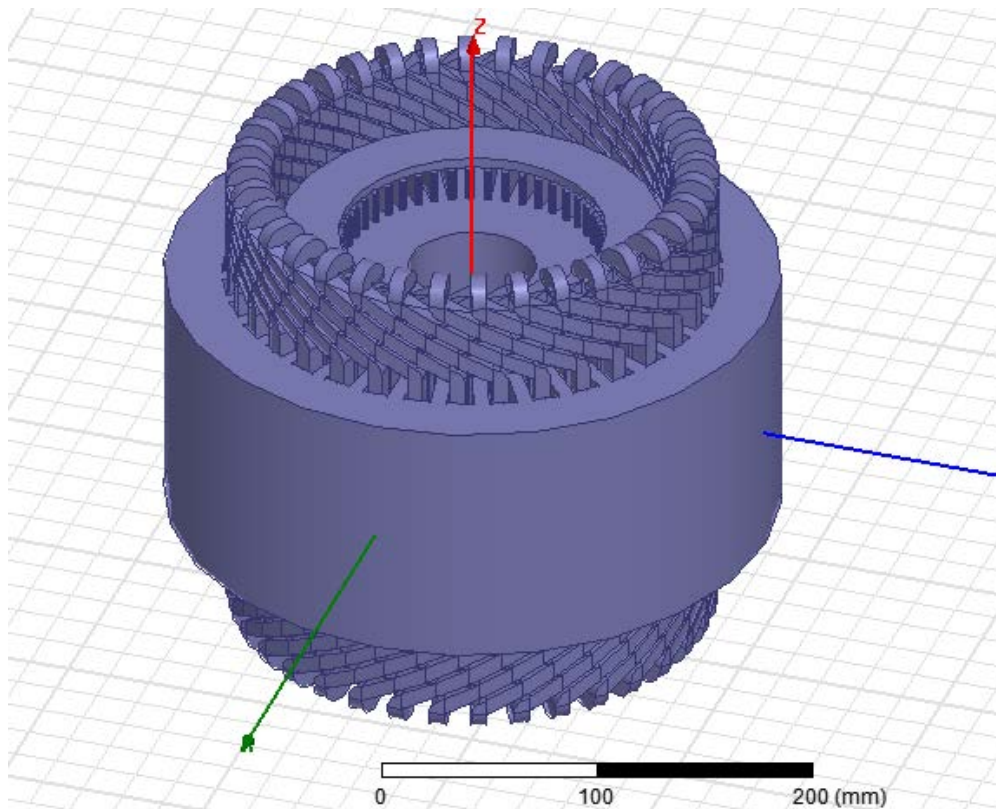
2D či 3D model je možné vytvořit několika způsoby. Systém umožňuje import modelu v některém z přenositelných CAD formátů, např. IGES (Initial Graphics Exchange Specification) či SAT (Standard ASCII Text).

V úvodu předcházející kapitoly již bylo zmíněno, že programové prostředí ANSYS Maxwell 3D je vybaveno grafickým editorem, v němž je možné pomocí známých geometrických tvarů nakreslit model stroje. To je ovšem prakticky možné pouze pro jednoduchá zařízení, jako je například tlumivka či malý transformátor.

Pro složitější zařízení, jako jsou točivé stroje, ale i některé transformátory či lineární motory, je vhodnější využít předdefinovaných tvarů (User Defined Primitives). Ty obsahují základní součásti prakticky všech známých a využívaných elektromechanických případně i elektromagnetických zařízení. Seznam se skládá ze dvou skupin. První skupina je označena Core, tedy jádro, a slouží pro vytvoření statorových a rotorových magnetických obvodů (z některých položek lze vytvořit stator i rotor jen pomocí definování vnitřního a vnějšího průměru jádra). Druhou skupinu tvoří položky označené Coil. Jedná se různé druhy vinutí. Mezi ně patří například i SquirrelCage, což je klec nakrátko.

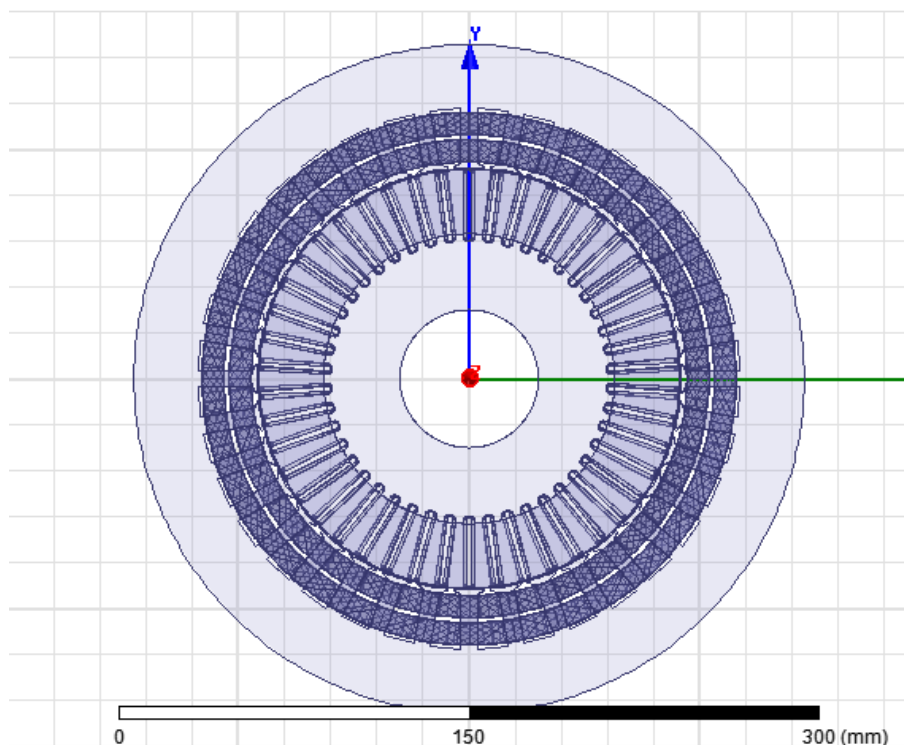
Návrh AS prostřednictvím User Defined Primitives, není předmětem této práce, ale pro názornost vypadá následovně. Jako první se zvolí vhodné tvary modelu. Pro magnetický obvod statoru a rotoru navrhovaného AS je vhodným tvarem

SlotCore. Jak již bylo uvedeno, rotor či stator se definují pomocí průměrů. U statoru platí, že průměr u vzduchové mezery musí být menší než průměr u jha. Pro rotor je podmínka opačná. Statorovému vinutí odpovídá tvar LapCoil (vinutí, které je překládáno v čelech). Jelikož se jedná o AS s kotvou nakrátko, tvarem pro vinutí rotoru je SquirrelCage. Využitím parametrů uvedených v kapitole o návrhu v RMXprt vznikne model, který je ve 3D provedení zobrazen na Obr. 26, případně ve 2D provedení na Obr. 27.



**Obr. 26: 3D model 13 kW AS navrženy pomocí User Defined Primitives. [9]**





**Obr. 27: 2D model vytvořený pomocí User Defined Primitives v programovém prostředí ANSYS Maxwell 3D – příčný řez. [9]**

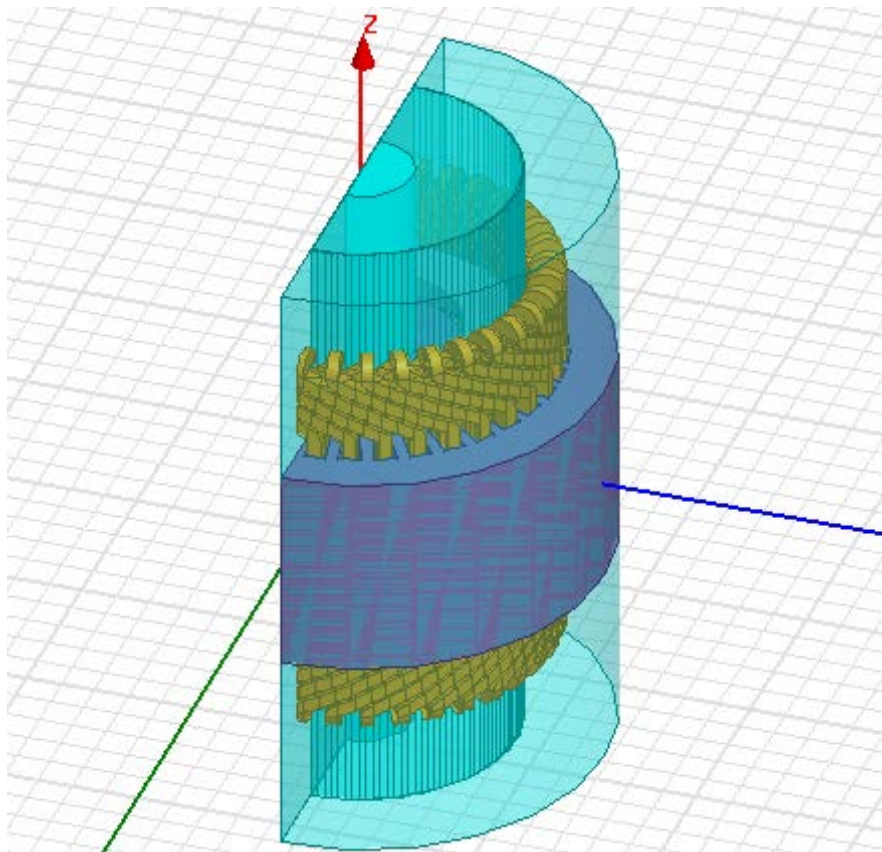
Všechny tvary jsou popsány stejnými parametry, jako při vytváření modelu v RMXprt. Liší se pouze několik z nich, které pro RMXprt nejsou definovány a generují se při exportu projektu do designu v Maxwellu. Zároveň je u AS s kotvou nakrátko třeba dbát na to, že rozměry rotorových drážek jsou stejné jako rozměry tyčí, tudíž je třeba při návrhu pomocí User Defined Primitives na tuto skutečnost dbát (RMXprt generuje tvar a rozměry tyče podle drážky).

Aby u takto vytvořeného modelu bylo možné provést simulaci, je třeba provést definici okrajových podmínek EMP a buzení stroje.

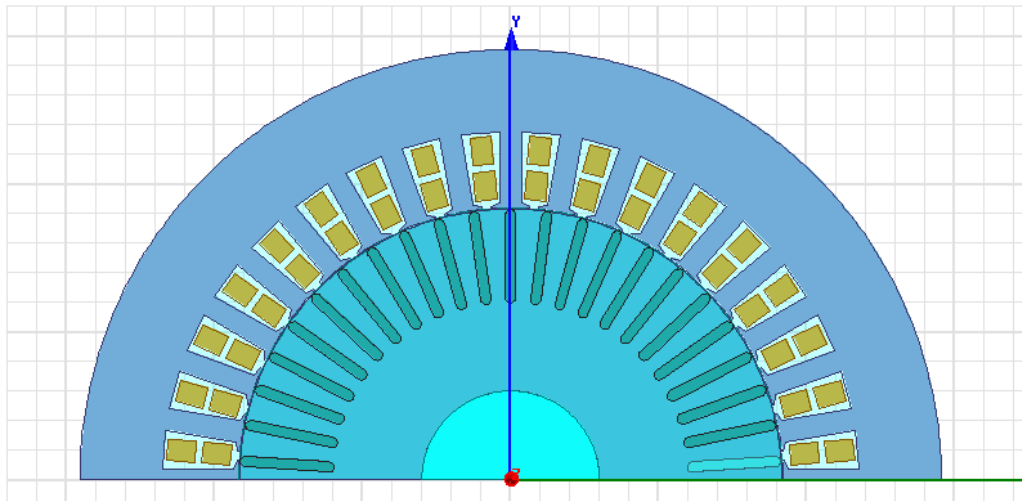
Jinou možností je vytvořit model z již vytvořeného projektu v RMXprt. Využitím této možnosti se do vytvořeného modelu přenesou jak přesná geometrie stroje, tak i jeho hranice, či definice podřízenosti jednotlivých součástí. Právě uvedený způsob je využit pro účely této diplomové práce.

## 3.2 2D a 3D model vytvořený prostřednictvím RMxpřt

Samotný RMxpřt nedokáže simulovat jednotlivé stavy stroje, proto nestačí hodnotit stroj pouze dle výsledků, které získáme analýzou v modulu. Je tudíž nezbytné vytvořit 2D či 3D model. To lze provést transportováním již definovaného modelu v RMxpřt. Exportovat 2D či 3D design je ovšem možné pouze po provedení simulace následovně: záložka RMxpřt -> Analysis Setup -> Create Maxwell Design. Vzniklý 3D model je zobrazen na Obr. 28 a 2D model na Obr. 29.

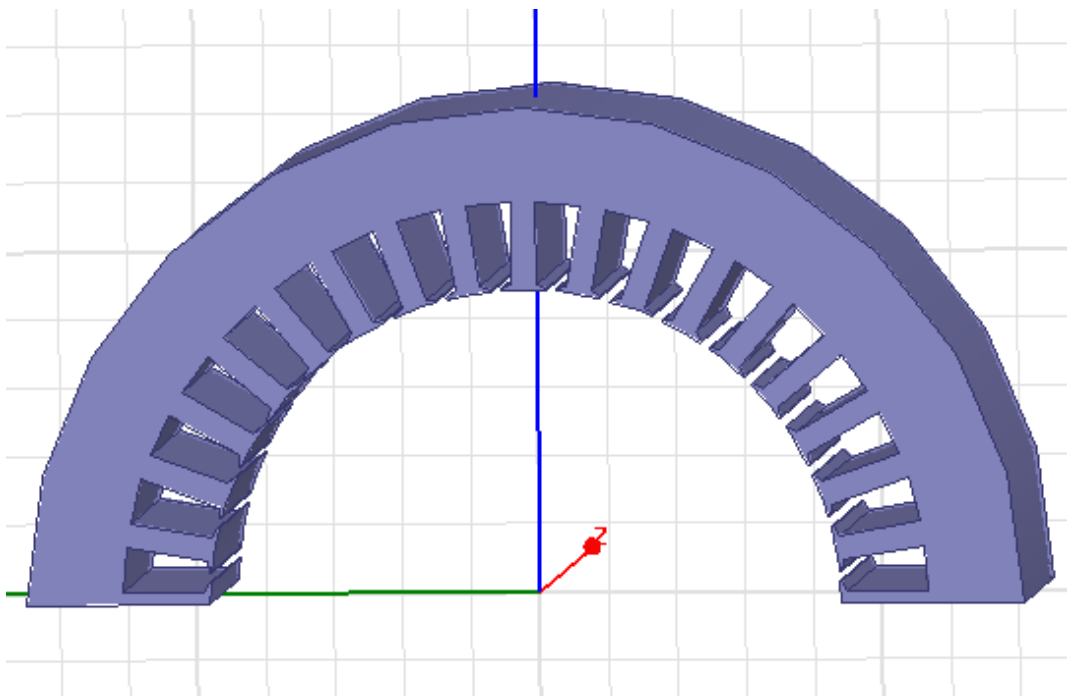


Obr. 28: Poloviční 3D model vyexportovaný z expertního modulu RMxpřt. [9]



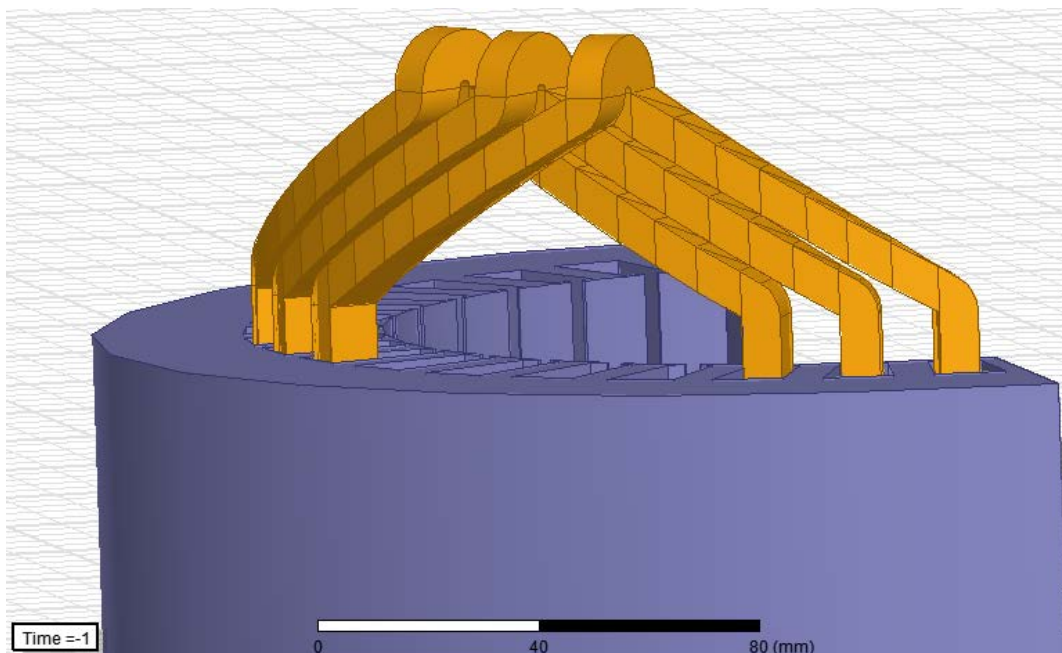
**Obr. 29: Poloviční 2D model vyexportovaný z expertního modulu RMxpřt. [9]**

Detailnější pohled na stator navrženého AS poskytuje Obr. 30.



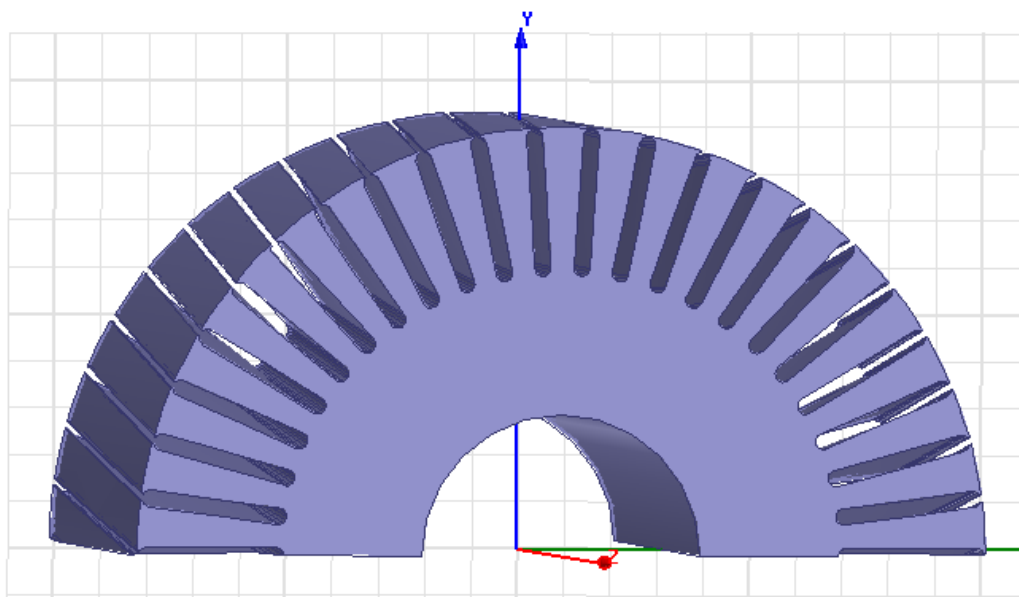
**Obr. 30: Magnetický obvod statoru AS v polovičním řezu. [9]**

Pro návrh stroje jsou důležitá čela vinutí. Na Obr. 31 je jejich detail.



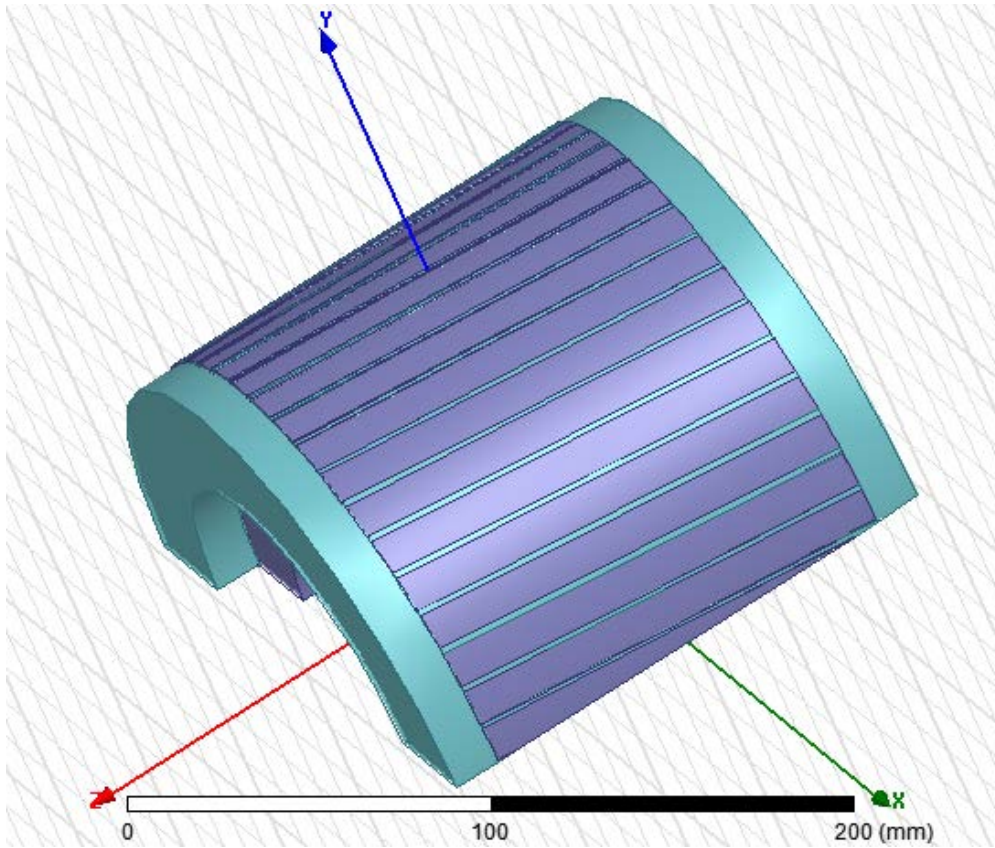
**Obr. 31: Detailní pohled na čela vinutí statoru. [9]**

Na Obr. 32 je magnetický obvod rotoru v polovičním řezu.



**Obr. 32: Magnetický obvod rotoru AS v polovičním řezu. [9]**

Aby nebylo pochyb o tom, že na rotoru bylo provedeno natočení drážek, Obr. 33 poskytuje pohled na magnetický obvod rotoru a jeho vinutí dohromady. Natočení drážek je zcela zjevné.



**Obr. 33: Natočení drážek na rotoru AS. [9]**

## 4 Simulace chování stroje v ustálených a přechodných stavech

Každý model v ANSYS Maxwell 3D musí mít přiřazený typ analýzy, ve které bude následně řešen. Po exportování modelu z RMXprt jsou všechny designy primárně nastaveny do řešiče Transient pro magnetické pole.

### 4.1 Typy simulací

Obecně lze vytvořené modely řešit v následujících stavech, které programové prostředí ANSYS Maxwell 3D umí simulovat:

- Magnetické pole
  - statické pole (Magnetostatic),
  - přechodný stav (Transient),
  - vířivé proudy (Eddy Current)
- Elektrické pole
  - statické pole - (Electrostatic),
  - přechodný stav (Electric Transient),
  - DC vedení (DC Conduction)

Všechny výše uvedené typy simulací jsou důležité pro posouzení správnosti návrhu stroje. Typ analýzy se vybírá na základě zkoumaného stavu a požadovaných výsledků.

#### 4.1.1 Magnetické pole

Simulace ustáleného chodu stroje se v Maxwell 3D nazývá magnetostatic a počítá statická magnetická pole. Primárně je počítána intenzita magnetického pole, z níž jsou následně počítány magnetická indukce a proudová hustota. Odvozené parametry jako jsou síly, momenty, energie a indukčnosti jsou vypočítány právě z těchto základních veličin. [11]

Základním výsledkem analýzy statického magnetického pole jsou tři veličiny – moment, síla a matice indukčností. Dále například mapa magnetického pole ve sledovaném zařízení. [11]

Informace o přechodném ději (spuštění stroje, vypnutí, porucha) jsou výsledkem simulace typu Transient (neboli řešení přechodných stavů). Právě do této analýzy se primárně nastaví exportovaný projekt z RMXprt. Změnu na jiný typ lze provést snadno, přímo v projektovém manažeru.

Existuje několik druhů přechodných dějů, které mohou ve stroji probíhat. Prvními jsou elektromagnetické přechodné děje. Při těchto dějích se ve stroji mění elektrické a magnetické veličiny. Tyto děje trvají řádově desítky až stovky milisekund. ([12]) Právě ty jsou předmětem zkoumání fungování stroje prostřednictvím Maxwell 3D.

Elektromechanické přechodné děje<sup>4</sup>, při nichž se ve stroji mění elektromagnetický moment a úhlová rychlost, odezní během stovek milisekund až desítek sekund. Významným přechodným dějem v elektrických strojích či elektrických pohonech je přechodný děj tepelný. Při něm se mění oteplení vinutí a magnetického obvodu. U běžných motorů dojde do ustáleného stavu během desítek sekund až desítek minut.

Při transientní analýze jsou výsledná magnetická pole (též elektrická – simulace pro obě pole stejná, pouze dochází ke změně vypočítaných magnetických veličin na odpovídající veličiny elektrické) počítána v časové oblasti. V tomto případě jsou primárně počítány intenzita magnetického pole a hustota proudu. Magnetická indukce je stejně jako u simulace Magnetostatic přepočítávána z intenzity magnetického pole. Z nich jsou dále počítány momenty, síly, ztráty v jádře a další. [11]

Výsledkem analýzy přechodných dějů jsou časové závislosti veličin stroje, jako je moment, proud, indukované napětí a další. Dále lze zobrazit rozložení magnetického pole ve stroji během jeho průběhu (kromě jednotlivých obrázků pro daný čas, umí programové prostředí vytvořit i animaci) a dalších veličin, které se mění s otáčením rotoru stroje. Mapy magnetického pole pomáhají nalézt případné problémy s nepřiměřeným nasycením zubů, přehříváním stroje při rozběhu apod.

---

<sup>4</sup> Více o elektromechanických přechodných dějích v pohonech v [12]

Simulace vířivých proudů počítá ustálený stav, časově proměnná magnetická pole pro danou frekvenci, jedná se tedy o řešení ve frekvenční oblasti. Nejprve jsou vypočteny intenzita magnetického pole a skalární magnetický potenciál. Z intenzity magnetického pole je stejně jako v předcházejících případech vypočítána magnetická indukce a hustota proudu, z nichž vychází výpočet sil, momentů, energie a indukčností. [11]

### **4.1.2 Elektrické pole**

Elektrostatická simulace řeší elektrické pole (stejnoseměrný proud). Základní počítanou veličinou je skalární elektrický potenciál, z něhož se počítá intenzita elektrického pole a elektrická proudová hustota. Z těchto veličin jsou dále počítány síly, toky, energie a kapacitní reaktance. [11]

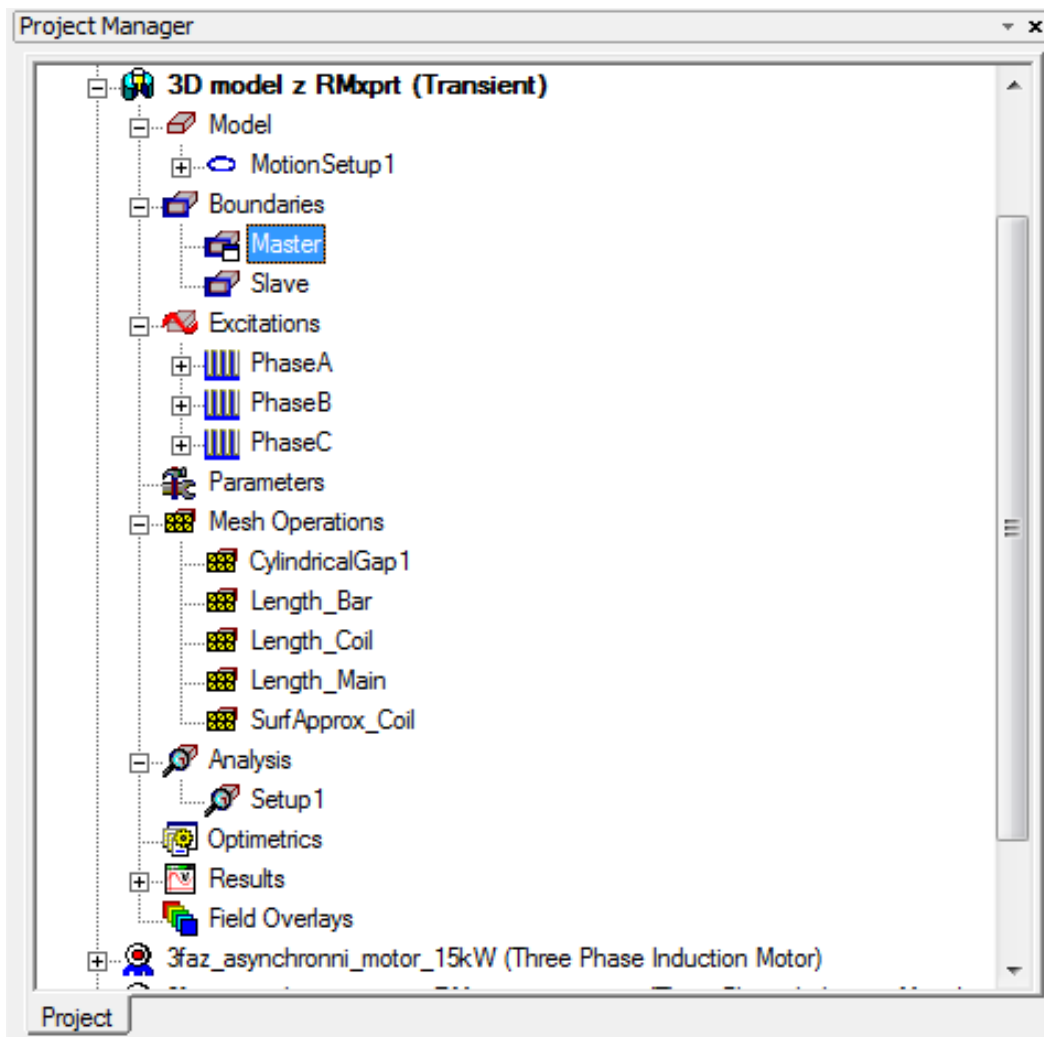
Simulace DC vedení počítá statické proudy ve vodičích. Stejně jako v případě elektrostatické simulace je primárně vypočítán skalární elektrický potenciál a dále je z něj získána proudová hustota a intenzita elektrického pole. Veškerá pole mimo vodič nejsou počítána. Může být spojena s elektrostatickou simulací. Lze to provést tehdy, jsou-li elektrické potenciály ve vodičích využity jako okrajová podmínka napětí pro řešení elektrického pole v izolátorech v elektrostatické simulaci. [11]

Podrobnější postup simulací stroje a jeho výsledků v ustálených a přechodných stavech je předmětem následující kapitoly.

## **4.2 Parametry pro nastavení simulace**

Aby bylo možné provést simulaci zvoleného stavu, je třeba nastavit množství parametrů. Projektový manažer se zobrazením všech potřebných položek pro nastavení je zobrazen na Obr. 34.





Obr. 34: Projektový manažer 3D designu. [9]

- *Model* - Prvním parametrem, který je třeba nastavit je MotionSetup. Jedná se o nastavení typu pohybu – rotační, translační. Dále je třeba nastavit výchozí pozici stroje, rychlost a směr otáčení (posunu).
- *Boundaries* (okrajové podmínky) – Pro řešení EMP je nezbytné znát okrajové podmínky. Ty jsou nastaveny v záložce Boundaries. Jedná se o následující typy:
  - Vector Potential – nastavení intenzity magnetického pole na zvolené hraně konstantní
  - Master a Slave – okrajové podmínky definující návaznost EMP pro symetrické modely, jejichž modely jsou například v polovičním řezu.
- *Excitations* (buzení) – v záložce buzení se definují jednotlivé fáze a těm se následně přiřazují jednotlivé vodiče. Objekt CoilTerminal přiřazuje počet

vodičů, jež vyplňují průřez, a zároveň i směr buzení. Následně je možné nastavit buzení jednotlivých fází. To lze realizovat třemi základními způsoby – buzení proudem, napětím nebo z externího obvodu. Pro poslední možnost obsahuje ANSYS Maxwell editor pro kreslení elektrických obvodů. Kromě toho je třeba zvolit, zda bude vodič plný (solid) nebo slaněný (stranded).

Pro každý točivý stroj je třeba znát počet paralelních větví. Pro design v Maxwell 3D je nastaven právě v položce Excitation Winding.

- *Parameters* – jedná se o položku, jejímž prostřednictvím se nastavuje výpočet síly či točivého momentu.
- *Mesh Operation* (síťování) – aby bylo možné provést simulaci, je nutné vhodně nastavit síťování zkoumaného objektu. Je-li projekt exportován z RMXprt, síť se nastaví automaticky. Jednotlivé prvky sítě nemusí vyhovovat, je proto možné nastavit jejich délku ručně.
- *Analysis* (nastavení parametrů simulace) – tato záložka slouží k nastavení dané simulace. Konkrétní parametry závisí na typu zvoleného řešiče, ale standardně se zde nastavuje čas počátku a konce simulace, její krok, tedy po jak dlouhém časovém okamžiku se provádí výpočty.
- *Optimetrics* (optimalizace) – tato položka je shodná se stejnojmennou položkou popsanou v kapitole o návrhu stroje v RMXprt.
- *Results* (výsledky) – prostřednictvím této položky je možné zobrazit grafické výstupy simulace, jako jsou moment, proudy v jednotlivých vinutích, indukovaná napětí apod. Všechny tyto veličiny jsou zobrazovány v závislosti na čase.
- *Field Overlays* – jedná se o položku, díky které lze zobrazit mapu pole dle volby (např. magnetická indukce, intenzita magnetického pole, oteplení stroje apod.). Pole je možné zobrazit v čase, ve kterém byla simulace provedena. Díky tomu, že pro každý čas existuje jeho záznam, je možné vytvořit i animaci změn zvoleného pole v jednotlivých okamžicích.

## 4.3 Simulace stroje

Simulace chování stroje v ustáleném stavu a při přechodných dějích podává informace o chování stroje prostřednictvím časového průběhu veličin ve

zkoumaném stroji. Ty lze považovat za oscilogramy, které by byly sejmuty z osciloskopu při měření reálného stroje. Kromě nich lze ještě získat mapy magnetického či elektrického pole (v závislosti na zvolené simulaci), které jsou důležité, ale analytickým výpočtem je možné je získat jen velmi obtížně.

Cílem této kapitoly je popis výsledků simulace v řešiči Transient. Simulovaný přechodný děj nastává při připojení stroje k síti. V tomto okamžiku dochází k prudkým změnám momentu, proudů a rychlosti. V okamžiku, kdy se tyto veličiny ustálí, stroj přechází do ustáleného stavu, který je též předmětem zkoumání této kapitoly.

Simulace 2D modelu je provedena pro připnutí zatěžovaného stroje napájeného sdruženým sinusovým napětím 400 V ze sítě. Veličiny jsou zaznamenávány po 0,5 ms.

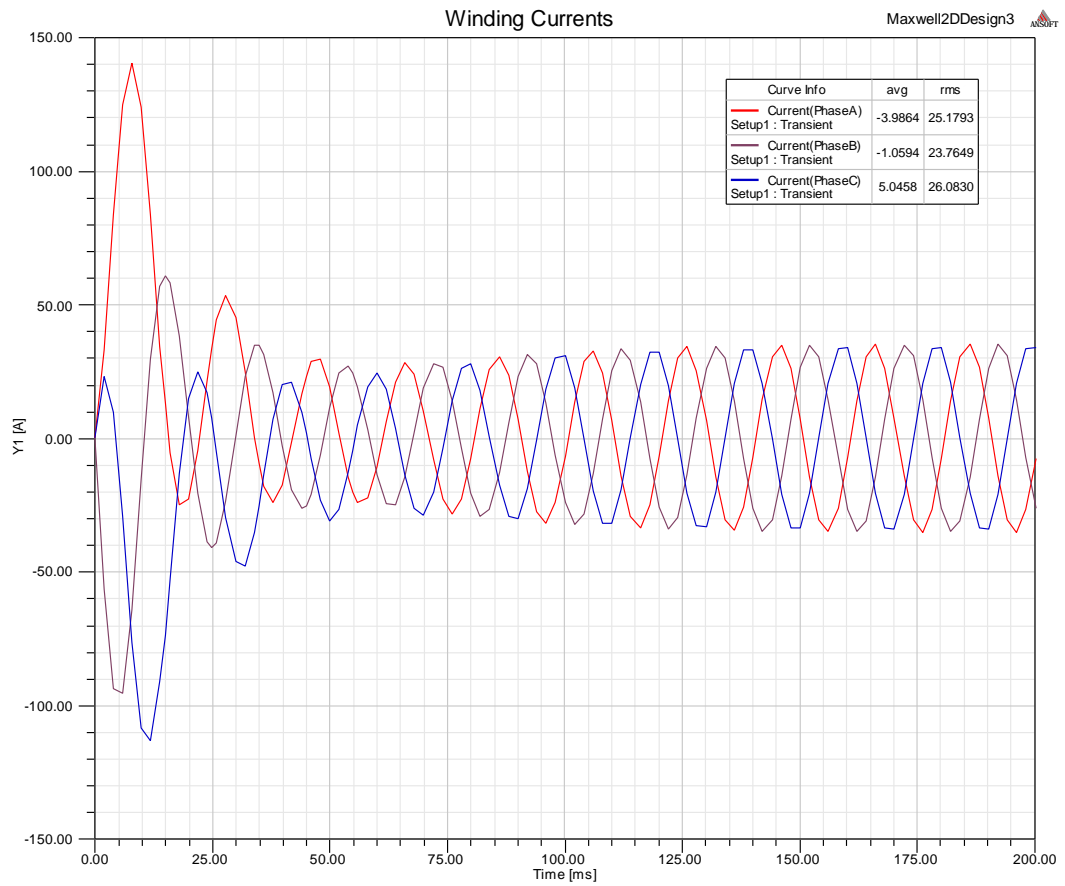
### **4.3.1 Indukované napětí a spřažený magnetický tok**

Jednou z veličin, která se při rozběhu stroje mění, je indukované napětí. Při rozběhu stroje jsou díky točivému magnetickému poli statoru v rotoru indukovány proudy a napětí. Vzájemnou reakcí pole statoru a indukovaného napětí vzniká moment, který začne otáčet rotorem (působí proti příčině svého vzniku). S roztáčením se mění toto napětí statoru i rotoru. S indukovaným napětím souvisí spřažený magnetický tok. Ten je dán časovou změnou napětí ( $-dU_i/dt$ ). Oba průběhy jsou vzájemně posunuté o  $90^\circ$ . Jejich časový průběh a vzájemný vztah pro 2D model je zobrazen v Obr. E1.

### **4.3.2 Odebíraný proud**

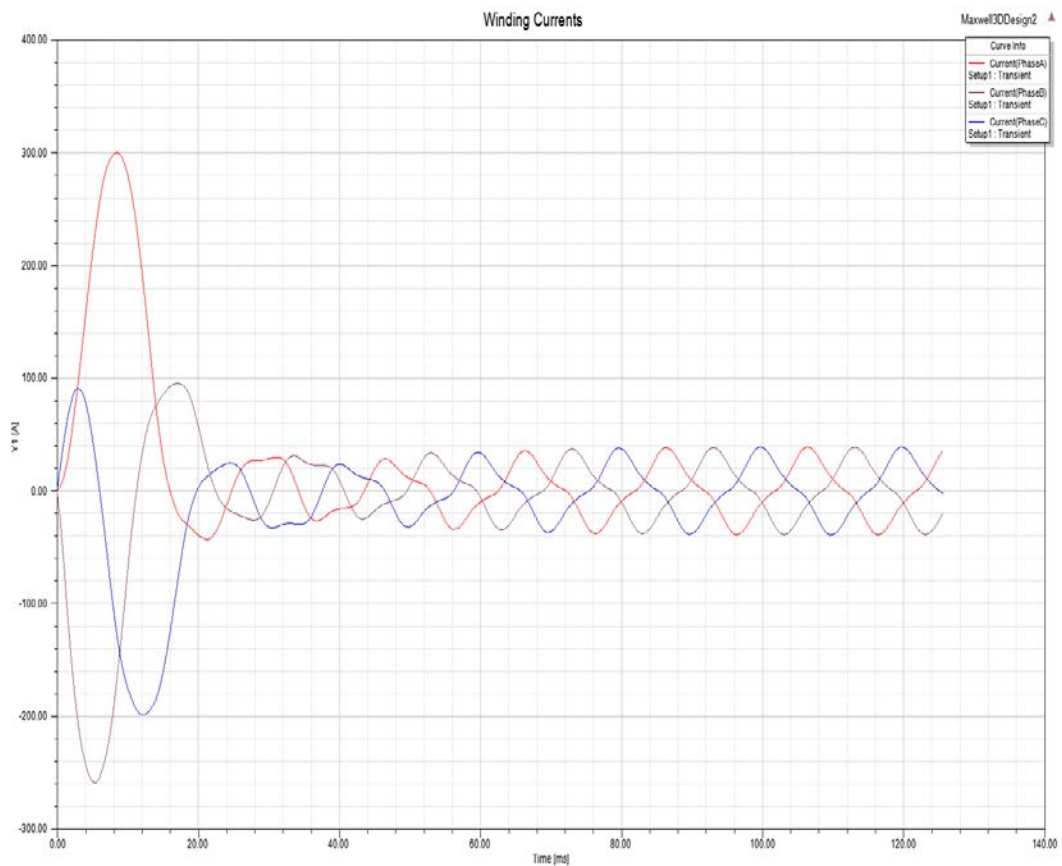
Záznamem důležitým ke zkoumání přechodného děje je časový průběh odebíraného proudu. Z Obr. 35 je zjevné, že při připojení stroje k síti dojde k proudovému nárazu. Ten způsobuje úbytky napětí v síti, proto by neměly být stroje s výkonem nad 3 kW spouštěny prostřednictvím přímého připojení k síti. [13]

K ustálení odebíraného proudu, tedy k odeznění přechodného děje, dochází přibližně v čase 75 ms. Od této doby by měl být v ideálním případě odebíraný proud sinusový s konstantní amplitudou. Efektivní hodnota proudu v ustáleném stavu je asi 25 A (průměr z hodnot vypočtených v Maxwell 3D).



**Obr. 35: Časový průběh proudu. [9]**

Při simulaci 3D modelu je zjevné, že odebíraný proud ani po ustálení není sinusový (viz Obr. 36).

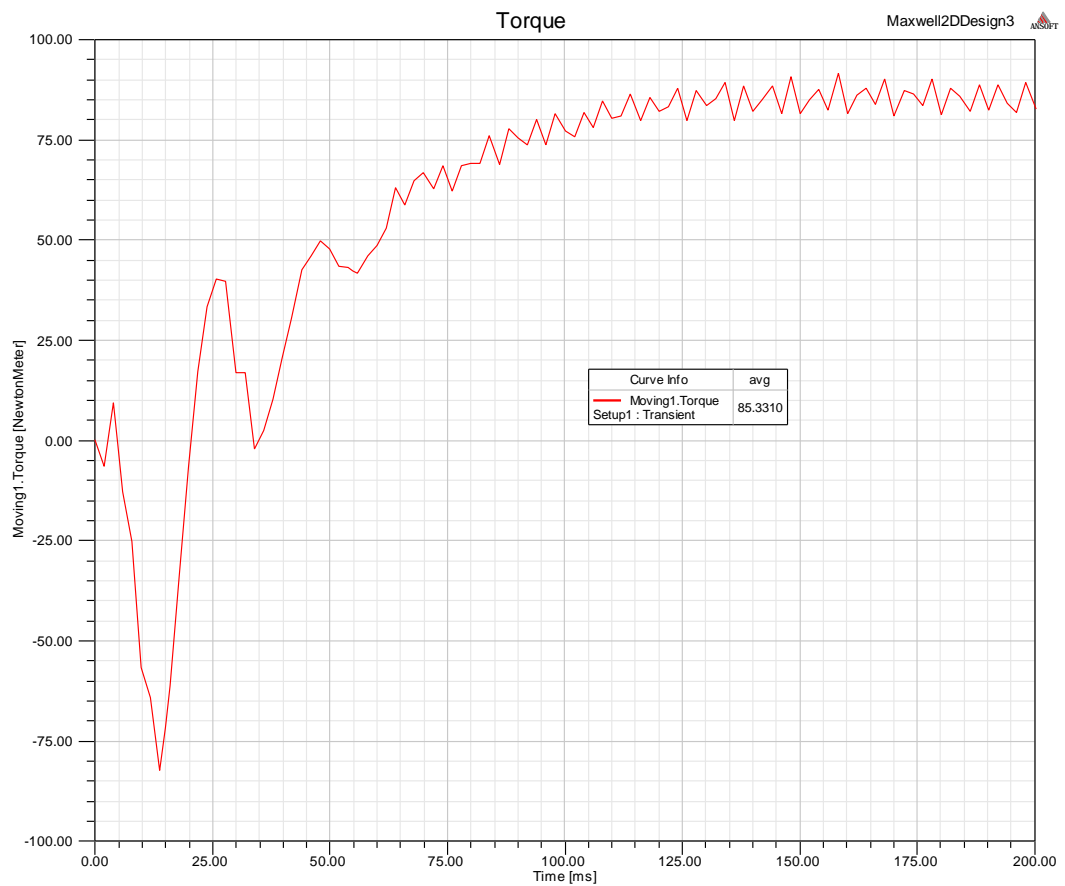


**Obr. 36: Časový průběh proudu ve 3D modelu. [9]**

Vzájemný posun napájecího napětí a odebíraného proudu udávají charakter výkonu stroje. Jsou-li ve fázi, odebírá stroj ze sítě činný výkon. Se zvětšováním vzájemného posunu se zvětšuje odebíraný jalový výkon. Z Obr. E2 až Obr. E4 je zjevné, že v ustáleném stavu jsou obě veličiny prakticky ve fázi a jedná se tedy o první případ.

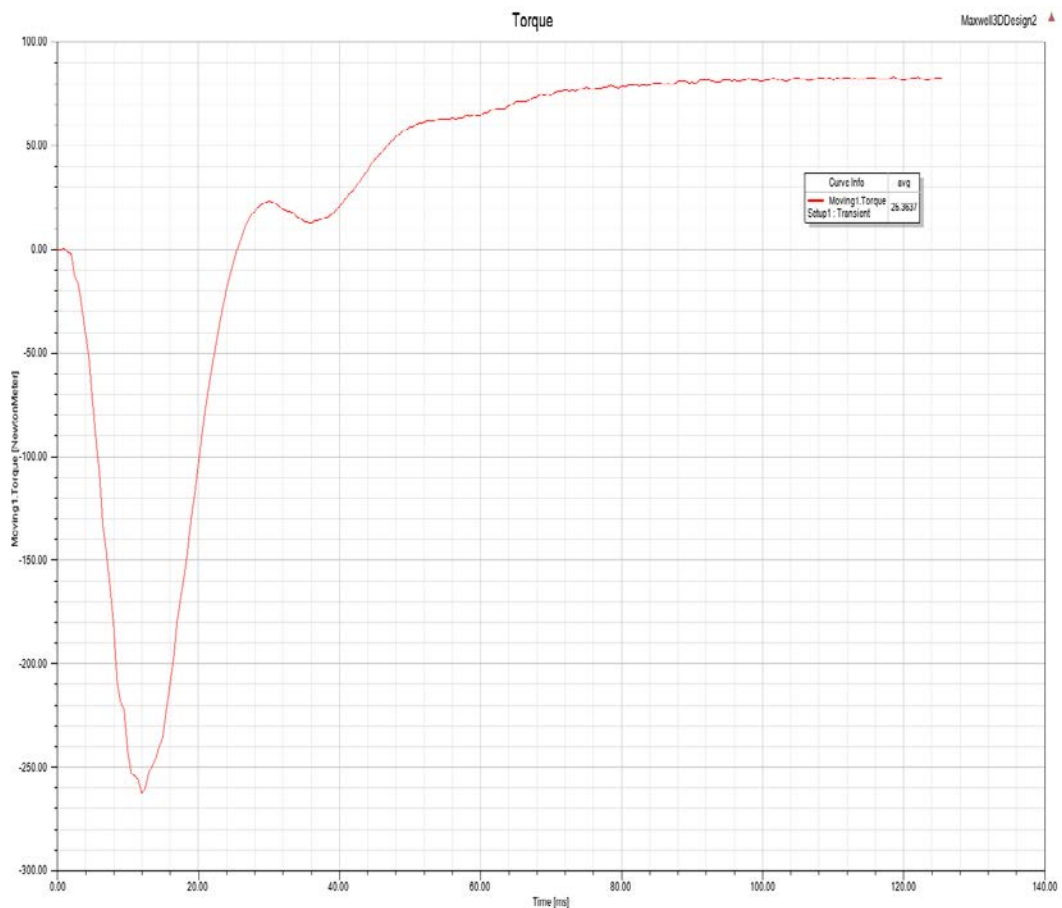
### 4.3.3 Moment stroje

Jak již bylo zmíněno výše, vzájemným působením indukovaného napětí rotoru a točivého pole statoru vzniká moment, který otáčí rotorem. Obr. 36 zobrazuje časový průběh momentu 2D modelu. Během první periody klesne moment prudce do záporných hodnot (asi -85 Nm). V další periodě roste a v čase asi 75 ms se ustálí na průměrné hodnotě 85 Nm.



**Obr. 37: Časový průběh momentu. [9]**

Z následujícího obrázku je zjevné, že průběh momentu je shodný i pro 3D model. Výjimkou je pokles momentu do záporných hodnot. Velikost záporného momentu je několikanásobně vyšší (Obr. 38).



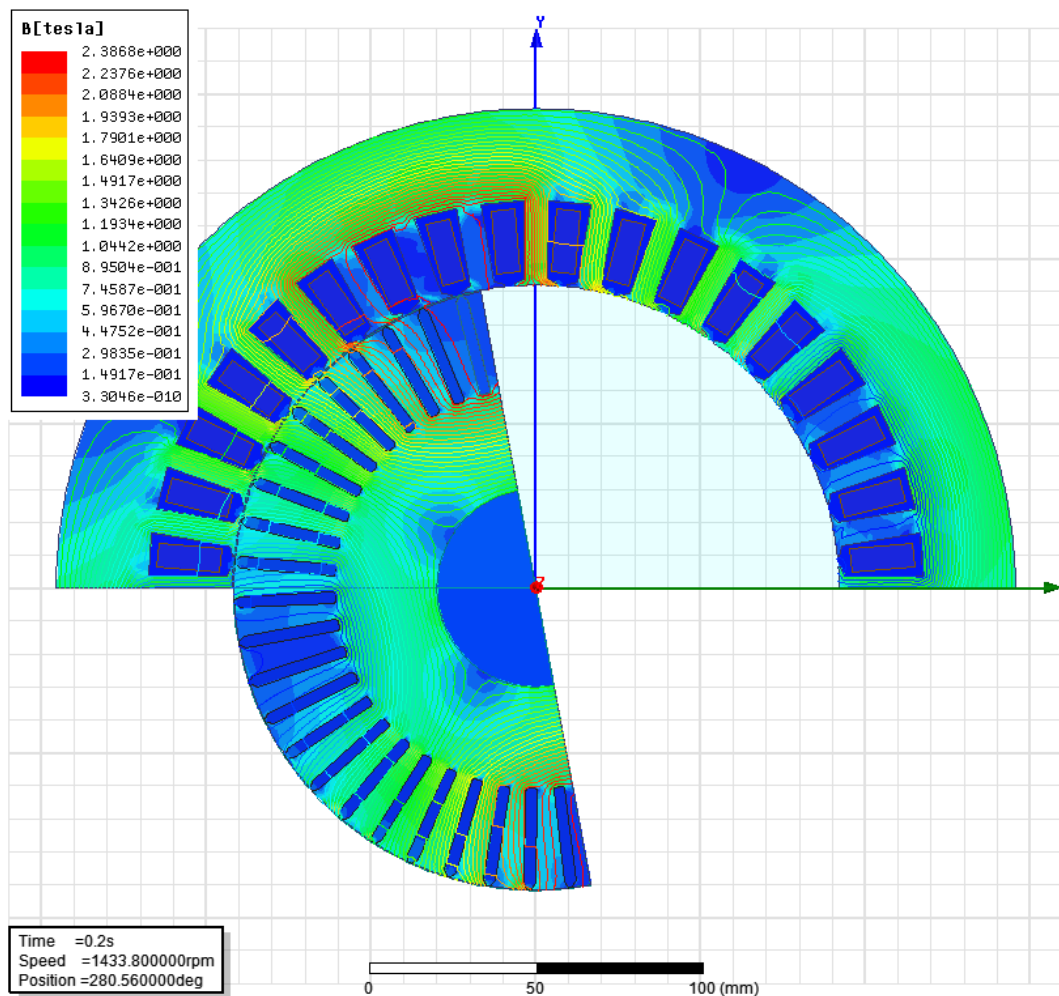
Obr. 38: Časový průběh momentu pro 3D model. [9]

#### 4.3.4 Mapa magnetického pole

Již bylo řečeno, že výsledkem simulace mohou být mapy pole dle zvoleného typu analýzy. V tomto případě se jedná o simulaci magnetického pole, výsledné mapy mohou tedy být následující: intenzita magnetického pole a magnetická indukce (obě lze zobrazit i pomocí vektorů), dále také proudová hustota atd.

Mapa magnetického pole (magnetické indukce) v 2D modelu je zobrazena na Obr. 39. Je zjevné, že v některých místech dochází k přesycování zubů statoru i rotoru převážně u vzduchové mezery.

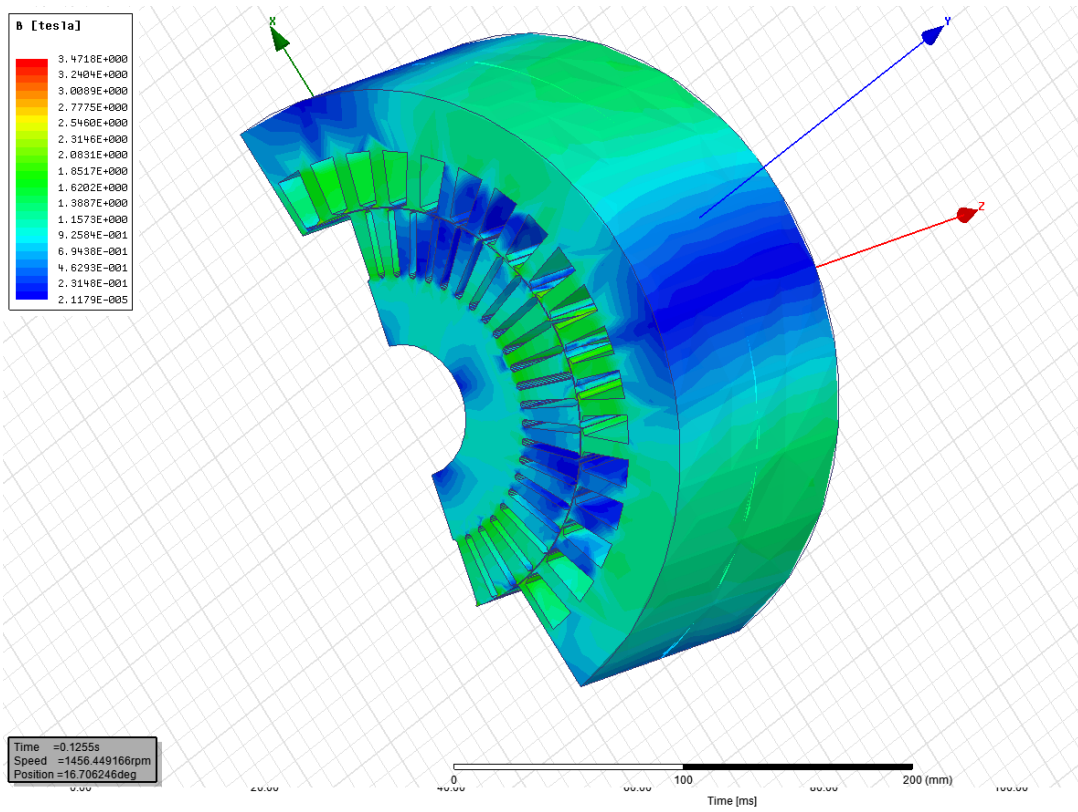
Obr. E5 v příloze E navíc zobrazuje rozložení potenciálu magnetického pole ve stroji.



**Obr. 39: Rozložení magnetické indukce v čase 200 ms. [9]**

Rozložení magnetického pole na povrchu stroje je zobrazeno na dalším obrázku Obr. 40.





Obr. 40: Rozložení magnetické indukce na povrchu stroje. [9]

## 5 Analýza výsledků

V předcházejících kapitolách byl proveden EMN stroje klasickou AM a prostřednictvím moderního simulačního softwaru. Cílem této kapitoly je analýza získaných výsledků a vzájemné porovnání.

Výsledky dvou AM jsou porovnány v příslušné kapitole. V této kapitole bude tedy porovnána použitá M1 s RMxprt a RMxprt se simulací modelů ve 2D a 3D.

### 5.1 Analytická metoda a RMxprt

Cílem této kapitoly je porovnat obě metody návrhu a určit, zda je možné je zaměnit, aniž by byla významně ovlivněna kvalita a přesnost návrhu.

Na počátku návrhu stroje prostřednictvím M1 byly určeny prvotní hodnoty účinnosti a účinníku stroje, které byly následně využity k výpočtům zbylých parametrů stroje. Jejich porovnání s hodnotami vypočtenými v RMxprt jsou zobrazeny v následující tabulce (Tab. 4). Je vidět, že hodnoty jsou si velmi blízké.

Tab. 4: Účinnost a účinník vypočtené modulem RMxprt a porovnání s analytickým výpočtem

parametr		RMxprt	výpočet dle M1
účinnost	(-)	<b>0,890</b>	<b>0,880</b>
účinník	(-)	<b>0,874</b>	<b>0,885</b>

Důležitým faktorem EMN je velikost magnetické indukce a lineární proudové hustoty v jednotlivých částech, které jsou nezbytné pro výpočet magnetizačního proudu a ovlivňují velikost ztrát. Tyto hodnoty RMxprt počítá sám na základě zvoleného materiálu a geometrie stroje. V Tab. 5 jsou shrnuty výsledky získané prostřednictvím softwaru a výpočtu dle M1.

**Tab. 5: Hodnoty magnetické indukce a proudové hustoty vypočtené modulem RMxprt a porovnání s analytickým výpočtem**

parametr		RMxprt	výpočet dle M1
magnetická indukce statorových zubů	(T)	<b>1,626</b>	<b>1,513</b>
magnetická indukce rotorových zubů	(T)	<b>1,395</b>	<b>1,199</b>
magnetická indukce jha statoru	(T)	<b>1,403</b>	<b>1,317</b>
magnetická indukce jha rotoru	(T)	<b>1,261</b>	<b>0,975</b>
magnetická indukce vzduchové mezery	(T)	<b>0,724</b>	<b>0,658</b>
proudová hustota statorovým vinutím	(A/mm <sup>2</sup> )	<b>4,810</b>	<b>4,883</b>
proudová hustota tyčí rotoru	(A/mm <sup>2</sup> )	<b>2,783</b>	<b>3,400</b>
proudová hustota kruhu	(A/mm <sup>2</sup> )	<b>2,329</b>	<b>2,600</b>

I v případě těchto veličin je evidentní, že obě metody jsou porovnatelné, neboť veškeré hodnoty jsou si blízké. Rozdíly mohou být dány využitím jiného materiálu, neboť v RMxprt je použit materiál D21\_50 a v M1 plech  $\square 11$ . Dále také menšími nepřesnostmi v odečítání hodnot z magnetizační charakteristiky plechu  $\square 11$ .

Jelikož B-H charakteristika plechu D21\_50 nemá vhodné měřítko, nelze ji, vzhledem k velikosti indukci ve stroji, použít pro výpočet v analytické metodě. Byl proveden pouze orientační výpočet a výsledné hodnoty se příliš neliší, tudíž je možné je vzájemně porovnávat.

Jak již bylo řečeno, výše uvedené parametry jsou podstatné k výpočtu magnetizačního proudu. Jeho hodnota získaná prostřednictvím analytického výpočtu je 6 A. RMxprt vypočítal hodnotu vyšší, a to 9,2 A.

Se znalostí výše uvedených parametrů je možné získat parametry náhradního schématu. Všechny tyto hodnoty již byly uvedeny výše, zde jsou uvedeny pro možnost porovnání (viz Tab. 6).

**Tab. 6: Parametry náhradního schématu vypočtené modulem RMxprt a porovnání s analytickým výpočtem**

parametr		RMxprt	výpočet dle M1
ohmický odpor statorového vinutí	( $\Omega$ )	<b>0,416</b>	<b>0,400</b>
rozptylová reaktance statorového vinutí	( $\Omega$ )	<b>0,574</b>	<b>1,285</b>
ohmický odpor rotorového vinutí	( $\Omega$ )	<b>0,301</b>	<b>0,300</b>
rozptylová reaktance rotorového vinutí	( $\Omega$ )	<b>0,834</b>	<b>1,262</b>
odpor reprezentující ztráty v železe	( $\Omega$ )	<b>420,358</b>	<b>396,600</b>
hlavní rozptylová reaktance	( $\Omega$ )	<b>23,451</b>	<b>37,400</b>

Z porovnání výsledků je zjevné, že odpory na statoru a rotoru jsou srovnatelné v obou výpočtech. Problém nastává u rozptylových reaktancí, kdy vypočtené AM jsou mnohem vyšší než získané z RMxprt (statorová téměř dvakrát, rozdíl u rotorové není tak značný). Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben různými výpočty, ale není možné zjistit příčinu, neboť nelze nahlédnout do struktury výpočtů programu.

Odpor, který reprezentuje ztráty v železe je vypočten pouze v RMxprt. Jeho výpočet je možné provést stejným způsobem jako výpočet tohoto parametru v kapitole shrnující výsledné parametry náhradního schématu v RMxprt (str. 51). Příslušné ztráty jsou 522 W a proud železem je 0,663. Velikost odporu je tedy 396,6  $\Omega$ .

Dalším důležitým kritériem posouzení správnosti návrhu jsou ztráty ve stroji. RMxprt podává informace o ztrátách při jmenovitém chodu, zatímco výpočet v M1 předpokládá ztráty při chodu naprázdno, neboť jejich znalost je nezbytná pro konstrukci kruhového diagramu. Pro vzájemné porovnání je tedy třeba provést výpočet ztrát těchto ztrát z hodnot z RMxprt. Lze ho provést dle rovnic v kapitole o výpočtu ztrát.

Jedinou výjimkou jsou měrné magnetické ztráty, jejichž velikost není pro daný materiál v RMxprt dostupná, ale lze je vypočítat pomocí ztrátových koeficientů materiálu. Ty jsou následující:  $k_h = 366$  W/kg,  $k_c = 0,822$  W/kg a  $k_e = 0,91$  W/kg. Výpočet ztrát vychází z rovnice pro ztráty:

$$P_0 = k_d \cdot k_h \cdot f \cdot B_m^2 + k_c \cdot (f \cdot B_m)^2 + k_e \cdot (f \cdot B_m)^{1,5} \quad (3. 1)$$

Měrné ztráty jsou tedy dány výsledkem rovnice 3.1 poděleným hustotou materiálu, která činí  $7820 \text{ kg/m}^3$ . Dosazením  $k_d = 1,1$  a  $B_m 1,5 \text{ T}$  (aritmetický průměr indukce ve jhu statoru a v statorových zubech) je výsledná velikost měrných ztrát  $p_{1,5}$  asi  $3,7 \text{ W/m}^3$ . Porovnání ztrát naprázdno je v Tab. 7.

**Tab. 7: Ztráty naprázdno vypočtené z hodnot získaných modulem RMxpvt a jejich porovnání s analytickým výpočtem**

parametr		RMxpvt	výpočet dle M1
ztráty ve jhu statoru	(W)	<b>330</b>	<b>185</b>
ztráty ve statorových zubech	(W)	<b>80</b>	<b>84</b>
povrchové ztráty v zubech statoru	(W)	<b>8</b>	<b>6</b>
povrchové ztráty v zubech rotoru	(W)	<b>22</b>	<b>18</b>
tepavé ztráty v zubech statoru	(W)	<b>3</b>	<b>3</b>
tepavé ztráty v zubech rotoru	(W)	<b>30</b>	<b>22</b>
hlavní ztráty v železe	(W)	<b>410</b>	<b>269</b>
přídavné ztráty v železe	(W)	<b>63</b>	<b>48</b>
ztráty v železe celkem	(W)	<b>473</b>	<b>317</b>
mechanické a ventilační ztráty	(W)	<b>98</b>	<b>98</b>
ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno	(W)	<b>105</b>	<b>42</b>
přídavné ztráty	(W)	<b>65</b>	<b>65</b>
celkové ztráty při chodu naprázdno	(W)	<b>741</b>	<b>522</b>

Výše uvedená tabulka ukazuje, že i v případě ztrát nejsou rozdíly obou metod tvorby EMN velké. Rozdíl celkových ztrát naprázdno netvoří ani 2 % jmenovitého výkonu stroje.

Závěrem této kapitoly lze říci, že obě metody nevykazují významné odchylky a je tedy prakticky možné využít pro posouzení správnosti EMN kteroukoliv z nich, aniž by byla významně ovlivněna přesnost.

## 5.2 Simulace 2D resp. 3D modelu a RMxpvt

Jelikož RMxpvt dává informace o všech chodech stroje je možné některé výsledky vzájemně porovnat se simulacemi 2D a 3D modelu.

Při jmenovitém chodu je statorový proud 23,8 A. Proud v ustáleném stavu z Obr. 35 je v průměru 25 A. Moment stroje činí dle RMxpvt 84,6 Nm a dle simulace v Maxwell 3D 85 Nm. Je tedy zjevné, že výsledky jsou prakticky stejné, což je vzhledem k faktu, že jsou simulovány stejné modely, očekávané.

Veškeré hodnoty získané prostřednictvím dvou výše uvedených cest lze ještě navíc porovnat se hodnotami danými empirickými vzorci.

Fázový proud je dán rovnicí 1.7. a jeho velikost činí 24,2 A. Proud naprázdno je:

Moment při jmenovitém chodu je dán vztahem:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{\pi \cdot n_n}{30}} = \frac{13000}{\frac{\pi \cdot 1450}{30}} = 85,6 \text{ Nm} \quad (3.2)$$

Hodnoty vypočtené programem se shodují s empirickým výpočtem. S tímto poznatkem je možné říci, že programové prostředí i expertní modul počítají správně dle obecně platných zákonitostí.

## Závěr

Elektromagnetický návrh stroje analytickou metodou je časově náročný i s využitím počítačových programů jako je MS Excel či Mathematica, neboť je nutné do nich zadat všechny potřebné vztahy. S těmito programy je snadnější tvořit změny v návrhu změnou kteréhokoli z parametrů sloužícímu k návrhu stroje než bez nich (využití papíru a kalkulačky).

Aplikování expertního modulu RMXprt, který je součástí programového prostředí ANSYS Maxwell 3D, usnadňuje tvorbu návrhu. Samotný postup návrhu je jednoduchý a názorný. Do předdefinovaných šablon se zadá geometrie stroje a následně parametry simulace. Výstupem jsou elektrické a mechanické veličiny navrhovaného stroje a grafické znázornění jejich vzájemných závislostí.

Modul RMXprt zároveň značně usnadňuje vytvoření 2D či 3D modelu, jelikož spolu s geometrií stroje exportuje do modelu i buzení a okrajové podmínky. Využití User Defined Primitives je z hlediska návrhu geometrie snadné, ovšem vyžaduje řadu dalších nastavení. Stejný případ by byl i pro stroj nakreslený například v AutoCADu.

Simulace v ANSYS Maxwell 3D umožňuje zkoumat model stroje v přechodných či v ustálených stavech při uživatelem definovaném buzení. Výstupem takové simulace jsou mapy elektromagnetických polí simulovaného objektu a grafické zobrazení závislosti veličin na čase či jiném volitelném parametru. Veškeré znalosti z RMXprt a simulace modelu slouží uživateli k optimalizaci návrhu stroje.

V této práci byl vytvořen elektromagnetický model analytickou metodou i prostřednictvím modulu RMXprt. K výpočtům byl použit již vypočtený a prozkoumaný stroj o typovém výkonu 13 kW, aby bylo možné s jistotou porovnat správnost návrhu v obou případech. Ze všech vypočtených hodnot je možné říci, že použité metody nevykazují významné odchylky, přestože byly použity pro oba návrhy různé plechy se srovnatelnými parametry, a je tedy možné s výhodou využít moderního softwaru.

Moderní simulační prostředky jako ANSYS Maxwell 3D usnadňují návrh a dokážou vytvořit výstupy, které analytickou metodou není možné získat nebo je to značně obtížné. Je-li navržený stroj třeba upravit, příslušné parametry je možné

měnit rychle a efektivně. Případně lze využít optimalizačních analýz, ve kterých se stanoví nějaký parametr, jež se nebude v průběhu analýzy měnit. Tím mohou být například materiály stroje nebo jeho rozměry. I přes nesporné výhody využití simulačních softwarů je nezbytné zmínit, že i v tomto případě je nutné mít znalosti ohledně elektromagnetického návrhu stroje. Bez nich by nebylo možné posoudit správnost návrhu a případně provádět úpravy pro optimalizaci stroje.

Závěrem lze říct, že navrhovaný stroj by bylo možné vylepšit ještě například změnou použitých materiálů. Ovšem další zlepšování návrhu je nad rámec této práce.



# Seznam literatury

- [1] KOTAL, Miroslav, Petr NOVOTNÝ a Petr VOŽENÍLEK. *Příklady výpočtu elektrických strojů točivých*. Praha: ČVUT, 1988.
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, ix, 512 p. ISBN 978-047-0695-166.
- [3] Směrnice EU 2009/125/ES a norma ČSN EN (IEC) 60034 – 30, Nová definice, nové třídy účinnosti. In: *Elektroprůmysl.cz* [online]. 18. 10. 2011 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/legislativa-a-normalizace/smernice-eu-2009-125-es-a-norma-csn-en-iec-60034-30-nova-definice-nove-tridy-ucinnosti>
- [4] ČSN EN (IEC) 60034-30-1. *Točivé elektrické stroje - Část 30-1: Třídy účinnosti střídavých motorů provozovaných ze sítě (IE kód)*. Hradec Králové: TECHNOR, 12.2012.
- [5] Electromechanical. ANSYS [online]. © 2015 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Electromechanical>
- [6] HORNOVÁ, Jitka a Veronika POHANKOVÁ. *Aplikace programu RMXprt (ANSYS Maxwell 3D) pro návrh asynchronního trakčního motoru 13 kW*. Praha, 2014. Týmový projekt. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Buhr.
- [7] ANSYS *Maxwell3D* [CD-ROM]. Version 17. USA. ANSYS, 2013. RMXprt
- [8] Half Coil Winding. In: *Tutors Globe* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.tutorsglobe.com/homework-help/electrical-engineering/half-coil-winding-71554.aspx>
- [9] ANSYS *Maxwell3D* [CD-ROM]. Version 17. USA. ANSYS, 2013. Maxwell3D
- [10] KAFKA, Peter. Field Weakening of Induction Motors in a Very Wide Region with Regard to Parameter Uncertainties. In: *Universität Paderborn* [online]. © 1996 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: [88](http://ei.uni-paderborn.de/fileadmin/Elektrotechnik/AG-</a></p></div><div data-bbox=)

LEA/forschung/veroeffentlichungen/1996/96IEEE-Buente-Grotstollen-FieldWeakening.pdf

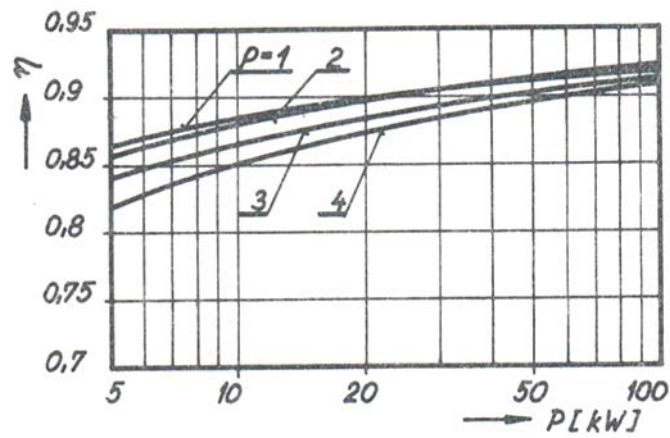
[11] Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v11 User's Guide. In: *ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell* [online]. © 2005 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D\\_V11.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf)

[12] PAVELKA, Jiří a Jiří ZDĚNEK. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 241 s. ISBN 978-80-01-04642-5.

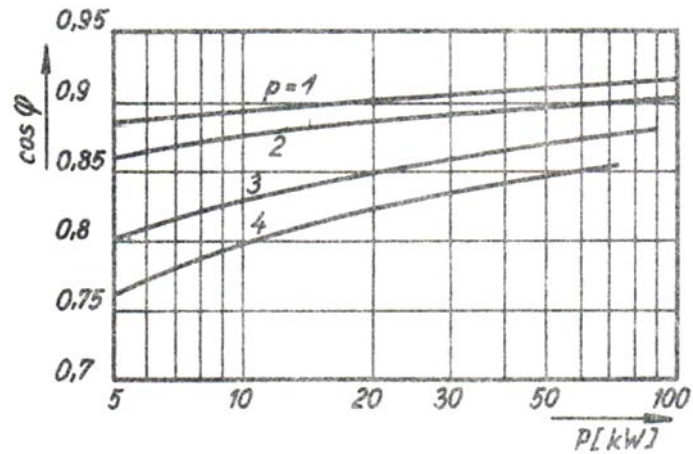
[13] Asynchronní motory. In: STANISLAV, Kocman. *P.kobrlle.sweb.cz* [online]. 2002 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>

# Příloha A

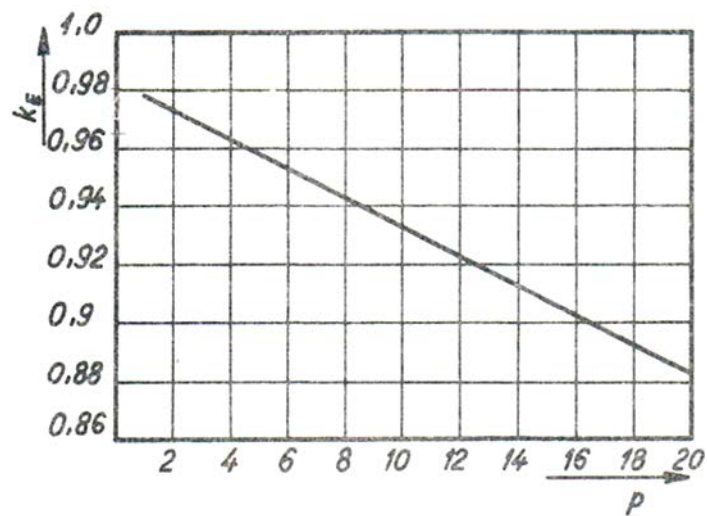
Obsahem této přílohy jsou závislosti potřebné pro EMN stroje AM.



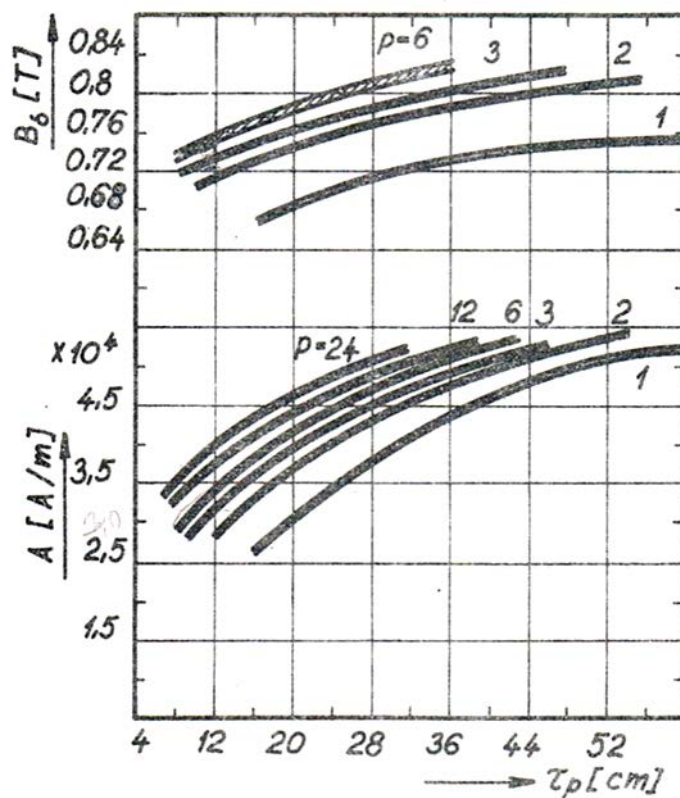
Obr. A1: Závislost účinnosti na jmenovitém výkonu stroje a počtu pólových dvojic. [1]



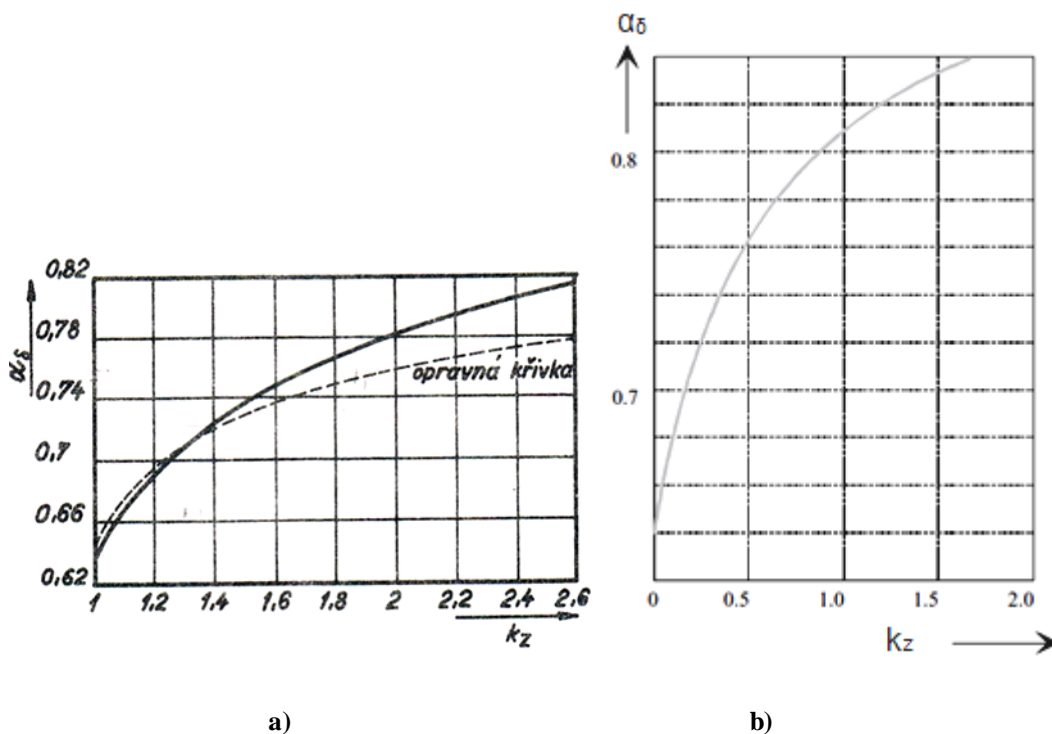
Obr. A2: Závislost velikosti účinku na jmenovitém výkonu stroje a počtu pólových dvojic. [1]



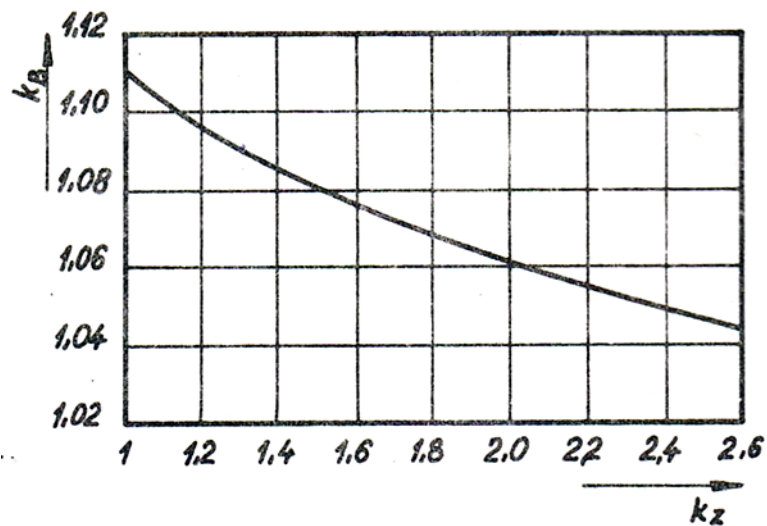
Obr. A3: Závislost koeficientu  $k_E$  na výkonu stroje. [1]



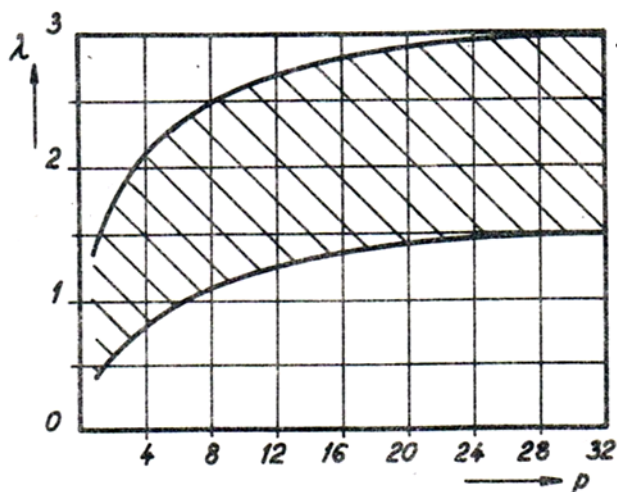
Obr. A4: Závislost lineární proudové hustoty resp. magnetické indukce ve vzduchové mezeře na pólové rozteči. [1]



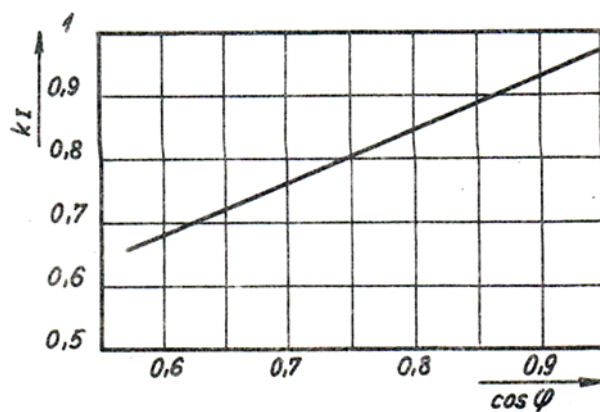
Obr. A5: Závislost koeficientu  $\alpha_\delta$  na saturačním koeficientu  $k_z$ : a) pro výpočet dle M1. [1], b) pro výpočet dle M2. [2]



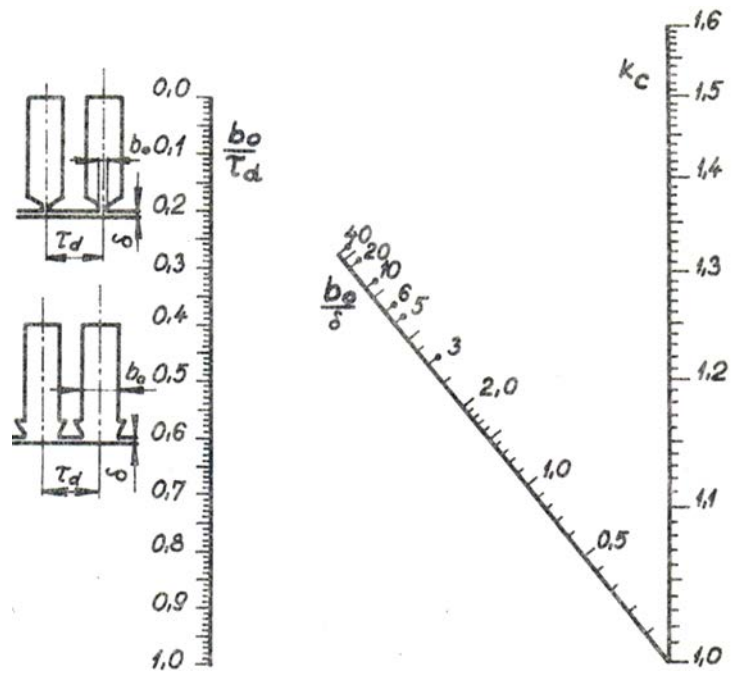
Obr. A6: Koeficient tvaru pole  $k_B$  v závislosti na saturačním koeficientu. [1]



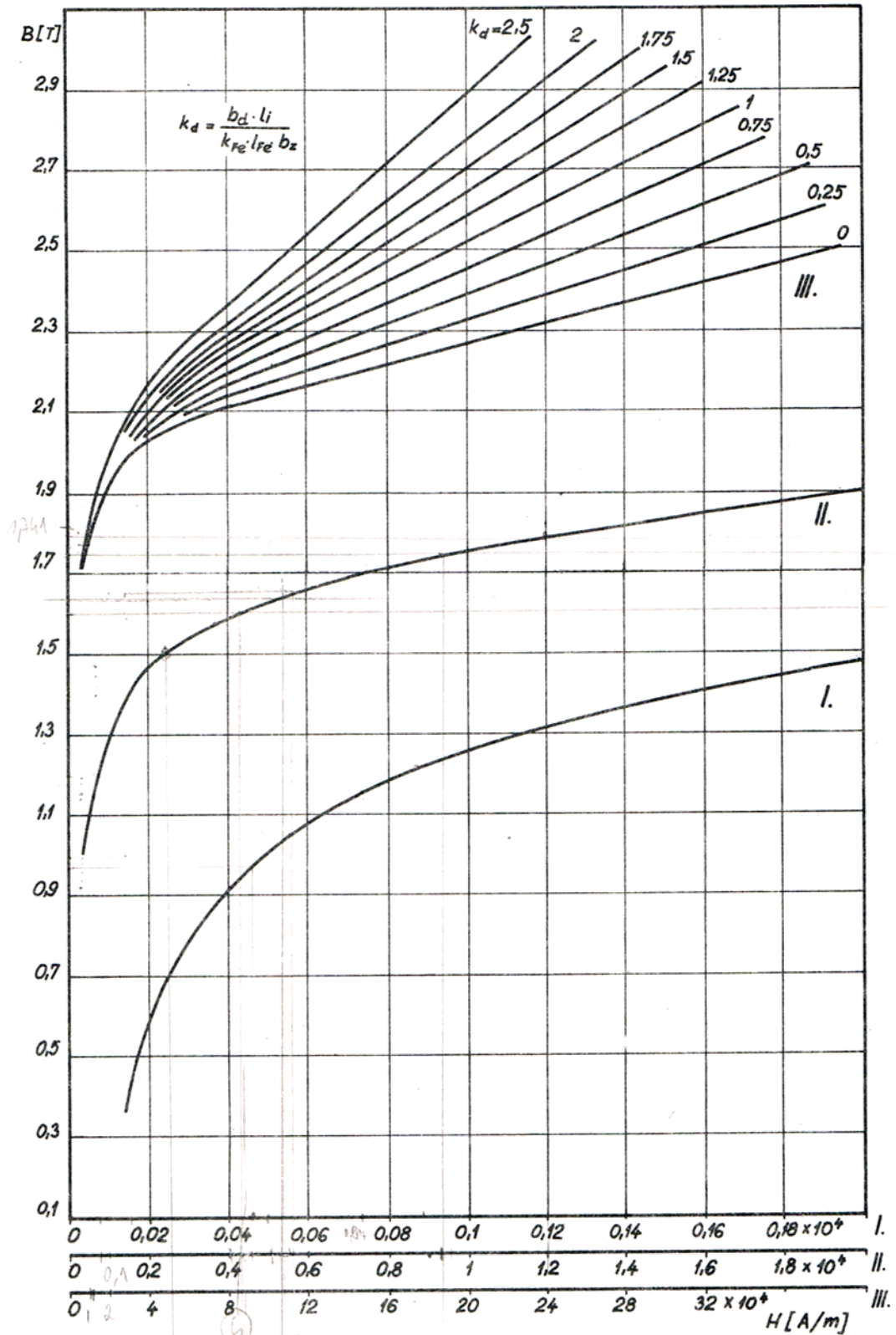
Obr. A7: Poměr ideální délky statoru a pólové rozteče  $\lambda$  v závislosti na výkonu stroje. [1]



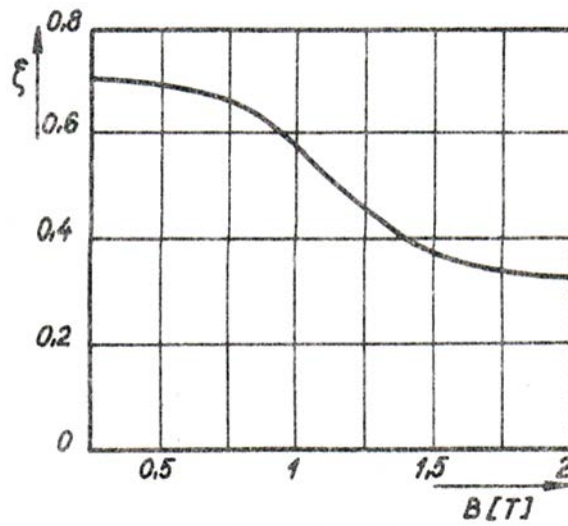
Obr. A8: Koeficient  $k_I$  v závislosti na účinníku. [1]



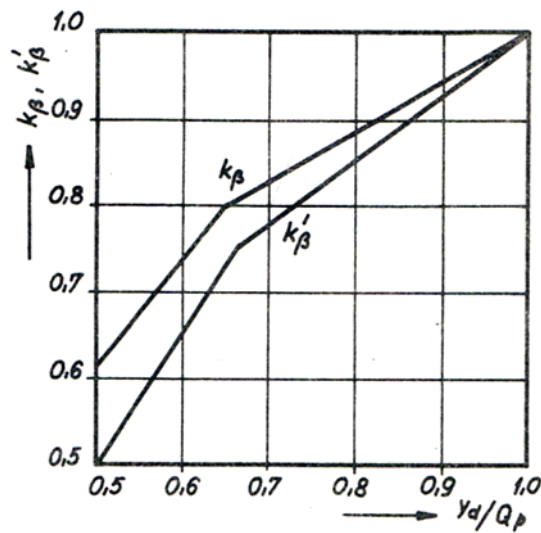
Obr. A9: Nomogram pro výpočet Carterova činitele. [1]



Obr. A10: Magnetizační křivky plechů □11, □12 a □21 ( $p_{1,0} = 3,3$  W/kg). [1]

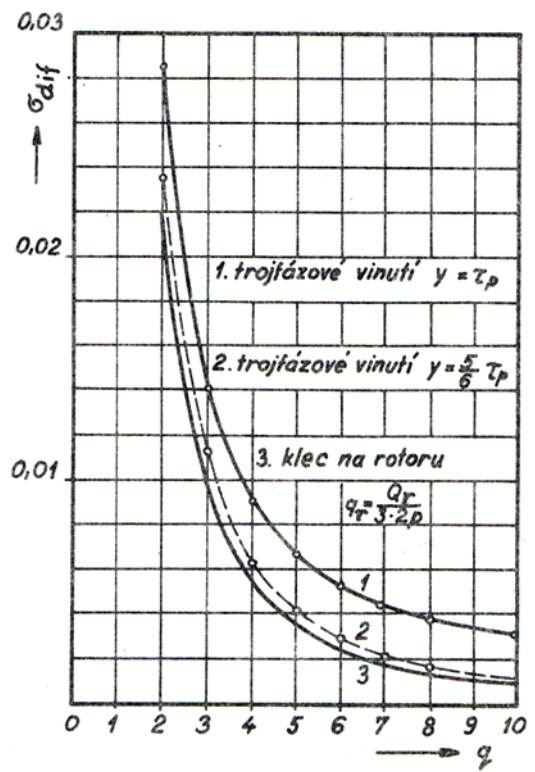


Obr. A11: Závislost koeficientu  $\xi$  na magnetické indukci. [1]



Obr. A12: Závislost koeficientů  $k_\beta$  a  $k'_\beta$  na zkrácení kroku. [1]





Obr. A13: Koefficient náhradní magnetické vodivosti diferenčního rozptylu v závislosti na počtu drážek na pól. [1]

## Příloha B

Obsahem přílohy B jsou tabelárně shrnuté výsledky výpočtů jednotlivých strojů M1 a M2. Tabulka je tematicky dle jednotlivých kapitol návrhu.

**Tab. B1: Vypočtené parametry stroje dle M1 a M2**

			Vypočtené hodnoty dle metodiky:			
			M1	M2	M1	M2
<i>parametr</i>			13kW		15 kW	
<i>účinník</i>	$\cos \phi$	-	0,880	0,880	0,885	0,885
<i>účinnost</i>	$\eta$	-	0,885	0,885	0,885	0,885
<i>konstanta stroje</i>	$C_{\text{mech}}$	kWs/m <sup>3</sup>	-	1,406	-	1,622
<b>STATOR A VZDUCHOVÁ MEZERA</b>						
	$k_E$	-	0,970	-	0,970	-
<i>vnitřní výkon</i>	$P_i$	kVA	16,192		18,577	
<i>vrtání</i>		m	0,190	-	0,190	-
<i>vnější průměr statoru</i>	$D_e$	m	0,306	-	0,306	-
		m	0,296	-	0,296	-
		m	0,291	0,291	0,291	0,291
<i>vnitřní průměr statoru</i>	$D$	m	0,184	0,184	0,184	0,184
<i>poměr délky stroje a průměru vzduchové mezery</i>	$\chi$	-	-	0,990	-	0,990
<i>pólová rozteč</i>	$\tau_p$	m	0,145	0,145	0,145	0,145
<i>lineární proudová hustota</i>	$A$	A/m	31000	-	31000	-
<i>indukce ve vzduchové mezeře</i>	$B_\delta$	T	0,720	0,720	0,720	0,720
<i>počet drážek na pól</i>	$q_s$	-	3	3	3	3
<i>počet fází</i>	$m$	-	3	3	3	3
<i>počet drážek statoru</i>	$Q_s$	drážek	36	36	36	36
<i>drážková rozteč statoru</i>	$\tau_{ds}$	m	0,016	0,016	0,016	0,016
<i>pólová rozteč v počtu drážek</i>	$Q_p$	drážek	9	9	9	9
<i>úhel drážek</i>	$\alpha_u$	rad	-	0,3491	-	0,3491
<i>krok drážek</i>	$y_{dl}$	drážek	7	7	7	7
<i>činitel kroku</i>	$k_{vy}$	-	0,940	0,940	0,940	0,940
<i>činitel rozlohy</i>	$k_{vr}$	-	0,960	0,960	0,960	0,960
<i>činitel vinutí</i>	$k_{vl}$	-	0,902	0,902	0,902	0,902
<i>předpokládaný koeficient nasycení</i>	$k_z$	-	1,325	1,325	1,325	1,3250
<i>poměr střední a</i>	$\alpha_\delta$	-	0,720	0,825	0,720	0,8250

<i>maximální hodnoty <math>B_{\delta}</math></i>						
<i>koeficient tvaru křivky pole</i>	$k_B$	-	1,090	-	1,090	-
<i>ideální délka statoru</i>	$l_i$	m	0,123	-	0,141	-
<i>skutečná délka statoru bez radiálních ventilačních kanálů</i>	$l$	m	0,123	0,182	0,141	0,1821
<i>ekvivalentní délka stroje</i>	$l'$	m	-	0,183	-	0,1830
<i>poměr <math>l/\tau_p</math></i>	$\lambda$	-	0,849	-	0,975	-
<i>jmenovitý fázový proud statoru</i>	$I_{1f}$	A	24,192	24,192	27,756	27,7559
<i>počet paralelních drátů</i>	$a_p$	-	3	3	3	3
<i>paralelní větve</i>	$a$	-	1	1	1	1
<i>proudová hustota vodičem</i>	$J_s$	A/mm <sup>2</sup>	5,200	5,200	5,200	5,2
<i>průřez dílčího vodiče vypočtený</i>	$s_1$	mm <sup>2</sup>	1,551	1,551	1,779	1,7792
<i>průřez dílčího vodiče voleného</i>	$s_1$	mm <sup>2</sup>	1,651	1,651	1,887	1,8869
<i>průměr drátu</i>	$d_{v1}$	mm	1,450	1,450	1,550	1,5500
<i>průměr drátu s izolací</i>	$d_{v1i}$	mm	1,560		1,600	
<i>skutečná proudová hustota</i>	$J_s$	A/mm <sup>2</sup>	4,883	-	4,903	-
<i>počet efektivních vodičů v drážce</i>	$v_{dl}$	-	20,596	11,816	17,951	11,814
	$v_{dl}$	-	22	12	18	12
<i>počet závitů v sérii jedné fáze</i>	$N_1$	závitů	132	70,898	108	70,886
			-	71	-	71
<i>indukované napětí</i>	$E_m$	V	-	223,100 0	-	223,100 0
<i>magnetický tok jednoho pólu ve vzduchové mezeře</i>	$\Phi$	Wb	0,009	0,016	0,011	0,016
<i>indukce ve vzduchové mezeře nová</i>	$B_{\delta}$	T	0,672	0,719	0,716	0,719
<i>celkový počet dílčích vodičů v drážce</i>	$v_d$	-	66	36	54	36
<i>koeficient plnění</i>	$k_{dr}$	-	0,780	0,660	0,800	0,660
<i>plocha drážky</i>				253,760		291,146
<i>volná plocha drážky</i>	$s_{dl}$	mm <sup>2</sup>	205,920	-	172,800	-
<i>drážka – lichoběžníková tvaru L</i>						
<i>magnetická indukce v zubu statoru</i>	$B_{zs}$	T	1,650	1,650	1,650	1,650

<i>činitel plnění plechů</i>	$k_{Fe}$	-	0,950	0,950	0,950	0,950
<i>šířka zubu</i>	$b_{zs}$	m	0,007	-	0,007	-
<i>hloubka drážky</i>	$h_{ds}$	m	0,026	0,021	0,024	0,027
<i>šířka zubu nová</i>	$b_{zs}$	m	0,007	0,007	0,009	0,009
<i>šířka drážky na vstupu</i>	$b_{o1}$	m	0,003	0,003	0,003	0,003
<i>indukce v zubu nová</i>	$B_{zs}$	T	1,545	-	1,345	-
<i>výška jha statoru</i>	$h_{js}$	m	0,028	0,033	0,030	0,027
<i>max. indukce ve jhu</i>	$B_{js}$	T	1,318	1,400	1,311	1,400
<i>velikost vzduchové mezery</i>	$\delta$	mm	0,450	0,450	0,461	0,461
<b>ROTOR</b>						
<i>počet drážek rotoru</i>	$Q_r$	drážek	46	46	46	46
<i>vnější průměr rotoru</i>	$d$	m	0,183	0,183	0,183	0,183
<i>drážková rozteč rotoru</i>	$\tau_{dr}$	m	0,013	0,013	0,013	0,013
<i>koeficient závislý na <math>\cos \phi</math></i>	$k_I$	-	0,920	-	0,920	-
<i>proud tyčí</i>	$I_t$	A	345,611	199,930	324,433	230,688
<i>proud v kruhu nakrátko</i>	$I_{kn}$	A	1269,07	-	1191,30	-
<i>proudová hustota v tyči</i>	$J_t$	A/mm <sup>2</sup>	3,400	3,400	3,400	3,400
<i>proudová hustota v kruhu nakrátko</i>	$J_{kn}$	A/mm <sup>2</sup>	2,600	-	2,600	-
<i>průřez tyče</i>	$s_t$	mm <sup>2</sup>	101,650	58,803	95,421	67,849
<i>průřez kruhu nakrátko</i>	$s_{kn}$	mm <sup>2</sup>	488,106	-	458,196	-
<i>drážka dle normy ČKD</i>				-		-
<i>šířka drážky</i>	$b_{dr}$	m	0,004	0,004	0,004	0,004
<i>šířka polouzavřené drážky na vstupu</i>	$b_{o2}$	m	0,002	0,002	0,002	0,002
<i>výška obdélníku drážky</i>	$h_1$	m	0,028	0,015	0,026	0,018
<i>hloubka drážky</i>	$h_{dr}$	m	0,030	0,018	0,028	0,020
<i>šířka zubu</i>	$b_{zr}$	m	0,009	0,009	0,009	0,009
<i>průřez drážky</i>	$s_{d2}$	mm <sup>2</sup>	103,000	58,803	96,000	67,849
<i>průřez tyče</i>	$s_{kn}$	mm <sup>2</sup>	103,000	-	96,000	-
<i>průměr hřídele</i>	$d_h$	m	0,060	-	0,060	-
<i>vnitřní průměr jha rotoru</i>	$d_i$	m	0,060	0,060	0,060	0,060
<i>výška jha rotoru</i>	$h_{jr}$	m	0,036	0,049	0,038	0,046
<i>délka rotoru</i>	$l_{Fer}$	m	0,128	-	0,146	-
<i>indukce ve jhu</i>	$B_{jr}$	T	0,975	1,000	0,990	1,000
<b>MAGNETICKÉ NAPĚTÍ A MAGNETIZAČNÍ PROUD</b>						
<i>poměry pro Carterův činitel statoru</i>	$b_{o1}/\tau_{ds}$	-	0,193		0,193	
	$b_{o1}/\delta$	-	6,889		6,889	

<i>pomocná</i>	$\kappa$	-	-	0,582	-	0,574
<i>Carterův činitel statoru</i>	$k_{c1}$	-	1,140	1,127	1,140	1,125
<i>poměry pro Carterův činitel rotoru</i>	$b_{o2}/\tau_{dr}$	-	0,120		0,120	
	$b_{o2}/\delta$	-	3,333		3,333	
<i>pomocná</i>	$\kappa$	-	-	0,403	-	0,394
<i>Carterův činitel rotoru</i>	$k_{c2}$	-	1,060	1,051	1,060	1,050
<i>celkový Carterův činitel</i>	$k_c$	-	1,208	1,184	1,208	1,180
<i>magnetické napětí vzduch.mezery na pólpár</i>	$U_{m\delta}$	A	584,455	301,581	622,607	311,220
<i>měrné magnetické napětí pro zuby</i>	$H_{zs}$	A/m	3200	5550	1300	5550
<i>magnetické napětí zubů statoru na pólpár</i>	$U_{mzs}$	A	163,200	116,550	61,100	149,850
<i>indukce v zubech u hlavy</i>	$B_{zr}$	T	0,965	1,825	1,035	1,800
<i>měrné magnetické napětí ve středu zubu:</i>						
<i>drážková rozteč</i>	$\tau'_{dr}$	m	0,010		0,011	
<i>šířka zubu</i>	$b'_{zr}$	m	0,007		0,007	
<i>indukce v zubu</i>	$B'_{zr}$	T	1,224		1,286	
<i>měrné magnetické napětí u paty zubu:</i>						
<i>drážková rozteč</i>	$\tau''_{dr}$	m	0,008		0,009	
<i>šířka zubu</i>	$b''_{zr}$	m	0,005		0,005	
<i>indukce</i>	$B''_{zr}$	T	1,746		1,772	
<i>měrné magnetické napětí</i>	$H''_{zr}$	A/m	9000		10000	
<i>střední hodnota měrného magnetického napětí</i>	$H_z(r)$	A/m	2165,00		2418,33	
<i>magnetické napětí zubů rotoru na pólpár</i>	$U_{mzr}$	A	131,632	264,750	137,361	242,400
<i>koeficient nasycení zubů</i>	$k_z$	-	1,504	1,264	1,319	1,260
<i>poměr stř. a max. hodnoty <math>B\delta</math> nový</i>	$\alpha_\delta$	-	0,735	0,822	0,719	0,822
<i>poměr koeficientů <math>\alpha_\delta</math></i>	$x$	-	0,980		1,001	
<i>indukce ve vzduchové mezeře</i>	$B_\delta$	T	0,658		0,717	
<i>magnetické napětí vzduch.mezery na pólpár</i>	$U_{m\delta}$	A	572,528		623,473	
<i>indukce zubů statoru</i>	$B_{zs}$	T	1,513		1,347	
<i>měrné magnetické napětí</i>	$H_{zs}$	A/m	2600		1200	
<i>magnetické napětí zubů statoru na pólpár</i>	$U_{mzs}$	A	132,600		56,400	

<i>zuby statoru</i>	$B_{zr}$	T	0,946		1,036	
	$B'_{zr}$	T	1,199		1,288	
	$B''_{zr}$	T	1,711		1,774	
	$H_{zr}$	A/m	450		520	
	$H'_{zr}$	A/m	880		1150	
	$H''_{zr}$	A/m	8000		10000	
	$H_z(r)$	A/m	1995		2520	
<i>magnetické napětí zubů na pólpár</i>	$U_{mzr}$	A	121,296		143,136	
<i>koeficient nasycení</i>	$k_z$	-	1,443		1,320	
<i>poměr střední a maximální hodnoty <math>B_\delta</math> po přepočtu</i>	$\alpha_\delta$	-	0,733		0,719	
<i>činitel respektující nerovnoměrné rozložení indukce ve jhu</i>	$\xi$	-	0,450		0,450	
<i>měrné magnetické napětí jha statoru</i>	$H_{js}$	A/m	1200	1600	1180	1600
<i>magnetické napětí jha statoru</i>	$U_{mjs}$	A	111,542	52,000	109,683	42,400
<i>činitel respektující nerovnoměrné rozložení indukce ve jhu</i>	$\xi$	-	0,570		0,580	
<i>měrné magnetické napětí jha statoru</i>	$H_{jr}$	A/m	500	500	500	500
<i>magnetické napětí jha rotoru</i>	$U_{mjr}$	A	21,542	24,452	22,375	23,170
<i>celkové magnetické napětí</i>	$U_m$	A	959,508	759,333	955,068	769,040
<i>magnetizační proud</i>	$I_\mu$	A	5,970	17,561	7,263	17,786
<b>PARAMETRY MOTORU (PRO PRACOVNÍ REŽIM)</b>						
<i>koeficient závislý na počtu pólů stroje</i>	$k_{\xi 1}$	-	1,550		1,550	
<i>rozteč cívky v polovině hloubky drážky</i>	$\tau_{c1}$	m	0,128		0,127	
<i>šířka vinutí</i>	$B$	m	0,010		0,010	
<i>délka čela vinutí</i>	$l_{\xi 1}$	m	0,219		0,217	
<i>koeficient vyložení čela dle počtu pólů</i>	$k_{B1}$	-	0,500		0,500	
<i>vyložení čel vinutí statoru</i>	$l_{B1}$	m	0,074		0,073	
<i>střední délka závitu</i>	$l_{zs}$	m	0,683		0,715	
<i>celková délka vodičů 1 fáze</i>	$L_s$	m	90,164		77,250	
<i>odpor 1 fpři 75°C</i>	$R_1$	$\Omega$	0,396		0,315	

<i>odpor v poměrných jednotkách</i>	$r_1$	p.u.	0,042		0,038	
<i>odpor tyče</i>	$R_t$	$\Omega$	5,4E-05		6,6E-05	
<i>odpor kruhu mezi tyčemi</i>	$R_{kn}$	$\Omega$	9,1E-07		9,7E-07	
<i>odpor jedné fáze rotoru</i>	$R_2$	$\Omega$	7,9E-05		9,2E-05	
<i>koeficient přepočtu impedancí</i>	$p_z$	-	3697,43		2475,13	
<i>odpor rotoru po přepočtu na stator</i>	$R_2'$	$\Omega$	0,293		0,230	
<i>v poměrných jednotkách</i>	$r_2'$	p.u.	0,031		0,028	
<i>koeficienty</i>	$k_\beta$	-	0,873		0,873	
	$k_\beta'$	-	0,830		0,830	
<i>rozměry drážky pro výpočet</i>	$h_0$	mm	0,600		0,600	
	$h_1$	mm	20,000		19,000	
	$h_2$	mm	3,000		2,000	
	$h_3$	mm	1,080		1,080	
	$b_0$	mm	3,100		3,100	
	$b$	mm	9,000		9,000	
<i>činitel magnetické vodivosti drážky statoru</i>	$\lambda_{ds}$	-	1,261		1,136	
<i>koeficient tlumení</i>	$\rho_{difs}$	-	0,800		0,800	
<i>činitel otevření drážky</i>	$k_{sl}$	-	0,956		0,956	
<i>činitel diferenčního rozptylu</i>	$\sigma_{difs}$		0,011		0,011	
<i>činitel náhradní vodivosti diferenčního rozptylu</i>	$\lambda_{difs}$	-	1,654		1,654	
<i>náhradní vodivost rozptylu čel</i>	$\lambda_{cs}$	-	1,215		1,046	
<i>celková náhradní vodivost statoru</i>	$\lambda_s$	-	4,130		3,836	
<i>rozptylová reaktance statoru</i>	$X_1$	$\Omega$	1,165		0,831	
<i>v poměrných jednotkách</i>	$x_1$	p.u.	0,123		0,100	
<i>rozměry drážky rotoru pro výpočet</i>	$h_0$	mm	0,400		0,400	
	$h_1$	mm	28,000		26,000	
	$h_3$	mm	1,000		1,000	
	$b$	mm	3,500		3,500	
	$b_0$	mm	1,500		1,500	
<i>jednotková magnetická vodivost drážky rotoru</i>	$\lambda_{dr}$	-	3,395		3,204	
<i>činitel vinutí rotoru</i>	$k_{vr}$	-	1,000		1,000	

<i>koeficient tlumení</i>	$\rho_{\text{difr}}$	-	1,000		1,000	
<i>činitel otevření drážky</i>	$k_{s2}$	-	1,000		1,000	
<i>koeficient diferenčního rozptylu</i>	$\sigma_{\text{difr}}$	-	0,006		0,006	
<i>náhradní magnetická vodivost diferenčního rozptylu rotoru</i>	$\lambda_{\text{dr}}$	-	1,887		1,887	
<i>náhradní rozptylová vodivost čel rotoru</i>	$\lambda_{\text{čr}}$	-	0,840		0,737	
<i>celková náhradní vodivost rotoru</i>	$\lambda_r$	-	6,123		5,829	
<i>rozptylová reaktance rotoru</i>	$X_2$	$\Omega$	3,1E-04		3,4E-04	
<i>přepočet na stator</i>	$X_2'$	$\Omega$	1,145		0,832	
<i>v poměrných jednotkách</i>	$x_2'$	p.u.	0,120		0,100	
<i>hlavní reaktance</i>	$X_{12}$	$\Omega$	37,360		30,837	
<i>v poměrných jednotkách</i>	$x_{12}$	p.u.	3,930		3,721	
<i>úhel zešikmení</i>	$\gamma$	$^\circ$	15,652		15,652	
<i>pomocný činitel</i>	$\varepsilon$	-	33,061		38,122	
<i>činitel zešikmení</i>	$\sigma_z$	-	1,102		1,118	
<i>rozptylová reaktance statoru s vlivem zešikmení</i>	$X_1$	$\Omega$	1,285		0,929	
<i>rozptylová reaktance rotoru s vlivem zešikmení</i>	$X_2$	$\Omega$	1,262		0,930	
<b>ZTRÁTY</b>						
<i>hmotnost jha statoru</i>	$G_{js}$	kg	21,019		25,821	
<i>hmotnost zubů statoru</i>	$G_{zs}$	kg	6,150		7,955	
<i>hmotnost zubů rotoru</i>	$G_{zr}$	kg	9,062		9,849	
<i>přídavný koeficient</i>	$k_{jz}$	-	1,600		1,600	
<i>ztráty ve jhu statoru</i>	$\Delta P_{Fej}$	kW	0,185		0,235	
<i>přídavný koeficient</i>	$k_{zz}$	-	1,800		1,800	
<i>ztráty v zubech statoru</i>	$\Delta P_{Fezs}$	kW	0,084		0,086	
<i>povrchové ztráty v zubech rotoru</i>	$\Delta P_{\delta pr}$	kW	0,018		0,022	
<i>koeficient materiálu</i>	$k_p$	-	2,000		2,000	
<i>koeficient pro kolísání indukce</i>	$\beta_0$	-	0,365		0,365	
<i>amplituda kolísání indukce</i>	$B_0$	T	0,290		0,316	
<i>povrchové ztráty na jednotku plochy</i>	$P_{\delta pr}$	W/m <sup>2</sup>	273,068		323,827	
<i>povrchové ztráty v zubech statoru</i>	$\Delta P_{\delta ps}$	kW	0,006		0,008	



<i>koeficient pro kolísání indukce</i>	$\beta_0$	-	0,250		0,250	
<i>amplituda kolísání indukce</i>	$B_0$	T	0,199		0,216	
<i>na jednotku plochy</i>	$P_{\delta ps}$	W/m <sup>2</sup>	112,223		133,084	
<i>pomocný koeficient</i>	$\gamma_1$	-	3,992		3,992	
<i>amplituda pulzace</i>	$B_{p2}$	T	0,086		0,092	
<i>tepavé ztráty v zubech rotoru</i>	$\Delta P_{zr}$	kW	0,022		0,027	
<i>pomocný koeficient</i>	$\gamma_2$	-	1,333		1,333	
<i>amplituda pulzace</i>	$B_{p1}$	T	0,028		0,025	
<i>tepavé ztráty v zubech statoru</i>	$\Delta P_{zs}$	kW	0,003		0,003	
<i>hlavní ztráty v železe statoru</i>	$\Delta P_{Fel}$	kW	0,269		0,321	
<i>přídavné ztráty</i>	$\Delta P_{Fed}$	kW	0,048		0,060	
<i>ztráty v železe</i>	$\Delta P_{Fe}$	kW	0,317		0,380	
<i>koeficient</i>	$k_T$	-	7,000		7,000	
<i>mechanické a ventilační ztráty</i>	$\Delta P_m$	kW	0,098		0,098	
<i>ztráty ve vinutí statoru naprázdno</i>	$\Delta P_{jo}$	kW	0,042		0,050	
<i>ztráty naprázdno</i>	$\Delta P_o$	kW	0,458		0,529	
<i>přídavné ztráty</i>	$\Delta P_d$	kW	0,065		0,075	
<i>činná složka proudu naprázdno</i>	$I_{Fe}$	A	0,663		0,766	
<i>proud naprázdno motoru</i>	$I_o$	A	6,007		7,303	
<i>účinník naprázdno</i>	$\cos \phi$	-	0,110		0,105	

## Příloha C

Tato příloha shrnuje jednotlivé šablony pro návrh AS v RMxprt. Záložky jsou zobrazeny pro stroj o typovém výkonu 13 kW.

*Šablona Machine (Stroj)*

Machine			
	Name	Value	Unit
	Machine Type	Three Phase Induction Motor	
	Number of Poles	4	
	Stray Loss Fac...	0.005	
	Frictional Loss	20	W
	Windage Loss	80	W
	Reference Sp...	1500	rpm

Obr. C1: Šablona Machine. [7]

*Šablona Stator*

Stator			
	Name	Value	Unit
	Outer Diameter	291	mm
	Inner Diameter	184	mm
	Length	123	mm
	Stacking Factor	0.95	
	Steel Type	D21_50	
	Number of Slots	36	
	Slot Type	3	
	Lamination Se...	1	
	Press Board T...	0	mm
	Skew Width	0	

Obr. C2: Šablona Stator. [7]

*Šablona Slot (Drážka)*

Slot			
	Name	Value	Unit
	Auto Design	<input type="checkbox"/>	
	Parallel Tooth	<input type="checkbox"/>	
	Hs0	0.6	mm
	Hs1	1.08	mm
	Hs2	23.82	mm
	Bs0	3.1	mm
	Bs1	9	mm
	Bs2	13.15	mm
	Rs	0	mm

**Obr. C3: Šablona Slot. [7]**

*Šablona Winding (Vinutí)*

Winding   End/Insulation			
	Name	Value	Unit
	Winding Layers	2	
	Winding Type	Whole-Coiled	
	Parallel Branches	1	
	Conductors per Slot	20	
	Coil Pitch	7	
	Number of Strands	0	
	Wire Wrap	0.11	mm
	Wire Size	Diameter: 1.45mm	

**Obr. C4: Šablona Winding. [7]**

Winding		End/Insulation	
Name	Value	Unit	
Input Half-tum Length	<input type="checkbox"/>		
End Extension	10	mm	
Base Inner Radius	10	mm	
Tip Inner Diameter	5	mm	
End Clearance	5	mm	
Slot Liner	0.54	mm	
Wedge Thickness	2.56	mm	
Layer Insulation	0.27	mm	
Limited Fill Factor	0.73		

Obr. C5: Šablona Winding – End/Insulation. [7]

*Šablona Rotor*

Rotor			
Name	Value	Unit	
Stacking Factor	0.95		
Number of Slots	46		
Slot Type	1		
Outer Diameter	183.1	mm	
Inner Diameter	60	mm	
Length	128	mm	
Steel Type	D21_50		
Skew Width	1		
Cast Rotor	<input type="checkbox"/>		
Half Slot	<input type="checkbox"/>		
Double Cage	<input type="checkbox"/>		

Obr. C6: Šablona Rotor. [7]

*Šablona Slot (rotor)*

Slot			
	Name	Value	Unit
	Hs0	0.4	mm
	Hs01	0	mm
	Hs2	28	mm
	Bs0	1.5	mm
	Bs1	3.5	mm
	Bs2	3.5	mm

**Obr. C7: Šablona Slot (rotor). [7]**

*Šablona Winding (Vinutí)*

Winding			
	Name	Value	Unit
	Bar Conductor Type	aluminum_EC	
	End Length	0	mm
	End Ring Width	14	mm
	End Ring Height	33	mm
	End Ring Conduct...	aluminum_EC	

**Obr. C8: Šablona Winding (rotor) . [7]**

*Šablona Shaft (Hřídel)*

Shaft			
	Name	Value	Unit
	Magnetic Shaft	<input type="checkbox"/>	

**Obr. C9: Šablona Shaft. [7]**

Šablona Analysis Setup (Nastavení analýzy)

General		IndM3	
	Name	Value	Unit
	Name	Setup 1	
	Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Operation Type	Motor	
	Load Type	Fan Load	
	Rated Output ...	13	kW
	Rated Voltage	400	V
	Rated Speed	1450	rpm
	Operating Tem...	115	cel

Obr. C10: Šablona Analysis Setup - General. [7]

General		IndM3	
	Name	Value	Unit
	Winding Conn...	Delta	
	Frequency	50	Hz

Obr. C11: Šablona Analysis Setup – IndM3. [7]

# Příloha D

Výsledné hodnoty získané simulací v RMxprt

**Tab. D1: Data z RMxprt pro stroj 13 kW. [7]**

GENERAL DATA	
Given Output Power (kW):	13
Rated Voltage (V):	400
Winding Connection:	Wye
Number of Poles:	4
Given Speed (rpm):	1460
Frequency (Hz):	50
Stray Loss (W):	65
Frictional Loss (W):	20
Windage Loss (W):	80
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:	D21_50
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):	0
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> ):	236.973
Slot Fill Factor (%):	61.6172
Limited Slot Fill Factor (%):	75
Wire Resistivity (ohm.mm <sup>2</sup> /m):	0.0217
Conductor Length Adjustment (mm):	0
End Length Correction Factor	1
End Leakage Reactance Correction Factor	1
<b>ROTOR DATA</b>	
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
hs2 (mm):	28
bs0 (mm):	1.5
bs1 (mm):	3.5
bs2 (mm):	3.5
rs (mm):	1.75
Cast Rotor:	No
Half Slot:	No
Length of Rotor (mm):	123
Stacking Factor of Rotor Core:	0.97
Type of Steel:	D21_50
Skew Width:	1
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):	0.0487805
Resistivity of Rotor Ring at 75 Centigrade (ohm.mm <sup>2</sup> /m):	0.0487805



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> ):	7820
Rotor Core Steel Density (kg/m <sup>3</sup> ):	7820
Armature Copper Weight (kg):	11.1288
Rotor Bar Material Weight (kg):	1.61795
Rotor Ring Material Weight (kg):	1.17016
Armature Core Steel Weight (kg):	28.1008
Rotor Core Steel Weight (kg):	17.3834
Total Net Weight (kg):	59.4011
Armature Core Steel Consumption (kg):	55.8362
Rotor Core Steel Consumption (kg):	24.809
RATED-LOAD OPERATION	
Stator Resistance (ohm):	0.416111
Stator Resistance at 20C (ohm):	0.303166
Stator Leakage Reactance (ohm):	0.574401
Rotor Resistance (ohm):	0.300745
Rotor Resistance at 20C (ohm):	0.219115
Rotor Leakage Reactance (ohm):	0.834032
Resistance Corresponding to Iron-Core Loss (ohm):	420.358
Magnetizing Reactance (ohm):	23.4508
Stator Phase Current (A):	23.8271
Current Corresponding to Iron-Core Loss (A):	0.513248
Magnetizing Current (A):	9.20004
Rotor Phase Current (A):	20.759
Copper Loss of Stator Winding (W):	708.718
Copper Loss of Rotor Winding (W):	388.805
Iron-Core Loss (W):	332.197
Frictional and Windage Loss (W):	99.3699
Stray Loss (W):	65
Total Loss (W):	1594.09
Input Power (kW):	14.4987
Output Power (kW):	12.9046
Mechanical Shaft Torque (N.m):	84.6096
Efficiency (%):	89.0053

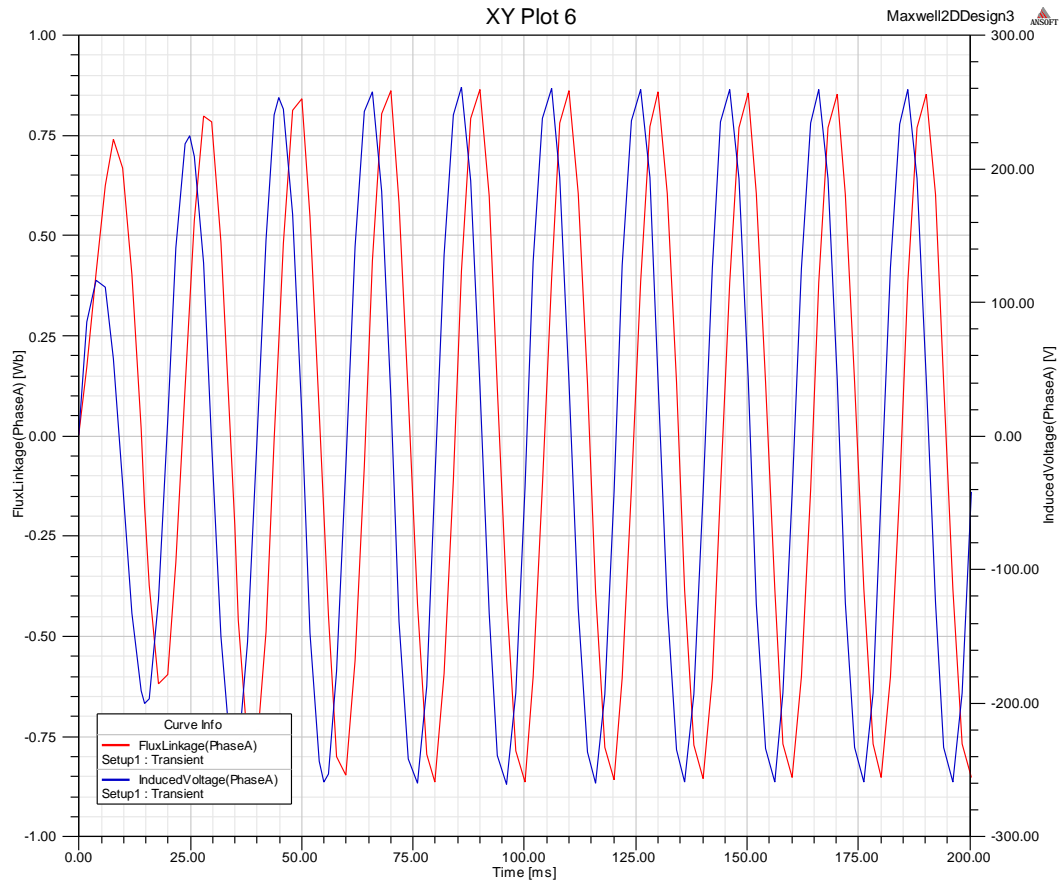
Power Factor:	0.87435
Rated Slip:	0.029031
Rated Shaft Speed (rpm):	1456.45
NO-LOAD OPERATION	
No-Load Stator Resistance (ohm):	0.416111
No-Load Stator Leakage Reactance (ohm):	0.576133
No-Load Rotor Resistance (ohm):	0.300628
No-Load Rotor Leakage Reactance (ohm):	0.837355
NO-LOAD OPERATION	
No-Load Stator Phase Current (A):	9.62343
No-Load Iron-Core Loss (W):	361.605
No-Load Input Power (W):	646.139
No-Load Power Factor:	0.0871624
No-Load Slip:	0.000205541
No-Load Shaft Speed (rpm):	1499.69
BREAK-DOWN OPERATION	
Break-Down Slip:	0.27
Break-Down Torque (N.m):	293.039
Break-Down Torque Ratio:	3.46343
Break-Down Phase Current (A):	119.455
LOCKED-ROTOR OPERATION	
Locked-Rotor Torque (N.m):	223.986
Locked-Rotor Phase Current (A):	172.356
Locked-Rotor Torque Ratio:	2.64729
Locked-Rotor Current Ratio:	7.23359
LOCKED-ROTOR OPERATION	
Locked-Rotor Stator Resistance (ohm):	0.416111
Locked-Rotor Stator Leakage Reactance (ohm):	0.468674
Locked-Rotor Rotor Resistance (ohm):	0.416626
Locked-Rotor Rotor Leakage Reactance (ohm):	0.606448
DETAILED DATA AT RATED OPERATION	
Stator Slot Leakage Reactance (ohm):	0.228774
Stator End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.201373
Stator Differential Leakage Reactance (ohm):	0.144254
Rotor Slot Leakage Reactance (ohm):	0.497359
Rotor End-Winding Leakage Reactance (ohm):	0.0846889
Rotor Differential Leakage Reactance (ohm):	0.179451
Skewing Leakage Reactance (ohm):	0.0725342
DETAILED DATA AT RATED OPERATION	
Stator Winding Factor:	0.901912

Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.62598
Rotor-Teeth Flux Density (Tesla):	1.39548
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	1.40342
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	1.26055
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.72396
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T):	144.677
Rotor-Teeth Ampere Turns (A.T):	50.5061
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T):	89.8247
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T):	16.2971
Air-Gap Ampere Turns (A.T):	321.329
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Stator Yoke:	0.49143
Correction Factor for Magnetic Circuit Length of Rotor Yoke:	0.431137
Saturation Factor for Teeth:	1.60742
Saturation Factor for Teeth & Yoke:	1.93768
Induced-Voltage Factor:	0.934216
Stator Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	4.80977
Specific Electric Loading (A/mm):	29.6781
Stator Thermal Load (A <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> ):	142.745
Rotor Bar Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	2.78283
Rotor Ring Current Density (A/mm <sup>2</sup> ):	2.32918
Half-Turn Length of Stator Winding (mm):	350.573
<b>WINDING ARRANGEMENT</b>	
The 3-phase, 2-layer winding can be arranged in 9 slots as below:	
AAAZZZBBB	
Angle per slot (elec. degrees):	20
Phase-A axis (elec. degrees):	90
First slot center (elec. degrees):	0
<b>TRANSIENT FEA INPUT DATA</b>	
For one phase of the Stator Winding:	
Number of Turns:	120
Parallel Branches:	1
Terminal Resistance (ohm):	0.416111
End Leakage Inductance (H):	0.00064099

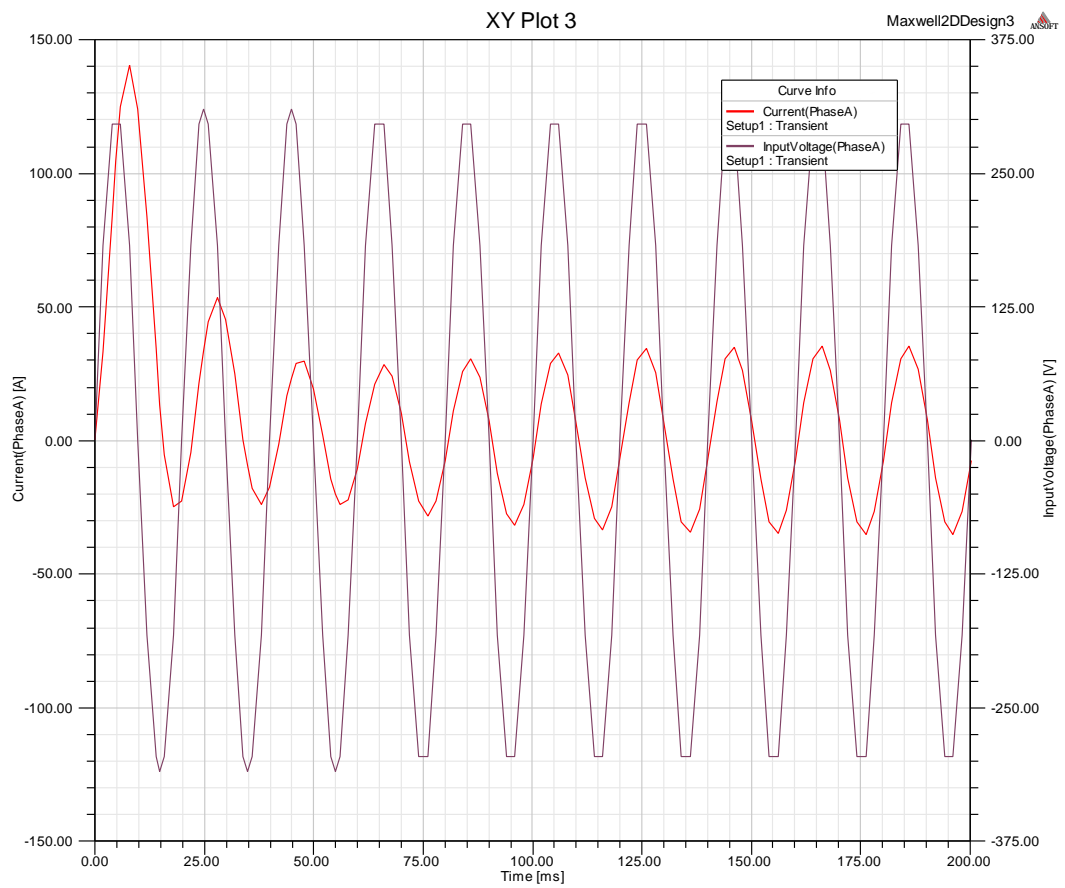
For Rotor End Ring Between Two Bars of One Side:	
Equivalent Ring Resistance (ohm):	1.21552e-006
Equivalent Ring Inductance (H):	6.06091e-009
2D Equivalent Value:	
Equivalent Model Depth (mm):	123
Equivalent Stator Stacking Factor:	0.97
Equivalent Rotor Stacking Factor:	0.97
Estimated Rotor Inertial Moment (kg m <sup>2</sup> ):	0.105865

# Příloha E

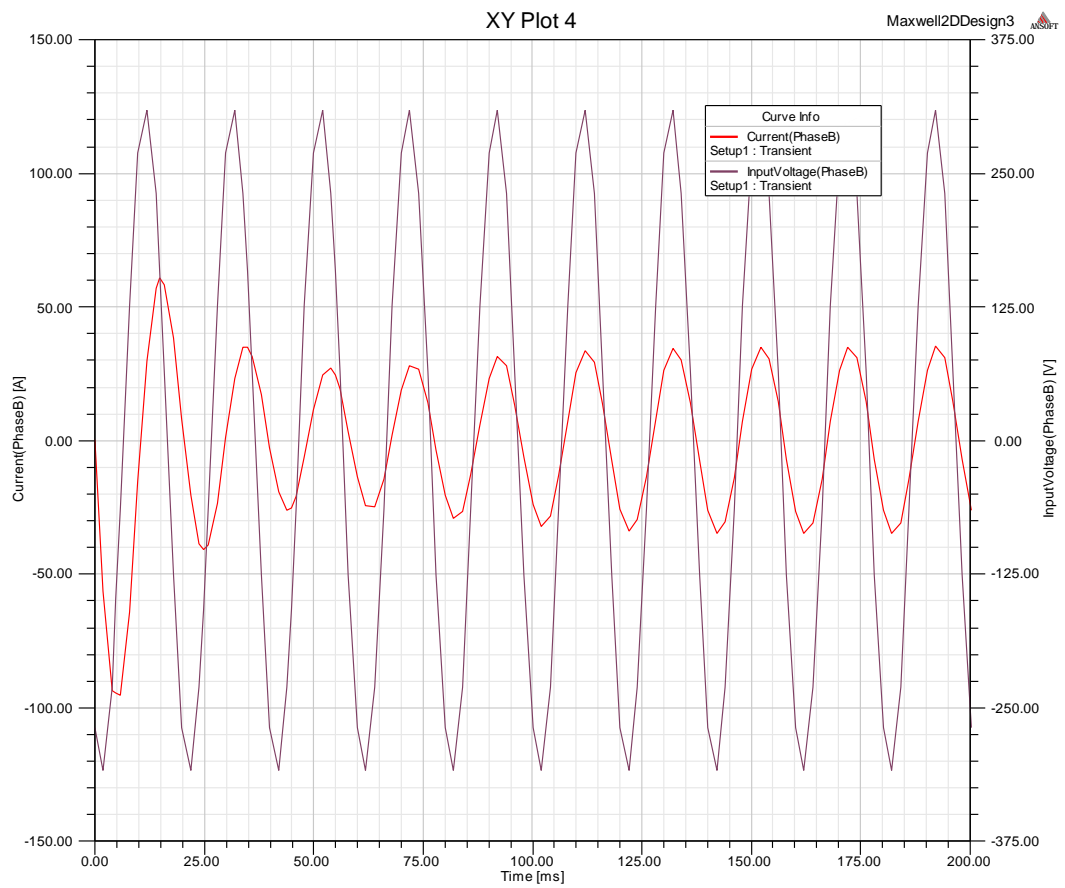
Předmětem této přílohy jsou některé výsledné záznamy ze simulací 3D modelu v Maxwell 3D.



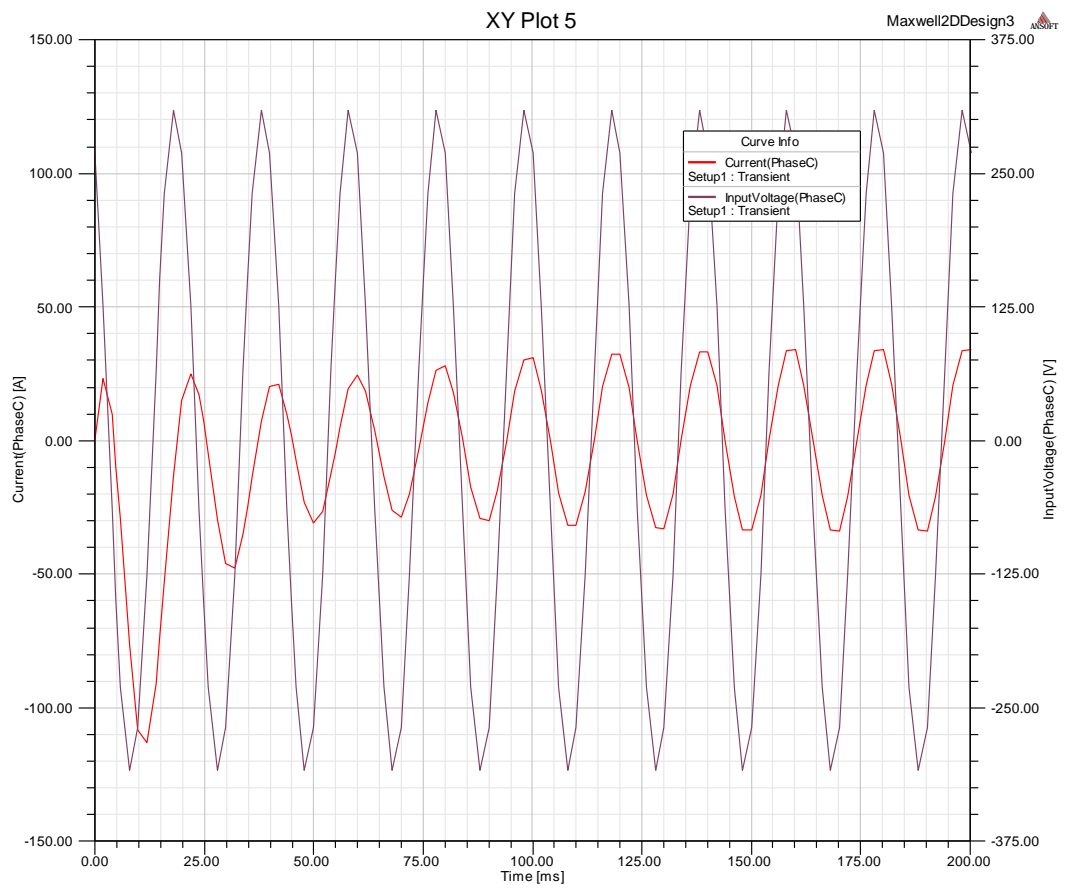
Obr. E1: Časový průběh indukovaného napětí a spřaženého magnetického toku ve fázi A. [9]



Obr. E2: Časový průběh napětí a proudu ve fázi A. [9]

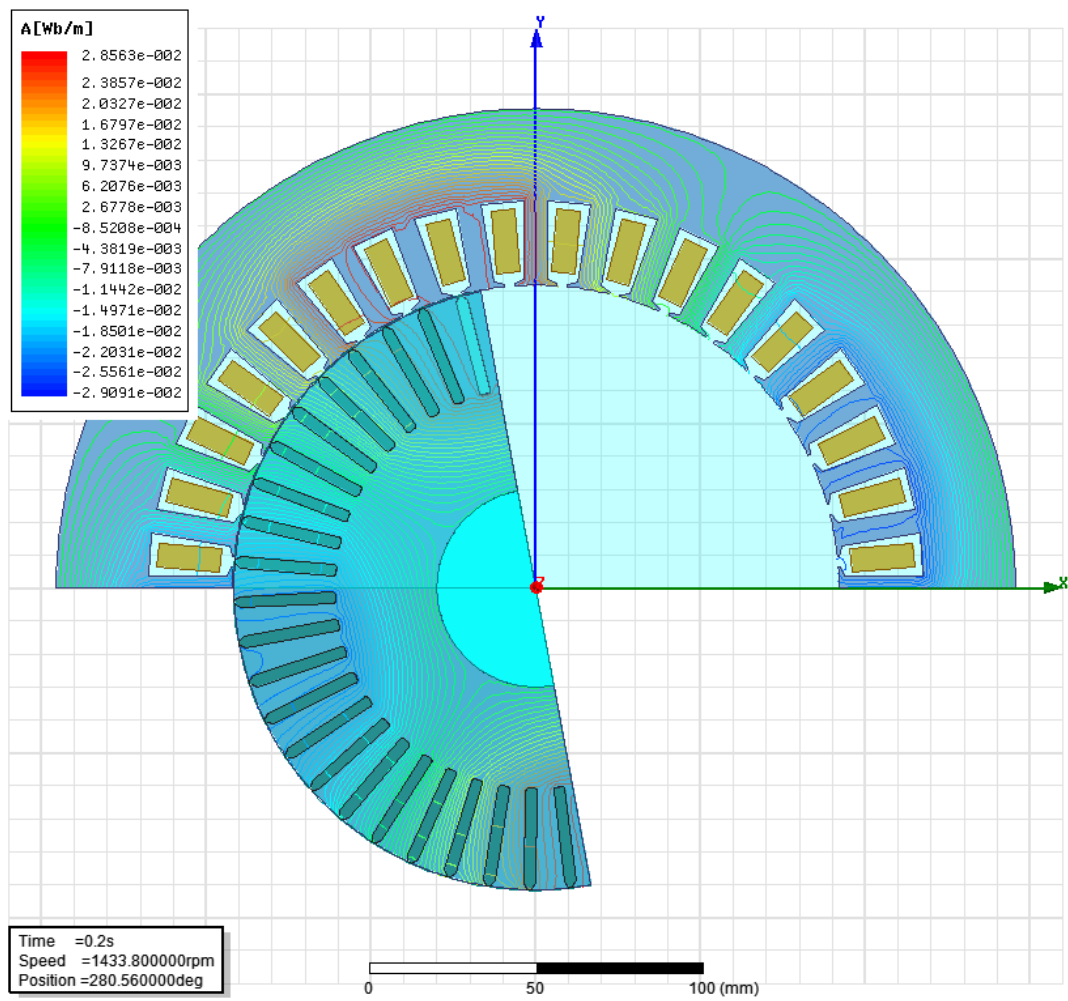


**Obr. E3: Časový průběh napětí a proudu ve fázi B. [9]**



**Obr. E4: Časový průběh napětí a proudu ve fázi C. [9]**





Obr. E5: Siločáry magnetického pole v čase 200 ms. [9]