



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY

DESIGN OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Bureš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Petr Bureš

ID: 161285

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh synchronního stroje s permanentními magnety

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip funkce a konstrukci synchronních strojů s permanentními magnety (PM) na rotoru a to jak s rozloženým, tak i se soustředěným statorovým vinutím.
2. Proveďte návrh synchronního stroje s PM s rozloženým a také se soustředěným vinutím.
3. Parametry navrženého stroje ověřte v programu RMxprt a metodou konečných prvků v programu Maxwell.
4. Srovnajte výsledky a posuďte použitou metodu návrhu a výpočtu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Hendershot, J. R. Jr., Miller, T.J.E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford: Magna Physic Publishing and Clarendon Press, 1994.

[2] Vorel, P. Synchronní stroje s permanentními magnety. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-7204-417-6

[3] Petrov, G.N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia. 1982.

[4] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.

Dále dle pokynu vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Vzhledem k dnešnímu trendu je šetření životním prostředím na prvním místě. V oblasti točivých elektrických strojů se tedy ve prospěch této skutečnosti projevuje snaha vytvářet stroje s co možná nejvyšší účinností, a tak synchronní stroje s permanentními magnety jakožto představitelé strojů s velmi vysokou účinností postupně nahrazují ostatní stroje v mnoha aplikacích. Synchronní stroje disponují výhodou v účinné regulaci. Tato práce se zabývá seznámením s vlastnostmi synchronních strojů s permanentními magnety a také jejich konstrukcí. Hlavním zaměřením této práce je návrh elektricky komutovaného synchronního stroje s permanentními magnety a dosažené výsledky porovnat s výsledky získanými analýzou v programu Ansys RMXprt a Maxwell. Nakonec je provedeno porovnání výsledků metod návrhu.

Klíčová slova

Synchronní stroj s permanentními magnety, EC motor, BLDC, bezkartáčový stejnosměrný motor, elektricky komutovaný motor, Ansys RMXprt

Abstract

Given today's trend with environment being very important, there has been an ongoing attempt in the rotating machine industry to create machines with highest efficiency possible. And so, permanent magnet synchronous machines represent types of machine with very high efficiency and are gradually replacing other machines in many applications. This work deals with familiarization of the properties of permanent magnet synchronous motor as well as typical design choices. The main focus of this work is the design of permanent magnet EC motor and following comparison of results obtained from analytical design and analysis in the RMXprt program. Finally, the results of design methods are compared.

Keywords

Permanent magnet synchronous motor, EC motor, BLDC, brushless DC motor, Ansys RMXprt

Bibliografická citace:

BUREŠ, P. Návrh synchronního stroje s permanentními magnety. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 89s. Vedoucí práce: doc. Ing Ondřej Vítek, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Návrh synchronního stroje s permanentními magnety jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **21. května 2018**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 21. května 2018

.....
podpis autora(-ky)

Obsah

Úvod	1
1 Synchronní stroje s permanentními magnety	2
1.1 Princip funkce	2
1.1.1 Provedení synchronních strojů s PM	4
2 Konstrukce synchronních strojů s permanentními magnety	7
2.1 Stator	7
2.1.1 Statorové plechy	8
2.1.2 Magnetizační charakteristika	8
2.2 Rotor	9
2.2.1 Provedení rotoru	9
2.2.2 Permanentní magnety	12
2.3 Vinutí synchronních strojů s permanentními magnety	13
2.3.1 Rozložená vinutí	15
2.3.2 Soustředěná vinutí	16
3 Návrh synchronního stroje s permanentními magnety	18
3.1 Stroj s rozloženým vinutím	19
3.2 Úprava původního stroje	35
3.3 Stroj s jednovrstvým soustředěným vinutím	46
3.4 Stroj s dvouvrstvým soustředěným vinutím – první varianta	54
3.5 Stroj s dvouvrstvým soustředěným vinutím – druhá varianta	63
3.6 Zhodnocení výsledků	70
3.6.1 Zhodnocení výsledků návrhů	70
3.6.2 Posouzení použitých metod	72
Závěr	74
Literatura	76

Seznam obrázků

Obr. č. 1 - Ukázka provedení stroje s vnějším rotorem a vnitřním rotorem.....	10
Obr. č. 2 - Ukázka provedení permanentních magnetů na rotoru	11
Obr. č. 3 - Ukázka provedení smyčkového rozloženého vinutí	15
Obr. č. 4 - Ukázka provedení vlnového rozloženého vinutí	16
Obr. č. 5 - Provedení soustředěného vinutí jednovrstvého a dvouvrstvého	17
Obr. č. 6 - Znázornění tvaru statorového plechu s příslušnými rozměry	19
Obr. č. 7 - Magnetizační charakteristika magnetu N35H	20
Obr. č. 8 - Ideové znázornění střední délky závitů	21
Obr. č. 9 - Rozložení magnetické indukce v prvním stroji	31
Obr. č. 10 - Průběhy proudů první varianty stroje	32
Obr. č. 11 - Průběh indukovaného napětí první varianty stroje	32
Obr. č. 12 - Průběh momentu v závislosti na čase pro první variantu stroje	33
Obr. č. 13 - Charakteristika reluktančního momentu pro první stroj	33
Obr. č. 14 - Orientační náčrt znázorňující počítané rozměry drážky	37
Obr. č. 15 - Orientační náčrt znázornění geometrie statorového plechu druhého stroje	38
Obr. č. 16 - Rozložení magnetické indukce u druhé varianty návrhu	43
Obr. č. 17 - Průběhy proudů druhé varianty stroje	43
Obr. č. 18 - Průběh indukovaného napětí ve druhé variantě stroje	44
Obr. č. 19 - Průběh momentu pro druhou variantu stroje	44
Obr. č. 20 - Orientační znázornění geometrie statorového plechu třetího stroje	48
Obr. č. 21 - Rozložení magnetické indukce ve třetí variantě stroje	52
Obr. č. 22 - Tvar indukovaného napětí jedné fáze pro třetí variantu motoru	52
Obr. č. 23 - Průběh proudů třetí varianty stroje	53
Obr. č. 24 - Průběh momentu třetí varianty stroje	53
Obr. č. 25 - Znázornění využití zástavbového prostoru	55
Obr. č. 26 - Orientační znázornění geometrie statorového plechu čtvrtého stroje	57
Obr. č. 27 - Rozložení magnetické indukce ve čtvrtém stroji	60
Obr. č. 28 - Průběh indukovaného napětí ve čtvrtém stroji	61
Obr. č. 29 - Průběh proudů ve čtvrtém stroji	61
Obr. č. 30 - Průběh momentu ve čtvrtém stroji	62
Obr. č. 31 - Orientační znázornění geometrie statorového plechu pátého stroje	63
Obr. č. 32 - Rozložení magnetické indukce v pátém stroji	68
Obr. č. 33 - Průběh indukovaného napětí v pátém stroji	68
Obr. č. 34 - Průběh tvarů proudů v pátém stroji	69
Obr. č. 35 - Vyobrazení tvaru momentu v pátém stroji	69
Obr. č. 36 - Porovnání účinnosti strojů	71

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 - Vlastnosti permanentního magnetu N35H při 60 °C	20
Tabulka č. 2 - Shrnutí parametrů vinutí	21
Tabulka č. 3 - Shrnutí parametrů rotoru	22
Tabulka č. 4 - Shrnutí vypočtených hodnot a výsledků simulace	28
Tabulka č. 5 - Shrnutí vypočtených hodnot a výsledků simulace po provedení korekce.....	30
Tabulka č. 6 - Souhrn výsledků prvotního návrhu stroje	34
Tabulka č. 7 - Výsledky ručního návrhu a hodnoty vypočtené v RMxpřt	42
Tabulka č. 8 - Souhrn výsledků druhé varianty návrhu stroje	45
Tabulka č. 9 - Porovnání ručního návrhu a výsledků z RMxpřt pro třetí stroj	51
Tabulka č. 10 - Souhrn výsledků třetí varianty návrhu stroje	54
Tabulka č. 11 - Porovnání ručního návrhu a výsledků z RMxpřt pro čtvrtý stroj	60
Tabulka č. 12 - Souhrn výsledků čtvrté varianty návrhu stroje	62
Tabulka č. 13 - Porovnání ručního návrhu a výsledků z RMxpřt pro pátý stroj	67
Tabulka č. 14 - Souhrn výsledků páté varianty návrhu stroje	70

Seznam použitých symbolů a zkratek

$2p$	počet pólů	[–]
a	počet paralelních větví	[–]
b_{ds}	šířka drážky statoru odpovídající střednímu poloměru	[mm]
b_{zs}	šířka zubu statoru	[mm]
B_M	magnetická indukce magnetu	[T]
B_δ	magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
B_{zs}	magnetická indukce v zubu statoru	[T]
B_{js}	magnetická indukce ve jhu statoru	[T]
B_{jr}	magnetická indukce v rotorovém jhu	[T]
c_s	počet statorových cívek	[–]
c_f	počet cívek jedné fáze	[–]
c_k	cívkový krok	[–]
d_{ry}	průměr oceli rotoru	[mm]
d_{ro}	vnější průměr rotoru	[mm]
d_{si}	vnitřní průměr statoru	[mm]
d_{so}	vnější průměr statoru	[mm]
d_v	průměr vodiče	[mm]
f	frekvence	[Hz]
f_{emf}	frekvence indukce napětí	[Hz]
f_{kom}	frekvence komutace	[Hz]
H_c	koercitivní síla	[Am ⁻¹]
h_{jr}	výška jha rotoru	[mm]
h_{js}	výška jha statoru	[mm]
I_{demag}	demagnetizační proud	[A]
I_{ef}	efektivní hodnota elektrického proudu	[A]
I_n	jmenovitý elektrický proud	[A]
I_{max}	maximální hodnota proudu při jmenovitých otáčkách	[A]
I_{tot}	velikost celkového proudu	[A]
k	konstanta	[–]
k_E	EMF konstanta	$\left[\frac{Vs}{rad} \right]$
$k_{p,Cu}$	činitel plnění mědi	[–; %]
k_T	momentová konstanta	$\left[\frac{Nm}{A} \right]$
l_ξ	výška čela vinutí	[mm]
l_{Fe}	délka železa	[mm]
l_p	délka pólu	[mm]

l_{PM}	výška permanentního magnetu	[mm]
l_{z1}	délka oblouku spojujícího dvě drážky	[mm]
l_z	střední délka závitů	[mm]
m	hmotnost, počet fází	[kg; -]
m_s	hmotnost statoru	[kg]
N	počet vodičů	[-]
N_{1f}	počet vodičů jedné fáze	[-]
N_{dr}	počet vodičů v drážce	[-]
n	jmenovité otáčky stroje	[min ⁻¹]
n_0	otáčky naprázdno	[min ⁻¹]
p	počet pólpárů	[-]
Q	počet drážek	[-]
Q_s	počet drážek statoru	[-]
r_δ	střední poloměr vzduchové mezery	[mm]
r_{ds}	střední poloměr statorové drážky	[mm]
r_{ro}	vnější poloměr rotoru	[mm]
R	elektrický odpor	[Ω]
$R_{cívky}$	odpor cívky	[Ω]
$R_{fáze}, R_f$	odpor jedné fáze	[Ω]
R_n	odpor vnitřního obvodu měniče	[Ω]
R_v	odpor vinutí	[Ω]
S_{dr}	plocha drážky	[mm ²]
S_{PM}	plocha magnetického pólu	[mm ²]
S_v	průřez vodiče	[mm ²]
T_{kom}	perioda komutace	[ms]
U	elektrické napětí	[V]
U_{ifmax}	maximální indukované napětí jedné fáze	[V]
U_n	jmenovité napětí sítě	[V]
V_{dr}	ekvivalentní objem statorových drážek	[m ³]
$V_{Fe,jr}$	objem rotorového jha	[m ³]
$V_{Fe,js}$	objem jha statoru	[m ³]
$V_{Fe,zs}$	objem zubů statoru	[m ³]
V_s	objem statoru	[m ³]
X_s	synchronní reaktance	[Ω]
Z	celkový počet závitů	[-]
Z_{1c}	počet závitů jedné cívky	[-]
α	úhel, teplotní koeficient odporu	[°; K ⁻¹]
β	zátěžný úhel	[°]
γ	úhel	[°]

δ	výška vzduchové mezery	[mm]
$\Delta p_{1,0}$	měrné ztráty	[Wkg ⁻¹]
ΔP_{Cu}	ztráty v mědi	[W]
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	[W]
$\Delta P_{Fe,jr}$	ztráty v železe jha rotoru	[W]
$\Delta P_{Fe,js}$	ztráty v železe jha statoru	[W]
$\Delta P_{Fe,zs}$	ztráty v železe statorových zubů	[W]
ΔP_{celk}	celkové ztráty	[W]
ΔP_{mech}	mechanické ztráty	[W]
ΔP_{solid}	ztráty v plných částech	[W]
$\Delta n_{\%}$	procentuální změna otáček	[%]
η	účinnost	[%]
σ	hustota vodivého proudu	$\left[\frac{A}{mm^2} \right]$
ϕ	magnetický tok	[Wb]
ω	úhlová rychlost	$\left[\frac{rad}{s} \right]$
ω_0	úhlová rychlost naprázdno	$\left[\frac{rad}{s} \right]$
ω_s	synchronní úhlová rychlost	$\left[\frac{rad}{s} \right]$
MKP	metoda konečných prvků	

ÚVOD

První historické zmínky o systémech buzených permanentními magnety se datují přibližně do první třetiny devatenáctého století, kdy pruský fyzik Moritz Hermann von Jakobi, jako jeden z průkopníků v oblasti elektrických strojů, sestavil jeden z prvních točivých elektrických strojů s podobnou konstrukcí těm, které známe dnes. Kombinací stacionárních a rotujících elektromagnetů společně s cívkami protékanými proudem, který se přepínal díky speciálnímu komutátoru, bylo umožněno vytvořit krouticí moment stroje schopného uzvednout dvanáctilibrové těleso rychlostí jedné stopy za sekundu (přibližně 15 W mechanického výkonu).

Dosavadní poznatky v oblasti elektrických strojů vzápětí rozpoutaly závod vynálezců o sestrojení účinnějšího elektromotoru, ale vzhledem k tehdejšímu magnetickým materiálům s limitujícími vlastnostmi, se vývoj ubíral ve prospěch elektricky buzených strojů, zejména pak strojů indukčních.

Výroba strojů s permanentními magnety byla oživena až o sto let později s použitím Alnico magnetů. Produkce však byla omezena na malé stejnosměrné komutátorové motory. Podobně taktéž našly využití malé cize buzené DC motory s feritovými magnety. V druhé polovině dvacátého století se rovněž začaly objevovat první články zabývající se problematikou synchronních strojů s použitím permanentních magnetů na rotoru, a takto konstruované stroje pomalu nacházely využití ve specifických aplikacích.

Až rapidní vývoj spínací polovodičové řídicí elektroniky ve sféře elektrických pohonů v období posledních let umožnil náhradu klasických stejnosměrných elektrických strojů za stroje bezkartáčové. Díky pokroku v měničové technice se synchronní stroj odpoutává od klasického síťového provozu, a nachází rozmanité možnosti uplatnění v mnoha režimech. Tímto se výrazně rozšiřuje pole působnosti strojů s permanentními magnety zejména v oblastech robotiky, pohonů trakce či automobilové techniky.

Nyní představují synchronní stroje s permanentními magnety, vzhledem na danou aplikaci, vhodnou alternativu běžných stejnosměrných či asynchronních strojů. Právě ve srovnání s těmito stroji totiž dovedou nabídnout např. práci ve velkém rozsahu otáček, vysokou účinnost, či příznivější poměr velikost/výkon.

1 SYNCHRONNÍ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Ve sféře elektrických pohonů charakterizovaných řízenou regulací otáček byly dlouhou dobu dominantní skupinou stejnosměrné stroje. Zmíněné stroje však s sebou mimo jiné také nesou řadu nectností, zejména v přenosu elektrické energie na rotující soustavu za pomoci komutátoru. Tato konstrukce pro svou správnou funkci vyžaduje pravidelnou údržbu, která může zapříčinit nepříznivé odstávky stroje a v neposlední řadě právě přítomnost kluzného kontaktu představuje soustavu se značně kratší životností (případně servisní periodou) oproti ostatním částem stroje.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, s pokrokem v oblasti měničové techniky se začaly dostávat do popředí stroje s permanentními magnety na rotoru, které byly díky své konstrukci schopny eliminovat některé neduhy dosud používaných pohonů. Právě na základě klasického stejnosměrného stroje byl vytvořen motor elektricky komutovaný. Hlavní vinutí bylo uloženo ve statorových drážkách a rotující část se osadila permanentními magnety, čímž odpadla problematika přívádění elektrické energie na rotor. Samotná komutace je u takového stroje zajištěna pomocí měniče.

Na konstrukci EC motoru navázalo provedení synchronního stroje s permanentními magnety, pracujícího se sinusovými průběhy veličin. Takový stroj je dnes znám pod zkratkou PMSM. Obě tato provedení s sebou ke svému přednostem nesou také jisté nevýhody – jejich cena je úzce spjata s vývojem ceny permanentních magnetů a funkce těchto strojů je závislá na přítomnosti měniče. Druhá z nevýhod je však často eliminována díky aplikacím typickým pro tyto stroje, neboť jsou často používány s požadavkem práce v dynamickém rozsahu otáček, či automatizaci s požadavkem přesného polohování. V těchto případech je tedy přítomnost řídicí techniky samozřejmostí.

Podobnost základní konstrukce strojů PMSM a EC napovídá, že mnoho specifických vlastností těchto strojů bude záviset na provedení jednotlivých součástí stroje, napájení a řízení.

1.1 Princip funkce

Jakožto každý točivý elektrický stroj i synchronní stroj sestává ze dvou základních součástí, a to pevného statoru s vinutím a pohyblivé rotační části - rotoru. První ze zmiňovaných částí, obdobně jako u jiných točivých strojů, je tvořena segmenty dynamových plechů s drážkami, v nichž je uloženo vinutí. Vinutí synchronního stroje je nejčastěji provedeno jako trojfázové, kde jsou jednotlivé fáze vůči sobě posunuty o 120° elektrických a průchodem elektrického proudu vytváří točivé

magnetické pole. Takto vzniklé pole interaguje s konstantním magnetickým polem od magnetů a vzniká moment. Rotor stroje se následně otáčí synchronní rychlostí, jenž je přímo závislá na napájecí frekvenci a počtu pólů stroje. Synchronní úhlová rychlost točivého pole je tedy popsána vztahem:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (1.1)$$

kde f je frekvence napájecího napětí a p je počet pólpárů.

Je nutno podotknout, že synchronní stroj je tedy schopen pracovat pouze v synchronních otáčkách daných točivým polem statoru. Tak tomu je i při zatížení. Pokud zvyšujeme či snižujeme výkon provozovaného synchronního stroje, neovlivňujeme tím otáčky, ale pouze přítomné budící a točivé pole. Zmiňovaná změna výkonu následně ovlivní vzájemné působení polí tak, že mezi nimi vznikne vzájemný posun o úhel β , známý též jako zátěžný úhel.

Velikost úhlu β popisuje pracovní režimy synchronního stroje. Pokud vyjádříme moment synchronního stroje jako funkci zátěžného úhlu, bude vztah vypadat následovně:

$$M = \frac{U_1 \cdot U_0 \cdot m_1 \cdot \sin \beta}{\omega_1 \cdot X_s} \quad (1.2)$$

Pakliže předpokládáme konstantní úhlovou rychlost otáčení hřídele, konstantní svorkové napětí i buzení, vztah se zjednoduší na tvar:

$$M = k \cdot \sin \beta \quad (1.3)$$

kde $k = \frac{U_1 \cdot U_0 \cdot m_1}{\omega_1 \cdot X_s} = konst.$

Z výše uvedeného vyplývá, že při nulovém zátěžném úhlu není přítomen posun oněch vzájemně působících polí (nevzniká moment), a stroj tedy pracuje v nezatíženém stavu. Pokud platí $\beta > 0$, synchronní stroj pracuje v motorickém režimu a zátěžný úhel charakterizuje míru zpoždění rotoru za výsledným magnetickým tokem. Jestliže zátěžný úhel odpovídá $\beta < 0$, rotor předbíhá výsledné magnetické pole statoru a rotoru, stroj pracuje v generátorickém režimu. Právě velikost zátěžného úhlu je tedy stěžejní, zejména pak pokud dojde k navýšení zátěžného úhlu nad hodnotu $\beta_{max} = \pi/2$, odpovídající moment je roven momentu zvratu a stroj pracuje v poruchovém stavu – „vypadne ze synchronizmu“.

Synchronní stroje s permanentními magnety jsou z principu své konstrukce odkázány na skutečnost, že jejich napájení musí být prováděno na základě měniče, jehož složitost se odvíjí od typu a provedení motoru. Právě podle napájení a

pracovních průběhů je možno rozlišit nepoužívanější ze synchronních motorů s PM. Obě tato provedení tedy pro správnou funkci potřebují také snímání polohy rotoru, což figuruje jako informace pro řízení stroje.

Synchronní motory typu PMSM, známé rovněž jako bezkartáčové střídavé motory (brushless AC), jsou typické sinusovými průběhy indukovaného napětí a sinusovými průběhy fázových proudů. Tyto stroje dosahují nejvyšší hustoty momentu při řízení v příčné ose tak, že osa magnetického napětí statoru je kolmá k ose pólů rotoru. To však s sebou nese nutnost zajištění co nejpřesnějšího snímání polohy. K získání informace o okamžité poloze rotoru se u motorů typu PMSM používá resolveru či inkrementálního snímače (v některých aplikacích lze polohu snímat bezsenzorově). Sinusových průběhů proudů zde nejčastěji dosáhneme použitím pulsní šířkové modulace.

Ve srovnání s motorem typu PMSM je pak elektricky komutovaný motor, známý též jako bezkartáčový stejnosměrný motor (brushless DC), napájen proudy obdélníkových průběhů s použitím prosté komutace, kde vždy dvě ze tří fází jsou aktivní a ta zbývající komutuje. Řízení je pro EC motor tedy také jednodušší a levnější, čemuž napovídá i fakt, že pro zajištění správné funkce komutace postačí snímat polohu za použití tří Hallových sond nebo bezsenzorově. [16][17]

1.1.1 Provedení synchronních strojů s PM

Svou základní stavbou se příliš neliší od klasických synchronních strojů. Ve svazku statoru složeném z lamel dynamových plechů se nachází drážky, v nichž je uloženo hlavní vinutí. Rozdíl však přichází v podobě realizace buzení stroje – rotorový svazek v případě synchronních strojů s PM již nenese budicí vinutí napájené za pomoci stejnosměrného proudu procházejícího kartáči a kroužky, ale je osazen permanentními magnety zastávajícími budicí funkci. Již tímto rozdílem se ve své podstatě zdatelně zjednoduší konstrukce budicího celku a eliminují se také komplikace spojené s přívodem elektrické energie k budicí soustavě. Absence budicího vinutí rovněž eliminuje problematiku ztrát v tomto vinutí, ale je rovněž nutno podotknout, že použité PM nejsou bezeztrátovou součástí - za chodu v magnetech vznikají ztráty vyvolané vířivými proudy od časových a prostorových harmonických.

Při dělení synchronních strojů s permanentními magnety dle směru procházejícího magnetického toku můžeme rozlišovat tři hlavní typy:

1. Motory s radiálním tokem – nejhojněji používaný zástupce ze všech tří typů. Ve srovnání s ostatními je jeho výroba znatelně jednodušší a levnější, svou konstrukcí je nejpodobnější běžným točivým strojům. V drážkách lamelovaného statoru je uloženo hlavní vinutí, rotor je buďto také složen z plechů nebo plný. Na povrchu nebo uvnitř rotoru jsou připevněny magnety.
2. Motory s axiálním tokem – levné provedení motoru s velmi specifickým plochým diskovým tvarem nachází využití v aplikacích vyžadující velmi malou axiální délku stroje např. u pohonů jízdních kol či diskových jednotek. Běžně bývá sestaven z rotoru tvořeného jednolitým kovovým diskem, na němž jsou nalepeny magnety. Takovýto rotor je pak obklopen jedním či dvěma statory. Vinutí je buďto obsaženo na tištěné desce nebo je koncentricky navinuto okolo vyvedených zubů. Stroj s axiálním tokem bývá z důvodů jednolité diskové konstrukce jha odkázán na použití do 1000ot/min. Existují sice návrhy úprav, které by eliminovaly provozní nevýhody, ale náklady na výrobu a výrobní doba pak neúměrně roste, stroj s axiálním tokem tedy v praxi nenašel široké spektrum využití.
3. Motory s transversálním tokem – varianta stroje s nejmenším podílem zastoupení v praxi. Stator takového stroje je složen ze sestavy U a I-jader, jejichž vinutí tvoří pouze jediná cívka. V případě lineárního motoru je rotor tvořen dvěma jhy kvádrového tvaru, které jsou spojeny permanentními magnety. Popsaná konstrukce je velmi nerovnoměrně sycena a je zde stěžejní, aby byl velmi pečlivě navržen magnetický obvod. I přesto, že některá provedení tohoto stroje mohou dosahovat vyšší momentové hustoty i ve srovnání s PMSM, náročnost výroby takto pojatého stroje je pro běžné používání neúměrně vysoká. [10]

Poznámka: Vzhledem k zaměření této práce a praktickému zastoupení jednotlivých typů motorů se práce bude nadále zabývat pouze stroji s radiálním magnetickým tokem.

Na základě svých odlišností synchronní stroj s PM disponuje ve srovnání s ostatními stroji jistými odlišnostmi, jež se dají shrnout do jednoduchého výčtu výhod a nevýhod:

Výhody:

- rotor neobsahuje vinutí, z čehož plyne:
 - I. s použitím PM na rotoru ve srovnání s klasickým synchronním strojem odpadá problematický rozběh
 - II. absence budicího vinutí eliminuje ztráty v něm, problematiku přívodu elektrické energie k rotující části
- vyšší účinnost
- lepší poměr výkon/objem
- vyšší momentová přetížitelnost
- vysokomomentové varianty mnohdy nepotřebují převodovku
- ideální uplatnění v průmyslových aplikacích s přísnými podmínkami

Nevýhody:

- složitější výroba, vyšší cena
- problematické odbuzování
- magnetické vlastnosti jsou úzce spjaty s provozní teplotou
- možná hrozba demagnetizace permanentních magnetů
- nutnost řízení
- konstantní přítomnost budicího pole

2 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Po stránce konstrukce a provedení nejsou ani synchronní stroje s permanentními magnety, i přes svá specifika, příliš odlišné od provedení ostatních točivých strojů. Jediným základním rozdílem je rotující část osazená permanentními magnety a přítomnost snímače polohy. V některých případech se rovněž synchronní stroje s PM mohou lišit realizací vinutí.

2.1 Stator

Stator synchronních strojů s PM je do značné míry podobný statorům strojů asynchronních. Vesměs se jedná o válcový svazek tvořený elektrotechnickými vzájemně izolovanými plechy. V profilu plechu jsou vytvořeny drážky, do kterých je nejčastěji navinuto třífázové vinutí. Geometrické vlastnosti plechů, a zejména pak do nich prostřížených drážek, se v návrhové rovině podřizují stejným zákonitostem, jako je tomu u vlastností plechů jiných točivých strojů. V praxi se pak při návrhu stroje buďto vytvoří nová geometrie plechu s co nejpříznivějšími parametry pro daný motor, nebo se za účelem snížení nákladů použijí plechy z řady již běžně vyráběných. Některé EC motory s mírnějšími požadavky na provozní vlastnosti vznikají z částí původně asynchronních strojů, z nichž převezmou stator s rozloženým vinutím, do nějž je vložen upravený rotor s permanentními magnety. Tato varianta je pro návrh z hlediska nákladnosti velmi příznivá.

Za zmínku ovšem stojí také druhá varianta provedení, kdy je stator složen ze segmentů. Tato konstrukce je z hlediska doby výroby nepříznivější, ale v mnohých případech s sebou nese nezanedbatelné výhody. Stator je utvořen kombinací segmentů představujících jho a zub, okolo nějž je navinuto vinutí. Jednotlivé totožné segmenty poté dohromady tvoří stator. Takovéto provedení může umožňovat poměrně jednoduché a rychlé navíjení vinutí s vynikající vlastností – čela cívek se nekříží, čímž se sníží plocha neužitečné oblasti vodičů a vylepší se úspora prostoru. Motor složený ze segmentů zpravidla disponuje vyšší účinností a při dodržení stejné zastavěné plochy i větším momentem. Zároveň je také možno specificky upravovat jednotlivé segmenty a aplikací vhodných změn je možno dosáhnout téměř dokonalý průběh indukovaného napětí.

2.1.1 Statorové plechy

Jako tomu bývá i návrhu jiných točivých strojů, stator je tvořen tenkými, vzájemně izolovanými elektrotechnickými plechy. Tyto plechy mají různé magnetické i mechanické vlastnosti v důsledku různých zastoupení příměsí křemíku a technologie výroby. V praxi je tedy v návrhové rovině důležité volit plech jako co nejlepší průnik ekonomičnosti a zajištění příznivých parametrů. Materiálová kvalita a tloušťka plechu se postará o znatelně nižší měrné ztráty v objemu železa, ale je nutno počítat s vyšší cenou, neboť výroba plechů s větší příměsí křemíku znatelně více opotřebovává prostřihovadlo a náklady na výrobu plechů o tloušťce 0,5mm a nižší taktéž nejsou zanedbatelné. Kvalita elektrotechnických plechů se rovněž odvíjí od tvaru magnetizační charakteristiky a zastoupení měrných ztrát při různých frekvencích. Z hlediska standardní výroby není neobvyklé, že se pro návrh často volí z tvarů plechů běžně vyráběných. S ohledem na požadavky nově navrhovaných strojů a odhad počtu běžně vyráběných kusů však může mít smysl uvažovat nad návrhem individuálním. Nový návrh s sebou však přináší nemalé výdaje v podobě nutnosti pořízení nové raznice. Pro prototypovou výrobu je vhodné nechat plechy řezat laserem, což je rychlé a výhodné, ale v místech řezu s sebou potom plech nese znatelně horší magnetické vlastnosti.

Velikost provozních otáček stroje je úzce spjata s provozní frekvencí. Právě velikost frekvence společně s magnetickou indukcí jsou dvěma složkami, s jejichž nárůstem jako následek rostou ztráty v železe. Ty jsou tvořeny ztrátami hysterezními, které jsou na frekvenci závislé lineárně, a ztrátami způsobenými vířivými proudy, jež rostou s kvadrátem frekvence. Ztráty hysterezní jsou dány vlivem magnetické hystereze vlivem neustálé cyklické změny magnetování. Ztráty vířivými proudy se dají nejlépe redukovat vhodným snížením rozměrů geometrie, a jsou tedy příčinou faktu, že statorové svazky točivých strojů jsou tvořeny kombinací tenkých, vzájemně izolovaných plechů.

Tvar a velikost jednotlivých geometrických prvků plechu jsou podřízeny kompromisu mezi velikostí plochy drážky (ovlivňuje kolik mědi je možno do drážky uložit), a dodržení dostatečných zbývajících rozměrů plechů tak, aby při běžném provozu nedocházelo k přílišnému sycení. S ohledem na velikost přítomné magnetické indukce je tedy nutno dodržovat minimální potřebné rozměry obzvláště statorových zubů a jha.

2.1.2 Magnetizační charakteristika

Nebo také hysterezní smyčka je grafické znázornění závislosti magnetické indukce na intenzitě magnetického pole nejčastěji ve feromagnetické látce. Jedná se o charakteristiku zobrazující plynulé změny zmíněných veličin v cyklu a slouží jako ukazatel kvality magnetických vlastností použitého materiálu.

Elektrotechnické plechy používané pro statory elektrických strojů jsou charakteristické měkkou hysterezní smyčkou, a jejich provozní stav charakterizuje první kvadrant. Počátek magnetizace materiálu je charakterizován křivkou prvotní magnetizace typickou mírnějším nárůstem indukce s rostoucí intenzitou. Tato křivka se následně napojuje na hysterezní smyčku vyobrazující cyklickou změnu. Z hlediska magnetizační charakteristiky se veličiny elektrotechnických plechů pohybují v prvním kvadrantu. Při rostoucí indukci tvar charakteristiky dosahuje téměř lineárního tvaru značícího nasycení. V této oblasti již indukce roste jen velmi pomalu a s rostoucí intenzitou se již nezvyšuje magnetizace.

Oproti elektrotechnickým plechům je hysterezní smyčka permanentních magnetů velmi tvrdá a charakteristické parametry jako např. koercitivní síla nabývají několikanásobně vyšších hodnot. Permanentní magnety jsou zdrojem magnetického pole, a proto se z hlediska návrhu uvažují parametry odpovídající druhému kvadrantu hysterezní smyčky.

2.2 Rotor

Rotor synchronního stroje obecně může být dvojího provedení, buďto hladký nebo s vyniklými póly. Hladký rotor může být běžně k vidění spíše u rychloběžných strojů s vyšším poměrem axiální délky ku průměru stroje, zatímco rotor s póly vyjádřenými je typický pro pomaloběžná mnohapólová provedení s požadavky na velký moment. Jak již bylo zmíněno dříve, u synchronních strojů s PM je rotor osazen permanentními magnety, a to buďto přímo na povrchu, nebo mohou být magnety do geometrie rotoru vnořeny.

Rotor synchronních strojů s permanentními magnety bývá buďto z plného materiálu, nebo složený ze svazku navzájem izolovaných dynamových plechů tak, jak tomu je u jiných točivých strojů. Tak jak je tomu u statoru, i u rotoru je potřeba kontrolovat dostatečnou výšku jha tak, aby nedocházelo k přílišnému sycení této části. V praxi je však běžné, že rotorové jho nebývá zpravidla syceno natolik, aby velikost indukce v rotorovém jhu představovala problém.

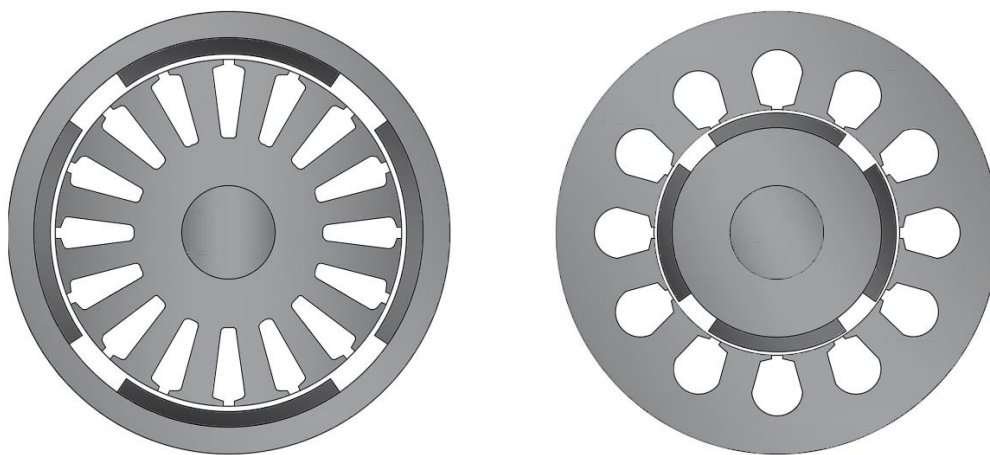
2.2.1 Provedení rotoru

V návrhové rovině je nutno uvažovat nad typem provedení rotoru s ohledem na aplikaci stroje. Existují dva základní typy provedení – vnitřní a vnější rotor, a každý je charakterizován specifickými výhodami a nevýhodami. [4]

Vnitřní rotor je svou podobou nejbližší konstrukci rotoru jiných točivých strojů jako je např. motor asynchronní. Výhodou je větší univerzálnost a zejména také vysoký poměr momentu ku setrvačnosti. Při použití vnitřního rotoru je také znatelnou výhodou jednodušší chlazení vnějšího statoru. Nevýhoda spočívá v problematice dostatečného upevnění magnetů tak, aby se rotor nerozpadl.

V případech, kdy není přítomna příslušná navíjecí technika může představovat navíjení vnějšího statoru nákladnější variantou.

Provedení stroje s vnějším rotorem je ekonomičtější variantou, zejména pak s využitím feritových magnetů. Vnitřní stator se snáze navíjí a magnety jsou při chodu odstředivou silou tlačeny do jha rotoru, takže se zjednoduší problematika spojená s upevněním magnetů. Použitím vnějšího rotoru odpadá nutnost užití dvou ložisek a běžně se používají konstrukce nesoucí jen jedno kuličkové ložisko. Hlavní nevýhodou oproti vnitřnímu rotoru je významně vyšší v setrvačnost této součásti, což znamená pomalejší regulaci. V některých aplikacích lze použít vnější rotor jako přímou pohonnou součást – vrtule některých dronů.



Obr. č. 1 – Ukázka provedení stroje s vnějším rotorem (vlevo) a stroje s rotorem vnitřním (vpravo)

Variace provedení rotorů je taktéž možno dělit dle uložení magnetů – na základě aplikace, provozních vlastností a požadovaném průběhu indukovaného napětí lze vhodným tvarováním použitých magnetů docílit lepších vlastností v těchto směrech. Existují tři nejtypičtější varianty uložení magnetů: magnety na povrchu, vnořené a zapuštěné.

2.2.1.1 Rotor s magnety na povrchu

V tomto případě jsou permanentní magnety připevněny na povrchu rotoru. Provedení je z výrobního hlediska poměrně jednoduché, ale vyžaduje přísné podmínky mechanické pevnosti, což se občas řeší například plastovou bandáží, která pomáhá držet magnety na rotoru. Právě problematika mechanické pevnosti připevnění činí toto provedení nevhodné pro vysokootáčkové aplikace. Výhodou uložení permanentních magnetů na povrch je fakt, že je možno dosáhnout poměrně vysoké magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

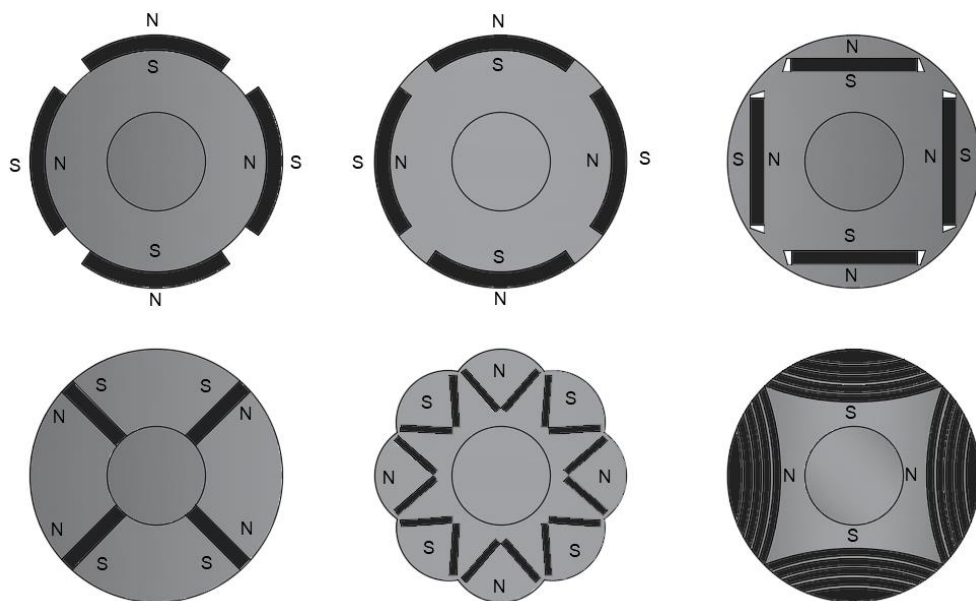
U varianty s magnety na povrchu jsou nejtýpější obdélníková a bochníková provedení, kde každý z tvarů najde uplatnění dle požadovaného tvaru indukovaného napětí. V případě EC motoru jsou běžné obdélníkové magnety a pro PMSM by měl zpravidla magnet tvarem co nejvíce připomínat půloblouk, jehož okraje jsou upraveny pro dodržení minimální potřebné výšky magnetu.

2.2.1.2 Rotor se zapuštěnými magnety

V rotoru jsou vyvedeny drážky, do nichž jsou následně uloženy radiálně zmagnetované magnety. Toto provedení vytváří mechanicky hladký rotorový povrch snižující ztráty způsobené třením o vzduch oproti provedení s magnety na povrchu. Pro zajištění mechanické pevnosti uložení je možno použít magnety lichoběžníkových tvarů. Nevýhodou je potom větší podíl rozptylu magnetického toku. Toto provedení je běžné pro servopohony.

2.2.1.3 Rotor s vnořenými magnety

U takového provedení jsou permanentní magnety uloženy v drážkách rotoru hlouběji, než je tomu u magnetů zapuštěných, a některých případech jsou magnety zcela obklopené materiálem rotoru. Tvar a natočení drážek se může do značné míry lišit v závislosti na požadavcích a přístupu k návrhu. Výhodou je nejvyšší mechanická odolnost připevnění magnetu ze všech tří zmiňovaných možností uložení. Tímto jsou výše zmíněná provedení rotoru vhodná pro vysokootáčkové aplikace. Nevýhodou je složitější výroba a často i potřeba většího objemu magnetu oproti ostatním variantám uložení.



Obr. č. 2 – Ukázka provedení permanentních magnetů na rotoru

2.2.2 Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou stěžejní součástí elektrických strojů pracujících na principu buzení ze strany magnetů. Při volbě a návrhu používaných magnetů je potřeba brát v potaz hned několik základních vlastností, které se promítnou na celý stroj. Magnetické vlastnosti jsou dány materiálem a jsou do značné míry závislé na teplotě – permanentní magnet se vyznačuje prací v druhém kvadrantu magnetizační charakteristiky a snaha je, aby zde byla křivka co nejlineárnější. Vhodným tvarováním magnetu poté lze lépe dosáhnout požadovaného tvarování průběhu magnetické indukce. Při návrhu je velmi důležité kontrolovat rozměry, zejména pak výšku magnetu, neboť ta je spjata s odolností proti demagnetizaci.

Existují dva základní směry magnetování permanentních magnetů: axiální a radiální. Pro elektrické stroje se běžně používá magnetů zmagnetovaných v radiálním směru, což je obzvláště výhodné v použití u EC motorů, kde požadujeme obdélníkové průběhy indukovaného napětí. Pokud zanedbáme vliv drážkování, dá se předpokládat, že vektor magnetické indukce od magnetu je vždy téměř kolmý na povrch magnetu a budící magnetický tok se přes vzduchovou mezeru uzavírá tou nejkratší cestou. [6]

V dnešní době se v točivých strojích buzených permanentními magnety mohou objevovat čtyři běžně používané varianty dle materiálu:

- magnety na bázi keramických oxidů – ferity
- magnety sloučenin hliníku – AlNiCo
- magnety ze vzácných zemin: samarium-kobalt
neodymové magnety

2.2.2.1 Ferity

Představitel velmi často používaných a cenově velmi výhodných magnetů. Neopomenutelnou výhodou těchto magnetů je právě nejnižší cena na kilogram oproti ostatním materiálům magnetů. Nevýhodou jsou občas nedostatečné vlastnosti pro některé specifické aplikace, a hlavně značná závislost magnetických vlastností na teplotě. Mimo to disponuje feritový magnet širokého spektra použití také kvůli dobré chemické odolnosti.

2.2.2.2 AlNiCo

Ve srovnání s ostatními materiály permanentních magnetů se právě AlNiCo vyznačují nejvyšší stabilitou magnetických vlastností v závislosti na teplotě (jejich maximální provozní teplota dosahuje více než 500 °C). Jsou vysoce odolné proti korozi disponují vysokou remanencí. Vhodný do aplikací s velkou provozní teplotou nebo může nalézt využití v oblastech, kde je požadována stálost magnetických

vlastností při různých teplotách. Nevýhodou magnetů AlNiCo je značně nelineální demagnetizační charakteristika a nízká hodnota koercitivní síly.

2.2.2.3 Samáriové magnety SmCo

Velmi tvrdý magnetický materiál ze vzácných zemin s příznivými vlastnostmi. Vyznačuje se vysokou remanencí i dobrou koercitivitou, demagnetizační charakteristiky jsou v druhém kvadrantu hysterezní smyčky prakticky lineární. Je výborným kandidátem pro aplikace vyžadující motor s vysokým poměrem výkonu ku hmotnosti, za což je ovšem zapláceno jeho vysokou cenou.

2.2.2.4 Neodymové magnety

Druhým představitelem magnetů na bázi materiálů ze vzácných zemin jsou magnety typu neodym-železo-bor. Podobně jako samáriové magnety disponují ty neodymové zejména výbornými magnetickými vlastnostmi a linearitou v druhém kvadrantu magnetizační charakteristiky. V běžných teplotách podobným teplotám okolního prostředí mají dokonce lepší vlastnosti než magnety na bázi SmCo. Ve srovnání s magnety SmCo jsou neodymové magnety dražší variantou. Nevýhodou magnetu NdFeB je také vysoká náchylnost k chemické degradaci, takže je nutno povrch magnetu ošetřit například epoxidovými nátěry. Oba případy magnetů na bázi vzácných zemin jsou terčem dalšího výzkumu za účelem zlepšení jejich vlastností.

2.3 Vinutí synchronních strojů s permanentními magnety

Obdobně jako je tomu u jiných elektrických strojů točivých, i zde je nedílnou součástí statorového svazku příslušné vinutí. I zde bývá vinutí provedeno nejčastěji trojfázové, v některých případech se však také můžeme setkat s vícefázovými variantami. Právě statorové vinutí protékané proudem se složením s magnetickým polem od rotorových permanentních magnetů podílí na tvorbě momentu stroje. Základním stavebním prvkem vinutí je vodič. Ten je v drtině případů tvořen velmi čistou elektrotechnickou mědí (podíl Cu až 99,99%) o vysoké vodivosti (dosahuje kolem 59 MS/m) a je izolován lakem. Vhodným tvarováním je z vodiče vytvořen závit, a jeden či více závitů poté tvoří cívku. Cívky spadající pod jednu fázi jsou navzájem propojeny (sériově nebo paralelně) do cívkových skupin. Každá cívka se vyznačuje dvěma aktivními stranami, jenž bývají uloženy ve dvou rozlišných drážkách, vzdáleny od sebe obvykle o cívkový krok (obvykle jednu pólovou rozteč). Na základě počtu vrstev v drážkách poté drážku vyplňuje buďto jedna cívková strana, nebo se o plochu drážky dělí dvě cívkové strany sousedních fází.

Vinutí je při provozu protékáno elektrickým proudem a je tedy neopomenutelným zdrojem tepla vlivem Jouleových ztrát. Použití vinutí je

Podle počtu vrstev vinutí v drážkách:

-jednovrstvá

-dvouvrstvá

Podle počtu drážek na pól a fázi:

-vinutí s celistvým počtem drážek na pól a fázi

-vinutí zlomková

2.3.1 Rozložená vinutí

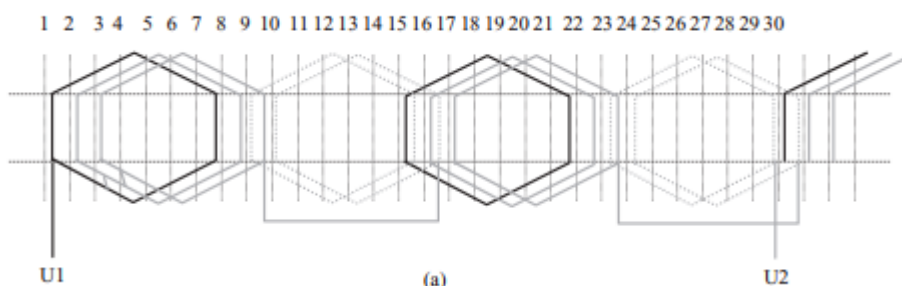
Běžná a hojně používaná varianta trojfázového vinutí. Jedná se o typické provedení vinutí statorů různých provedení elektrických strojů, zejména pak strojů asynchronních. Navíjení tohoto typu vinutí je poměrně jednoduché a není příliš nákladné. Vinutí bývá do drážky běžně vkládáno protahovačkou nebo je ručně vsypávané. Provedení rozloženého vinutí s sebou přináší několik nevýhod, zejména pak velkou výšku čel vinutí vlivem překrývání vinutí jednotlivých fází. Velká délka čel je nepříznivou skutečností, protože roste neúžitný objem vinutí, zvyšují se ztráty a spotřebuje se více materiálu.

2.3.1.1 Vinutí smyčková

U smyčkového provedení rozloženého vinutí bývá spojen konec jedné cívkové skupiny s koncem cívkové skupiny následující. Tvar cívek nabývá tvaru smyčky, které jsou následně nevinuty jedna přes druhou tak, že se cívkové skupiny dodatečně propojují.

Výhodou použití smyčkového vinutí je možnost navinutí se zkráceným krokem, a to až na hodnotu odpovídající dvěma třetinám pólové rozteče. Takovéto zkrácení kroku vede na snížení rozptylu a redukci přídavných ztrát v drážkách.

Použití smyčkového vinutí je typické zejména v aplikacích s velkým průchozím proudem a nízkým napětím.

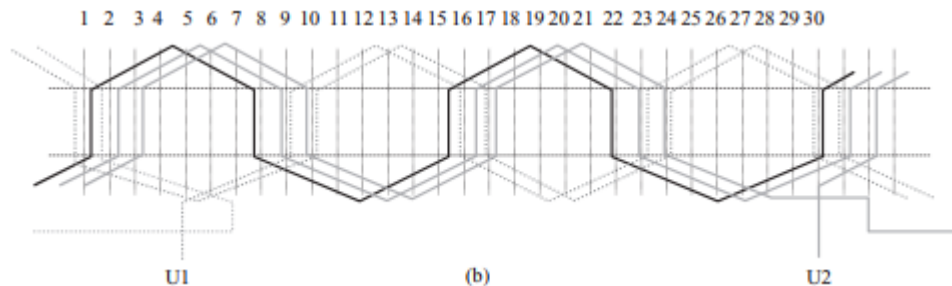


Obr. č. 3 – Ukázka provedení smyčkového rozloženého vinutí [3]

2.3.1.2 Vinutí vlnová

V případě této varianty bývá konec jedné cívkové skupiny napojen na začátek další cívkové skupiny a cívky pak nabývají tvaru vlny.

Vlnového vinutí se užívá v aplikacích pro malý proud a vysoké napětí.



Obr. č. 4 – Ukázka provedení vlnového rozloženého vinutí [3]

2.3.2 Soustředěná vinutí

Alternativa k rozloženému vinutí používaná stále častěji u synchronních strojů s permanentními magnety. Z principu tohoto vinutí plyne značná výhoda ve formě nepřekrývajících se čel vinutí, což vede na znatelné zkrácení výšky čel vinutí. Kratší čela vinutí znamenají více aktivní mědi, menší ztráty v mědi, a tedy vyšší účinnost. Zároveň platí pravidlo, že pokud bychom zachovali stejný objem stroje, dosáhneme také vyššího momentu (namísto prostoru čel můžeme prodloužit statorový svazek).

Cívky soustředěného vinutí mají stejný střed a v případě dvou a více cívek v jedné cívkové skupině může být prováděno s plnými cívkami (zdvojené), či s půlcívkami (nezdvojené).

Varianta soustředěného vinutí typická pro synchronní stroje s permanentními magnety spočívá v sériovém zapojení cívek téže fáze, přičemž je vždy pouze jedna cívka navinuta kolem statorového zubu.

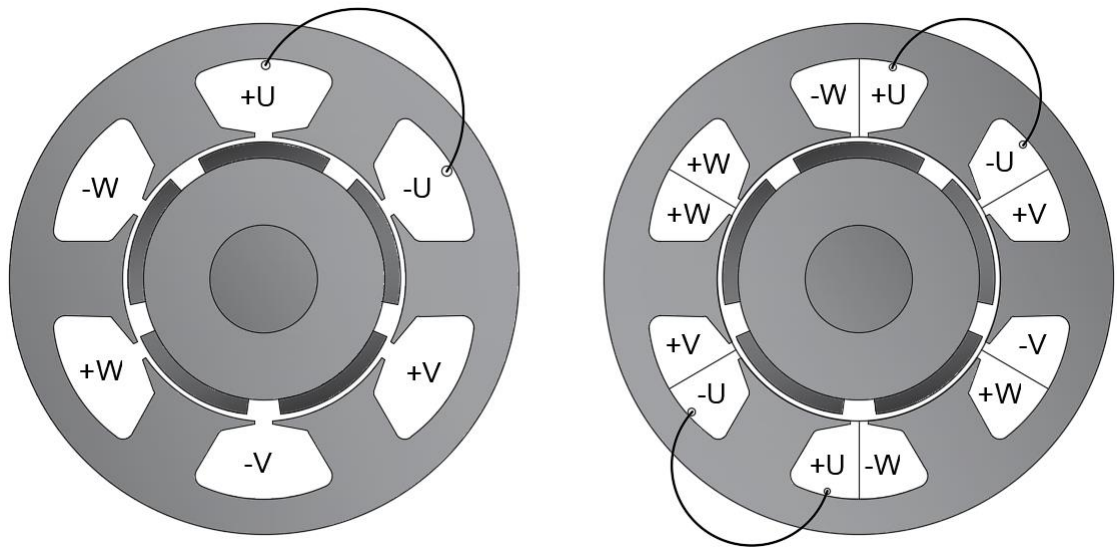
Podle počtu cívkových stran uložených do každé drážky rozlišujeme soustředěná vinutí jednovrstvá a dvouvrstvá.

2.3.2.1 Jednovrstvá soustředěná vinutí

Obecně platí, že strany cívky u jednovrstvého vinutí zaujímají celou plochu drážky, takže počet cívek je roven polovině drážek $c = Q/2$. V případě jednovrstvých vinutí není možno používat cívky se zkráceným krokem. Vzhledem k této skutečnosti je tedy nutno dodržet pro jednovrstvá vinutí sudý počet drážek. V případě synchronních strojů s PM se využívá soustředěného vinutí v takové formě, že každá cívka vždy obklopuje každý druhý statorový zub. Jednovrstvé vinutí je jednodušší na navinutí a dosahuje vyššího činitele plnění mědi.

2.3.2.2 Dvouvrstvá soustředěná vinutí

U vinutí dvouvrstvých platí pravidlo, že počet cívek je přímo úměrný počtu drážek, což je dáno skutečností, že v každé drážce jsou uloženy dvě cívkové strany. V případě dvouvrstvého vinutí je časté provedení se zkráceným krokem nebo použitím zlomkového vinutí. U synchronních strojů s PM bývá dvouvrstvé soustředěné vinutí aplikováno tak, že cívka je vždy navinuta kolem jednoho statorového zubu. Z důvodu přítomnosti dvou cívkových stran se běžně vkládá do drážky další izolace, což nadále snižuje činitel plnění mědi.



Obr. č. 5 – Provedení soustředěného vinutí jednovrstvého (vlevo) a dvouvrstvého (vpravo)

3 NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Třetí kapitola se bude věnovat návrhu synchronního stroje s permanentními magnety. V současné době existuje několik variant návrhů týkajících se synchronních strojů s PM, jako například v [1] [2] [3] [5] a [7]. Při návrhu stroje často bývá pravidlem, že pro dosažení zlepšení některých vlastností se některé jiné parametry zhorší, a proto je nutno již v návrhové rovině specifikovat nejdůležitější vlastnosti navrhovaného stroje s ohledem na provoz, využití, parametry a náklady.

Tento oddíl se bude věnovat analytickému návrhu synchronního stroje s permanentními magnety, radiálním magnetickým tokem a vnitřním rotorem dle [1]. Postup výpočtu bude proveden jako prvotní návrh a výpočet hlavních parametrů stroje, sloužící pro případnou další optimalizaci, a zejména také srovnání a analýzu v prostředí programových částí Ansys.

Návrh probíhá ve spolupráci s firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna a je spojen s několika požadovanými vstupními parametry, jimiž jsou:

- Jmenovité napájecí napětí: $U = 230 \text{ V}$
- Jmenovité otáčky: $n_n = 5000 \text{ min}^{-1}$
- Počet fází stroje: $m = 3$
- Jmenovitý moment stroje: $M_n = 1 \text{ Nm}$ -> odpovídající výkon při daných otáčkách bude přibližně 525 W

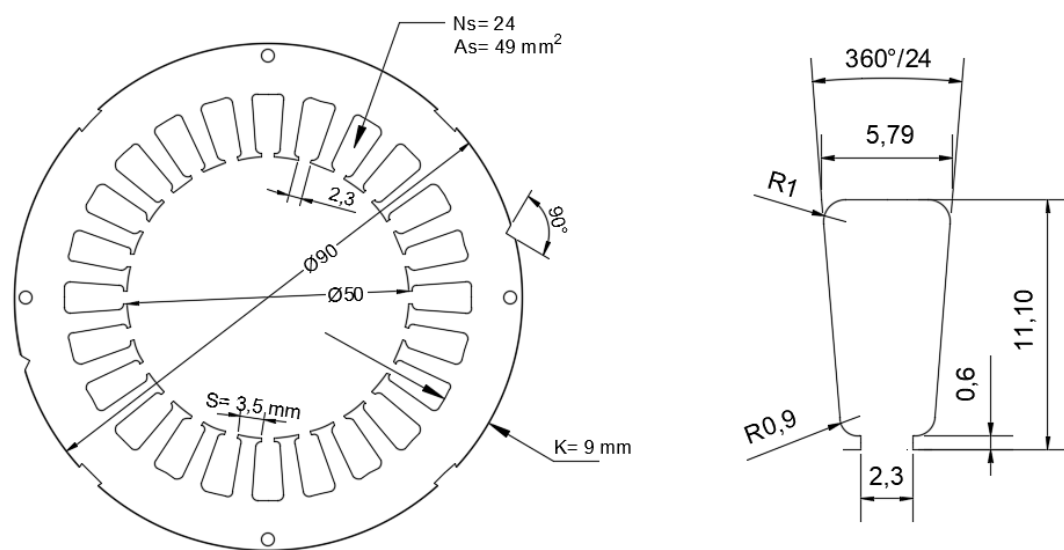
Navrhovaný stroj bude pohonem elektromagnetického ventilu a má být schopen v rozmezí $1\text{-}5000 \text{ min}^{-1}$ disponovat momentem o velikosti 1 Nm . Z ekonomického hlediska bude návrh proveden na základě firmou používaných konstrukčních prvků, a synchronní motor tedy bude vyvinut alespoň zčásti na bázi stroje asynchronního. Pro výrobu bude použit běžně vyráběný plech používaný pro asynchronní motory osově výšky 63 a z technologického hlediska se bude návrh zprvu držet použití rozloženého vinutí.

Na základě požadavků bude díky teoretické stálosti momentu, možnosti převzetí značné části konstrukčních prvků stroje asynchronního a větší jednoduchosti řízení, použit synchronní stroj typu BLDC osazen magnety typu NdFeB. Materiál plechu zprvu bude běžně používaná třída M400-50A.

Dle zadání bude provedeno několik jednotlivých návrhů, ale z důvodů zachování jisté přijatelnosti vzájemného porovnání, bude několik parametrů napříč variantami zachováno totožných. Jmenovitě se jedná o tloušťku, tvar a materiál permanentního magnetu a rovněž zachování vnějšího a vnitřního průměru statorového plechu.

3.1 Stroj s rozloženým vinutím

První z návrhů bude proveden dle [1] a bude zaměřen na návrh synchronního stroje na bázi stroje asynchronního. Stroj jako celek bude svou stavbou silně připomínat asynchronní motor s rozdílem v podobě upraveného rotoru, osazeného permanentními magnety a přítomností Hallových sond. Řada BLDC strojů vyvinutá na základě konstrukce motoru asynchronního představuje velmi výhodnou, výrobně příznivou a poměrně nenáročnou variantu. Bude použit běžně vyráběný plech pro asynchronní motor osové výšky 63 a do něj bude vloženo klasické rozložené vinutí.



Obr. č. 6 – Znárodnění tvaru statorového plechu s příslušnými rozměry dle [8]

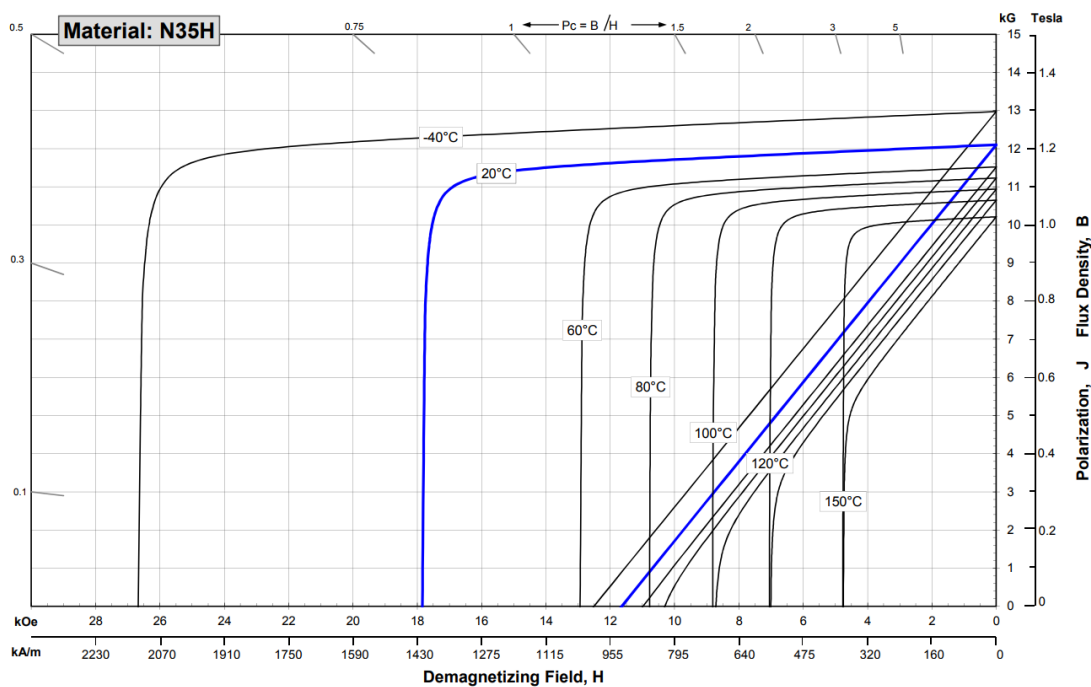
Prvotním krokem návrhu je identifikace geometrických parametrů na základě požadavků zadání. Parametry statoru jsou pevně dány a základní rozměry rotorových částí se na základě těchto informací snadno dopočítají. Pro stanovení rozměrů spojených s rotorem je však nutno nejprve zvolit dostatečnou výšku permanentního magnetu a také stanovit velikost vzduchové mezery.

V této chvíli je vhodné, na základě známých informací, stanovit materiál permanentního magnetu. Při požadavku co nejnižší ceny má smysl přemýšlet nad magnetem feritovým. Pokud je zásadním požadavkem velký poměr výkon/hmotnost, je na místě zvolit magnety na bázi vzácných zemin. U volby permanentních magnetů ze vzácných zemin (obzvláště pak NdFeB) je nutno brát zřetel na očekávanou provozní teplotu, jelikož jejich maximální provozní teplota je nižší v porovnání s magnety z jiných materiálů. Pro potřeby návrhu byl zvolen neodýmový permanentní magnet N35H za předpokládané provozní teploty 60 °C.

Parametry zvoleného permanentního magnetu při teplotě 60 °C poté budou následovně:

Remanentní indukce	$B_r = 1,15\text{T}$
Koercitivní síla	$H_c = 875\text{kA/m}$
Minimální vlastní koercitivita	$H_{cj} = 1030\text{kA/m}$

Tabulka č. 1 – Vlastnosti permanentního magnetu N35H při 60°C



Obr. č. 7 – Magnetizační charakteristika magnetu N35H [9]

Na základě zmíněných parametrů je nyní zapotřebí zjistit výšku permanentních magnetů. Právě správný návrh permanentního magnetu je stěžejním krokem ovlivňujícím návrh celého stroje. Při chodu je pole magnetu do jisté míry oslabováno polem reakčním a tloušťku musíme volit s jistou rezervou tak, abychom zabránili hrozcí demagnetizaci průchodem příliš velkého proudu. Obecně platí, že vyšší tloušťka magnetu představuje zvýšenou odolnost proti demagnetizaci.

Pro získání co nejvyšší indukce při +60 °C s ohledem na prevenci demagnetizace při špičce proudu bude volen koeficient permeance $B/H = 4$, což přeneseně odpovídá poměru výšky permanentního magnetu ku vzduchové mezeře.

Vzduchová mezera synchronních strojů s permanentními magnety se typicky pohybuje v rozmezí 0,7-1 mm; zde volíme velikost vzduchové mezery $\delta = 0,7\text{ mm}$. Potřebná výška permanentního magnetu při daných parametrech poté bude vyjádřena následovně:

$$\frac{B}{H} = \frac{l_{PM}}{\delta} = 4 \quad (3.1)$$

$$l_{PM} = 4\delta = 4 \cdot 0,7 = 2,8mm \quad (3.2)$$

Pro výšku permanentního magnetu zvolíme celistvou výšku $l_{PM} = 3mm$.

Nyní je na místě volit vhodný počet pólů stroje. Použitý stator má 24 drážek a možnosti volby počtu pólů jsou 2, 4, 8, 10, 16 a 20 [1][15]. Od volby počtu pólů se odvíjí rozteč cívek daného vinutí, a proto je nutné brát zřetel také na praktičnost navíjení. Za předpokladu ručního vsypávání vinutí volíme čtyřpólovou variantu. Počet pólů stroje ovšem také hraje roli v problematice komutační frekvence. Zde je tedy nutno kontrolovat velikost frekvence komutace f_{kom} z důvodu možné přítomnosti značných ztrát v železe použitého statorového plechu.

Výpočet komutační frekvence odpovídá vztahu:

$$f_{kom} = 6 \cdot \frac{n}{60} \cdot p = 6 \cdot \frac{5000}{60} \cdot 2 = 1000 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Perioda komutace potom bude dána:

$$T_{kom} = \frac{1}{f_{kom}} = \frac{1}{1000} = 1ms \quad (3.4)$$

Volba počtu pólů stroje má však také zásadní vliv na velikost přítomného reluktančního momentu. Reluktanční moment je neúčinný mechanický moment vznikající vlivem kolísání magnetického odporu stroje na základě změny úhlu natočení rotoru. Právě vliv rozdílné vodivosti zubu statoru a drážky způsobuje tendenci magnetu se situovat do jisté neutrální polohy tak, aby co nejvíce snížil magnetický odpor. Pro efektivní potlačení reluktančního momentu je vhodné zvolit kombinaci drážek a pólů tak, aby se v tentýž moment mohlo zarovnat co nejméně kombinací pólů magnetů a zubů statoru.

Z výše uvedeného tedy plyne, že volba čtyřpólového provedení z hlediska velikosti přítomného reluktančního momentu je značně nevýhodná a bude nutno zabývat se jeho redukcí.

Počet pólů rotoru	2p	4
Počet cívek statoru	c _s	12
Počet cívek na fázi	c _f	4
Použité provedení vinutí	rozložené vinutí s jednou cívkou cívkovou stranou v drážce	
Krok cívky	c _k	6

Tabulka č. 2 – shrnutí parametrů vinutí

Následující krok spočívá ve volbě vhodného zapojení. S použitím BLDC motoru je určen průběh napájení, kde se zásadně užívá obdélníkového, případně lichoběžníkového průběhu. Z principu činnosti tohoto motoru také platí, že v jeden moment jsou napájeny vždy dvě ze tří fází. Z hlediska nižších nákladů na opracování magnetů bývá zpravidla výhodnější zvolit zapojení do hvězdy. Volíme tedy zapojení napájení do hvězdy a uvažovaný oblouk jednoho permanentního magnetu o základním úhlu 60° .

Délka železa	l_{Fe}	30 mm
Velikost vzduchové mezery	δ	0,7mm
Výška permanentního magnetu	l_{PM}	3 mm
Průměr rotoru	$d_{ro} = d_{si} - 2\delta$	$50 - 2 \cdot 0,7 = 48,6mm$
Průměr oceli rotoru	$d_{ry} = d_{ro} - 2l_{PM}$	$48,6 - 2 \cdot 3 = 42,6mm$
Oblouk permanentního magnetu		60°

Tabulka č. 3 – shrnutí parametrů rotoru

Následující krok spočívá ve stanovení užitečného magnetického toku. K jeho získání však potřebujeme znát plochu jednoho pólu magnetu. Odpovídající plochu magnetického pólu určíme následovně:

$$S_{PM} = \frac{\pi \cdot d_{ry} \cdot l_{Fe}}{2p} = \frac{\pi \cdot 42,6 \cdot 30}{4} = 1004 \text{ mm}^2 \quad (3.5)$$

Při předpokládané teplotě 60°C odečteme z příslušné BH charakteristiky magnetu odpovídající hodnotu velikosti B_M pro $B/H=4$; odpovídající magnetický tok následně bude:

$$\phi = B_M \cdot S_{PM} = 1,14 \cdot 1004 \cdot 10^{-6} = 1,145 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 1,145 \text{ mWb} \quad (3.6)$$

Dalším krokem prvotního návrhu je stanovení potřebného počtu závitů na cívku. Toho docílíme skrze EMF konstantu motoru k_E . Z předpokladu jmenovitých otáček o velikosti 5000 min^{-1} odhadneme tuto hodnotu jako 90 % otáček naprázdno za předpokladu použití magnetů ze vzácných zemin. (Pokud používáme magnety feritové, odhadujeme jmenovité otáčky jako 80 % nezátížených)

$$n_0 = \frac{n}{0,9} = 5556 \frac{\text{ot}}{\text{min}} \quad (3.7)$$

Otáčky naprázdno následně odpovídají úhlové rychlosti o velikosti:

$$\omega_o = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 5556}{60} = 582 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.8)$$

Předpokládáme fázové napájení 230 V, odkud následně odhadneme velikost napětí z měniče jako:

$$U = \sqrt{2} \cdot U_n \cdot \frac{2}{\pi} = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot \frac{2}{\pi} \cong 207V \quad (3.9)$$

Předběžná kalkulace EMF konstanty bude tedy:

$$k_E = \frac{U}{\omega_0} = \frac{230 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{2}{\pi}}{582} = 0,356 \frac{Vs}{rad} \quad (3.10)$$

V rovině prvotního návrhu přijímáme takové zjednodušení, že velikost konstanty EMF k_E a momentové konstanty k_T stroje uvažujeme sobě rovné.

$$k_T \approx k_E = 0,356 \frac{Nm}{A} \quad (3.11)$$

Konstanta EMF je však dána závislostí na počtu závitů a magnetickém toku dle následujícího vztahu, odkud nyní můžeme vyjádřit hledaný počet závitů:

$$k_E = \frac{2}{3} \cdot \frac{Z \cdot \phi \cdot p}{a \cdot \pi} C \Rightarrow Z = \frac{3}{2} \cdot \frac{k_E \cdot a \cdot \pi}{\phi \cdot p} \cdot \frac{1}{C} \quad (3.12)$$

Počet závitů odpovídající již známé velikosti EMF konstanty při daném sycení bude:

$$Z = \frac{3}{2} \cdot \frac{k_E \cdot a \cdot \pi}{\phi \cdot p} \cdot \frac{1}{C} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,356 \cdot 1 \cdot \pi}{1,145 \cdot 10^{-3} \cdot 2} \cdot \frac{1}{0,9} = 814 \quad (3.13)$$

V našem případě máme vinutí složeno z 12 cívek, kde každá cívka má dvě strany, potom počet závitů na jednu cívku musí odpovídat:

$$Z_{1c} = \frac{Z}{2 \cdot 12} = \frac{814}{2 \cdot 12} = 34 \quad (3.14)$$

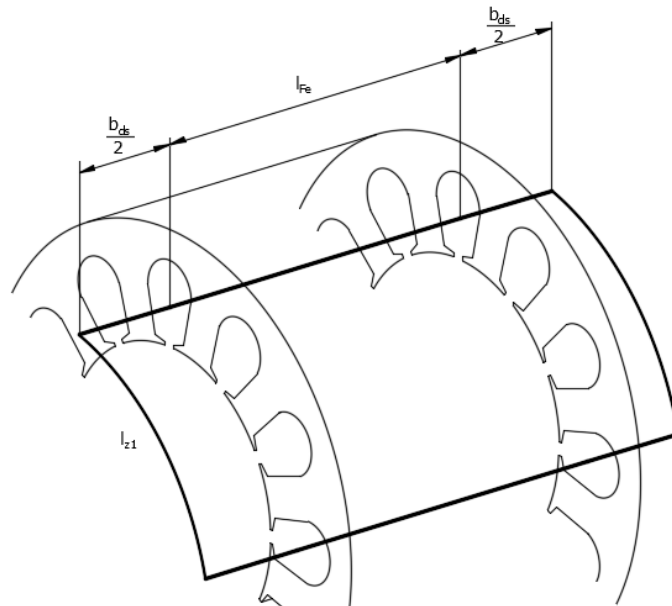
Dalším krokem návrhu nyní bude stanovení průřezu vodiče. K tomu je nutno znát plochu drážky, počet vodičů v drážce a činitel plnění mědi. Plocha drážky je v našem případě stanovena ze zadaného statorového plechu a činitel plnění na základě praktických informací dodaných firmou EMP s.r.o. uvažujeme o hodnotě $k_{pCu} = 0,5$. Odpovídající průměr drátu bude:

$$d_v = \sqrt{\frac{S_{ds} \cdot k_{pCu}}{N}} = \sqrt{\frac{49 \cdot 0,5}{34}} = 0,849 mm \quad (3.15)$$

Na základě vypočteného průřezu zvolíme nejbližší vyšší běžně vyráběný drát kruhového průřezu (v našem případě o průměru 0,85). A příslušný průřez vodiče stanovíme jako:

$$S_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,85^2}{4} = 0,568 \text{ mm}^2 \quad (3.16)$$

Následující krok spočívá ve stanovení odporu vinutí. Pro tento výpočet je nutno odhadnout ještě střední délku závitů, která je úměrná dvěma délkám svazku a dvěma obloukům čela vinutí za předpokladu umístění vodiče přibližně do středu drážky.



Obr. č. 8: Ideové znázornění střední délky závitů

$$l_z = 2l_{Fe} + 4 \frac{b_{ds}}{2} + 2l_{z1} \quad (3.17)$$

Musíme tedy stanovit příslušné rozměry dle následujících vztahů:

Střední poloměr statorové drážky je dán vztahem:

$$r_{ds} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(d_{si} + d_{dso})}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(50 + 72,2)}{2} = 30,55 \text{ mm} \quad (3.18)$$

Délka vodiče odpovídající velikosti oblouku spojujícího dva středy statorových drážek následně bude:

$$l_{z1} = \frac{2\pi \cdot r_{ds}}{2p} = \frac{2\pi \cdot 30,55}{4} = 47,99 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Uvažujeme případ, že cívka těsně obepíná statorový svazek, a proto jej přesahuje pouze o velikost $b_{ds}/2$. Ve skutečnosti tomu tak však není a příslušná vzdálenost je větší v závislosti na daném provedení statoru.

Šířku statorové drážky určíme jako:

$$b_{ds} = \frac{2\pi \cdot r_{ds}}{Q_s} - b_z = \frac{2\pi \cdot 30,55}{24} - 3,167 = 4,83 \text{ mm} \quad (3.20)$$

A na základě zjištěných rozměrů odhadneme střední délku závitu následovně:

$$l_z = 2l_{Fe} + 4 \frac{b_{ds}}{2} + 2l_{z1} = 2 \cdot 30 + 4 \cdot \frac{4,83}{2} + 2 \cdot 47,99 = 165,64 \text{ mm} \quad (3.21)$$

Pro odpovídající velikost odporu je nutno počítat s rezistivitou materiálu při odhadované teplotě. Uvažujeme chod při teplotě 60 °C. Tabulková hodnota rezistivity mědi při 20 °C je $\rho_{20} = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ a teplotní koeficient odporu odpovídá $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

$$\begin{aligned} \rho_{60^\circ\text{C}} &= \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta + 20)] = \\ &= 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot [1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot (60 + 20)] = 2,01 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Odpor jedné cívky je dán počtem závitů N cívky o délce l_z na daném průřezu vodiče.

$$R_{cívky} = \frac{N \cdot l_z}{S_v} \cdot \rho_{60^\circ\text{C}} = \frac{34 \cdot 165,64 \cdot 10^{-3}}{0,568 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,01 \cdot 10^{-8} = 199,39 \text{ m}\Omega \quad (3.23)$$

Za předpokladu čtyř cívek na fázi bude odpor jedné fáze přibližně:

$$R_f = 4 \cdot R_{cívky} = 4 \cdot 199,39 \cdot 10^{-3} = 0,798 \Omega \quad (3.24)$$

A odpor celého současně aktivního vinutí určíme z předpokladu, že v jeden moment jsou aktivní vždy dvě ze tří fází. Odpor vinutí tedy odpovídá:

$$R_v = 2 \cdot R_{fáze} = 2 \cdot 0,798 = 1,595 \Omega \quad (3.25)$$

Při otáčkách 5000 min^{-1} bude zpětná složka indukovaného napětí dána dle:

$$k_E \omega = 0,356 \cdot 2\pi \cdot \frac{5000}{60} = 186,4 \text{ V} \quad (3.26)$$

A za zjednodušujícího předpokladu rovnosti napěťové a momentové konstanty stroje můžeme stanovit maximální proud jako (předpoklad 1 Ω vnitřního odporu měniče):

$$I_{\max} = \frac{U - k_E \omega - \Delta U_{tr}}{R_v + R_n} = \frac{207 - 186,4 - 1}{1,595 + 1} = 8,17 \text{ A} \quad (3.27)$$

Jmenovitý proud odpovídající požadovanému jmenovitému momentu při dané konstantě stroje:

$$I_n = \frac{M_n}{k_T} = \frac{1}{0,356} = 2,81 A \quad (3.28)$$

Při našem zapojení do hvězdy a předpokladu vždy dvou ze tří aktivních fází v jeden určitý moment při napájení obdélníkovým průběhem bude efektivní hodnota proudu odpovídat následujícímu vztahu:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_n = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 2,81 = 2,29 A \quad (3.29)$$

A odpovídající hustota vodivého proudu ve vodiči bude rovna:

$$\sigma_{ef} = \frac{I_{ef}}{S_v} = \frac{2,29}{0,568} = 4,03 \frac{A}{mm^2} \quad (3.30)$$

Maximální doporučená proudová hustota pro malý nechlazený uzavřený motor je přibližně 5,43 A/mm², z čehož plyne, že náš návrh tomuto požadavku s rezervou vyhoví.

Nyní již jen zbývá určit přítomné ztráty v motoru a stanovit jeho účinnost. Jedním z možností stanovení ztrát v železe je výpočet objemu aktivního železa vynásobeného ztrátovým číslem materiálu. To se odvíjí od dané frekvence indukovaného napětí:

$$f_{emf} = \frac{n_n}{60} \cdot \frac{2p}{2} = \frac{5000}{60} \cdot \frac{4}{2} = 166,7 Hz \quad (3.31)$$

Objem železa bude odpovídat následujícímu výpočtu:

$$\begin{aligned} V_s &= \left(\frac{\pi \cdot (d_{so}^2 - d_{si}^2)}{4} - Q_{st} \cdot S_{ds} \right) \cdot l_{Fe} = \\ &= \left(\frac{\pi \cdot (90^2 - 50^2)}{4} - 24 \cdot 49 \right) \cdot 30 = 98107 mm^3 = 9,81 \cdot 10^{-5} m^3 \end{aligned} \quad (3.32)$$

A hmotnost statorového svazku tedy bude dána:

$$m_s = V_s \cdot \rho_s = 9,81 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 0,765 kg \quad (3.33)$$

Ze získaných hodnot jsme nyní schopni vypočítat velikost ztrát v železe na základě tabelovaných údajů dodaných výrobcem plechů:

$$\Delta P_{Fe} = m_s \cdot \Delta p_{M400} = 0,765 \cdot 28,3 = 21,65 W \quad (3.34)$$

Ztráty v mědi odpovídají součinu odporu aktivního vinutí a kvadrátu proudu dle vztahu:

$$\Delta P_{Cu} = R_v \cdot I_n^2 = 1,595 \cdot 2,81^2 = 12,6W \quad (3.35)$$

V rovině prvotního návrhu je běžné pouze odhadnout přibližné mechanické ztráty. V našem případě tedy prozatím odhadujeme 10 W mechanických ztrát.

$$\Delta P_{mech} = 10W \quad (3.36)$$

Celkové ztráty ve stroji jsou následně součtem ztrát dílčích jako:

$$\Delta P_c = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 12,6 + 21,65 + 10 = 44,25W \quad (3.37)$$

Nyní jen zbývá vypočítat účinnost motoru:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_c} = \frac{525}{525 + 44,25} = 0,926 \rightarrow 92,6\% \quad (3.38)$$

A posledním krokem je kontrola na demagnetizaci. Velikost proudu, která by způsobila demagnetizaci permanentních magnetů je dána vztahem:

$$\begin{aligned} I_{demag} &= \left[\frac{1000}{4\pi \cdot 39,37} \right] \cdot \frac{4 \cdot p \cdot a \cdot (\delta + l_{PM}) \cdot 10^{-3} \cdot H_d}{Z_{sa}} = \\ &= 2,02 \cdot \frac{4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot (0,7 + 3) \cdot 10^{-3} \cdot 994700}{\frac{2}{3} \cdot 814} = 109,53A \end{aligned} \quad (3.39)$$

Z výsledku vyplývá, že proud potřebný na demagnetizaci použitých permanentních magnetů má několikanásobně vyšší velikost oproti proudům, které se mohou ve stroji běžně objevit. Můžeme tedy konstatovat, že demagnetizace vlivem proudu nehrozí.

Pro možnost porovnání výsledků v prostředí Ansys ještě dopočítáme velikosti indukci v jednotlivých částech za předpokladu $B_\delta = 0,75 T$.

$$B_{zs} = B_\delta \cdot \frac{b_{zs} + b_s}{b_{zs}} = 0,75 \cdot \frac{3,13 + 4,24}{3,13} = 1,77T \quad (3.40)$$

$$l_p = \frac{2\pi \cdot r_{ro}}{2p} \cdot \frac{\alpha}{180} = \frac{2\pi \cdot 24,3}{4} \cdot \frac{120}{180} = 25,45mm \quad (3.41)$$

$$B_{js} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{js}} = \frac{25,45}{2} \cdot \frac{0,75}{9} = 1,06T \quad (3.42)$$

$$B_{jr} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{jr}} = \frac{25,45}{2} \cdot \frac{0,75}{14} = 0,6T \quad (3.43)$$

Vypočtené hodnoty návrhu budou nyní srovnány s parametry získanými programem Ansys RMXprt. Výsledné vypočtené parametry jsou porovnány v následující tabulce:

Veličina	Jednotka	Výpočet	Výpočet v RMXprt	Procentuální rozdíl [%]
k_E	[Vs/rad]	<u>0,356</u>	<u>0,294</u>	<u>-21,09</u>
k_T	[Nm/A]	<u>0,356</u>	<u>0,301</u>	<u>-18,27</u>
N	[-]	34	34	0,00
l_z	[mm]	165,64	171,71	3,54
R_{civky}	[Ω]	0,199	0,213	6,35
R_{faze}	[Ω]	0,798	0,850	6,10
$R_{2/3faze}$	[Ω]	1,595	1,700	6,16
I_n	[A]	2,81	2,83	0,71
I_{ef}	[A]	2,29	2,31	0,87
σ	[A/mm ²]	<u>4,03</u>	<u>4,99</u>	<u>19,24</u>
m_s	[kg]	<u>0,765</u>	<u>0,719</u>	<u>-6,40</u>
ΔP_{Fe}	[W]	<u>21,65</u>	<u>31,17</u>	<u>30,54</u>
ΔP_{Cu}	[W]	<u>12,60</u>	<u>20,47</u>	<u>38,45</u>
ΔP_{mech}	[W]	<u>10,00</u>	<u>15,42</u>	<u>35,15</u>
ΔP_c	[W]	<u>41,75</u>	<u>66,39</u>	<u>37,11</u>
n	[min ⁻¹]	<u>5000</u>	<u>6019</u>	<u>16,93</u>
η	[%]	92,60	89,58	-3,37
M	[Nm]	1	1,001	0,10

Tabulka č. 4 – Shrnutí vypočtených hodnot a výsledků z RMXprt

Na základě výše uvedené tabulky lze pozorovat, že některé hodnoty analytického výpočtu a programu RMXprt se dramaticky liší. Červenou barvou jsou zvýrazněny výsledky s rozdílem vyšším než 10 %. Na základě velkého rozdílu jmenovitých otáček můžeme předpokládat, že volba jmenovitých otáček jako 90 % otáček v nezátženém stavu byla poněkud nekorektní. Tato volba měla dopad na předpokládaný počet závitů, což zapříčinilo značné nepřesnosti ve výsledcích výpočtů odporů, stanovení proudové hustoty a také ve velikostech zastoupení ztrát v mědi a ztrát v železe.

V dalším kroku je tedy na místě provést patřičnou korekci počtu závitů a následný přepočítání všech veličin spojených s touto změnou.

Nejprve si určíme procentuální hodnotu otáček, kterou využijeme pro přepočítání počtu závitů tak, abychom dosáhli otáček požadovaných. Změna otáček je popsána následujícím vztahem:

$$\Delta n_{\%} = \frac{n_{n\dot{z}} - n_{ns}}{n_{ns}} \cdot 100 = \frac{5000 - 6019}{5000} \cdot 100 = -20,38\% \quad (3.44)$$

A nový počet závitů bude na základě této hodnoty:

$$Z = Z_{puv} \cdot (1 + \Delta n_{\%}) = 34 \cdot 1,204 = 40 \quad (3.45)$$

S ohledem na neměnnou plochu drážky a uvažovaný činitel plnění se nově přepočítaný průměr vodiče bude rovnat:

$$d_v = \sqrt{\frac{S_{ds} \cdot k_{pCu}}{N}} = \sqrt{\frac{49 \cdot 0,5}{40}} = 0,78mm \rightarrow 0,75mm \quad (3.46)$$

Novému průměru vodiče poté bude odpovídat průřez vypočtený dle:

$$S_v = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,75^2}{4} = 0,442mm^2 \quad (3.47)$$

Z přepočtených rozměrů jsme nyní již schopni stanovit odpor vinutí za předpokladu, že střední délku závitu uvažujeme stejnou jako v prvotním výpočtu.

Jednotlivé složky odporu vinutí budou vypočteny dle následujících vztahů:

$$R_{cívky} = \frac{N \cdot l_z}{S_v} \cdot \rho_{60^\circ C} = \frac{41 \cdot 165,64 \cdot 10^{-3}}{0,442 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,01 \cdot 10^{-8} = 309m\Omega \quad (3.48)$$

$$R_f = 4 \cdot R_{cívky} = 4 \cdot 309 \cdot 10^{-3} = 1,236\Omega \quad (3.49)$$

$$R_v = 2 \cdot R_f = 2 \cdot 1,236 = 2,472\Omega \quad (3.50)$$

Vlivem vyššího odporu se sníží maximální proud, který se může v obvodu objevit:

$$I_{\max} = \frac{U - k_E \omega - \Delta U_{tr}}{R_v + R_n} = \frac{207 - 186,4 - 1}{2,472 + 1} = 5,64A \quad (3.51)$$

Ztráty se vlivem většího odporu navýší dle vztahu:

$$\Delta P_{Cu} = R_v \cdot I_n^2 = 2,472 \cdot 2,81^2 = 19,52W \quad (3.52)$$

A celkové ztráty ve stroji s upravenými závity budou odpovídat:

$$\Delta P_c = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 19,52 + 21,65 + 10 = 51,17W \quad (3.53)$$

Což vede na mírné snížení předpokládané účinnosti na základě výpočtu:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_c} = \frac{525}{525 + 46,46} = 0,911 \rightarrow 91,1\% \quad (3.54)$$

A nakonec nově přepočtený proud, jehož velikost by způsobila demagnetizaci permanentního magnetu bude odpovídat:

$$I_{demag} = \left[\frac{1000}{4\pi \cdot 39,37} \right] \cdot \frac{4 \cdot p \cdot a \cdot (\delta + l_{PM}) \cdot 10^{-3} \cdot H_d}{Z_{sa}} =$$

$$= 2,02 \cdot \frac{4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot (0,7 + 3) \cdot 10^{-3} \cdot 994700}{\frac{2}{3} \cdot 960} = 92,93A \quad (3.55)$$

Následujícím krokem bude provést novou analýzu metodou konečných prvků v prostředí programu RMxprt s aplikací nového přepočteného počtu závitů. Porovnání přepočtených veličin a výsledků simulace je opět uvedeno v tabulce:

Veličina	Jednotky	Upravený výpočet	Výsledky RMxprt	Procentuální rozdíl [%]
k_E	[Vs/rad]	0,356	0,350	-1,71
k_T	[Nm/A]	0,356	0,354	-0,56
N	[-]	40	40	0,00
l_z	[mm]	165,72	171,71	3,49
R_{civky}	[Ω]	0,309	0,321	3,74
R_{faze}	[Ω]	1,236	1,284	3,74
$R_{2/3faze}$	[Ω]	2,472	2,568	3,74
I_n	[A]	2,81	2,88	2,43
I_{ef}	[A]	2,29	2,40	4,58
σ	[A/mm ²]	5,18	5,43	4,60
m_s	[kg]	0,765	0,719	-6,40
ΔP_{Fe}	[W]	21,65	24,98	13,33
ΔP_{Cu}	[W]	19,52	22,21	12,11
ΔP_{mech}	[W]	10	10,31	3,01
ΔP_c	[W]	51,17	57,50	11,01
n	[min ⁻¹]	5000	5076	1,50
η	[%]	91,11	89,36	-1,96
M	[Nm]	1	1,001	0,10

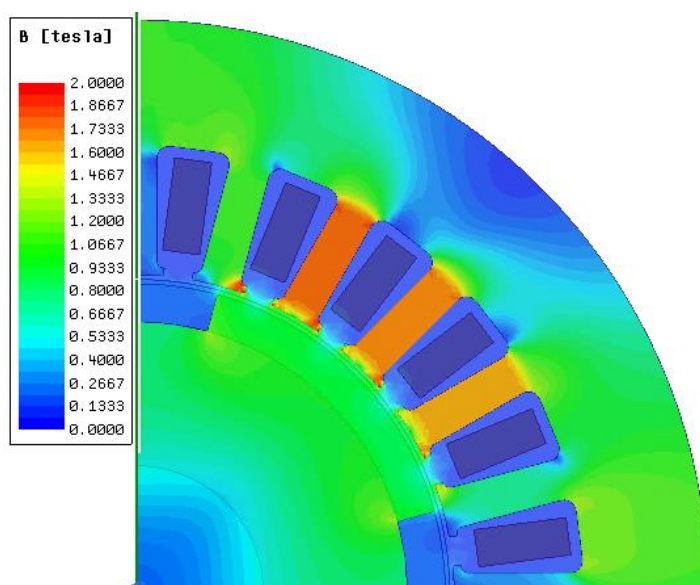
Tabulka č. 5 – Shrnutí vypočtených hodnot a výsledků simulace po provedení korekce

Na základě výsledků tabulky můžeme pozorovat, že jsme vhodnou úpravou byli schopni dosáhnout mnohem přesnějších výsledků, než tomu bylo v prvotním odhadu. Navýšení počtu závitů mělo vliv na zvýšení odporu a navýšení ztrát, čímž se početní výsledky výrazně přiblížily hodnotám získaným vypočteným v prostředí RMXprt. Výsledné velikosti odporů dosahují nepřesnosti nižší než 4 % a dříve značná nepřesnost konstant motoru se vlivem úpravy závitů snížila na odchylku nižší než 2 %.

Lze konstatovat, že z hlediska prvotního návrhu jsou vypočtené výsledky již dostačující a vhodné pro další analýzu. Jedinou výraznější odchylkou od výsledků analýzy tvoří zastoupení jednotlivých ztrát ve stroji, kde maximální rozdíl pozorované veličiny tvoří 3,33 W v případě ztrát v železe. Přesnost výsledků by bylo možné dále navýšit korekcí některých rozdílných hodnot, zejména pak např. přepočtem střední délky závitů. Dá se však říci, že v rovině prvotního návrhu, s ohledem na přijatá zjednodušení, jsou výsledky s hodnotami získanými simulací velmi podobné a není třeba provádět další korekce.

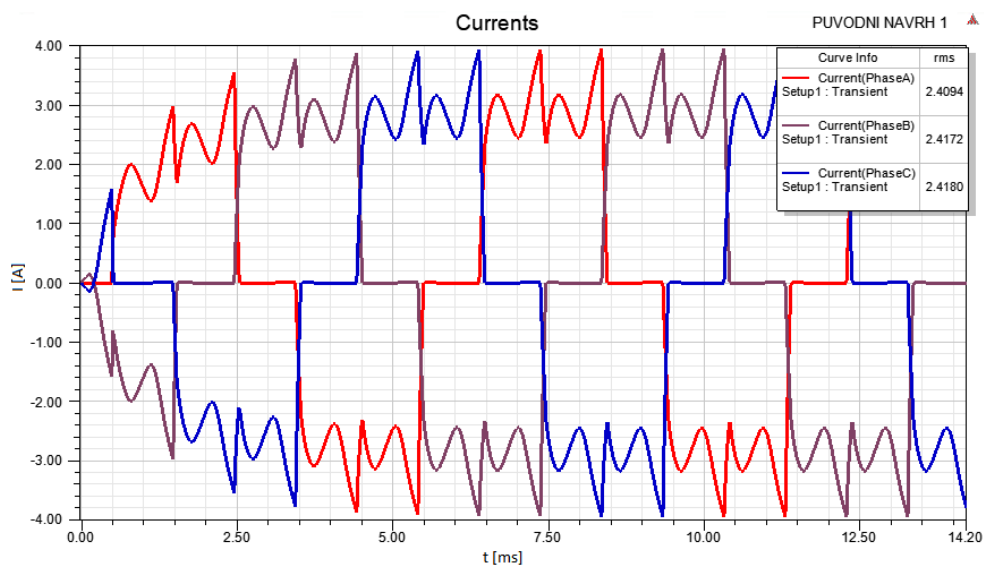
Na základě dosud získaných parametrů byl sestaven model stroje v prostředí Ansys Maxwell a byla provedena analýza navrhovaného motoru metodou konečných prvků. [12][13]

Nyní bude zobrazeno několik vybraných výsledků získaných analýzou metodou konečných prvků v prostředí Ansys Maxwell. Prvním je obrázek znázorňující rozložení velikosti magnetické indukce ve čtvrtinovém řezu stroje:



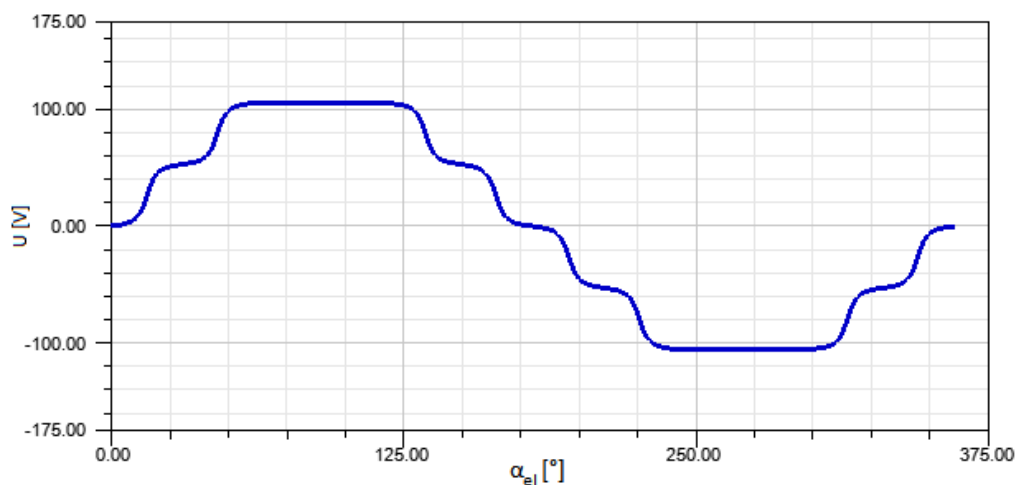
Obr. č. 9 – Rozložení magnetické indukce v prvním stroji

Na **Obr. č. 9** pozorovat, že z hlediska sycení jsou nejvíce namáhány zuby statorového plechu, kde v extrémních případech indukce dosahuje přibližně 1,93 T, napříč zubem se potom indukce pohybuje okolo 1,79 T. Za zmínku stojí velikost sycení statorového jha, jenž dosahuje poměrně nízkých hodnot (1,06 T) a v případě volby jiného plechu by stálo za úvahu velikost statorového jha snížit ve prospěch navýšení velikosti drážky.



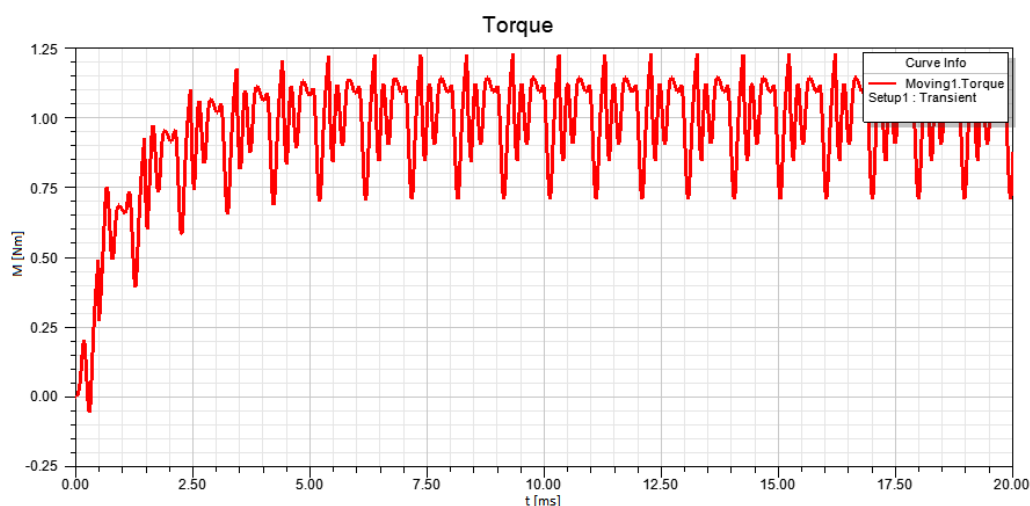
Obr. č. 10 – Průběhy proudů první varianty motoru

Jak je možno pozorovat na **Obr. č. 10**, výsledný průběh procházejících proudů se ve srovnání s idealizovaným tvarem průběhu vyznačuje zdatelnou deformací. Deformaci proudu ovlivňuje tvar indukovaného napětí, to při zatížení oproti průběhu na **Obr. č. 11** nabývá více lichoběžníkového až sinusového tvaru a samo je ovlivněno provedením vinutí a vlastními a vzájemnými indukčnostmi.



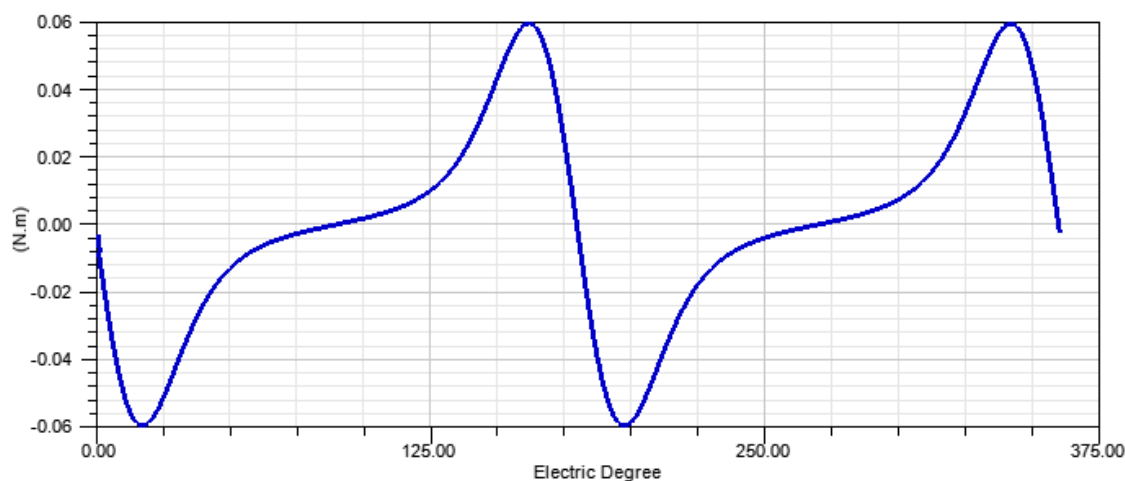
Obr. č. 11 – Průběh indukovaného napětí první varianty stroje

Tvar průběhu indukovaného napětí ve vodičích první varianty motoru v nezátíženém stavu odpovídá předpokládanému tvaru průběhu typického pro BLDC stroje se dvěma drážkami na pól a fázi.



Obr. č. 12 – Průběh momentu v závislosti na čase pro první variantu stroje

Průběh momentu se v případě prvotní varianty stroje vyznačuje zřetelným zvlněním. To představuje jistou nevýhodu, neboť ideálem by byl téměř nezvlněný relativně konstantní moment. Zvlnění je zapříčiněno tvarem procházejícího proudu a přítomností reluktančního momentu.



Obr. č. 13 – Charakteristika reluktančního momentu pro první stroj

Již zmíněný reluktanční moment může často představovat velký problém u strojů s permanentními magnety, a pokud se nevěnuje pozornost jeho redukci, může dosahovat až 10 % velikosti jmenovitého momentu. Původně zvolená kombinace 24 drážek a 4 póly s sebou přináší právě nechtěnou přítomnost značného

reluktančního momentu. Opatření pro redukci reluktančního zvlnění momentu spočívá v takové geometrické úpravě, kdy je plocha překrytí pólů magnetů a pat statorových zubů konstantní. K tomu dochází nejlépe při takové konfiguraci, kdy je mezera mezi magnety přibližně rovna celistvým násobkům drážkové rozteče. Mimo volby jiné kombinace počtu drážek a pólů (např. 12 drážek na 10 pólů) je možno zmíněného opatření dosáhnout modifikací pólového krytí. Celistvých násobků dosahujeme zejména při krytí 120°/180° a 150°/180° elektrických stupňů. Napříč všemi počítanými variantami vycházelo pólové krytí 150°el. nejlépe pro minimalizaci reluktančního zvlnění momentu, ale krytí 120°el. vedlo ve všech případech na vyšší výslednou účinnost při současném dodržení dostatečně nízkého reluktančního momentu. Na základě těchto zjištění bylo u všech variant jednotně použito pólové krytí 120°el.

Výsledky ručního výpočtu, výsledky výpočtu v prostředí RMxprt a výsledky simulace jsou shrnuty v následující tabulce:

Veličina	Jednotka	Prvotní návrh stroje		
		Výpočet	RMxprt	Maxwell
B_{δ}	[T]	0,75	0,77	0,76
B_{js}	[T]	1,06	1,08	1,06
B_{jr}	[T]	0,6	0,97	1,06
B_{zs}	[T]	1,77	1,86	1,79
I_{ef}	[A]	2,29	2,40	2,41
M	[Nm]	1	1	1,02
ΔP_{Fe}	[W]	21,65	24,98	28,4
ΔP_j	[W]	19,52	22,21	20,92
P_1	[W]	576,17	596,91	611,37
P_2	[W]	525	533,66	543,81
η	[%]	91,11	89,36	88,95

Tabulka. č. 6 – Souhrn výsledků prvotního návrhu stroje

Tímto můžeme považovat první variantu návrhu za kompletní. Následujícím vhodným krokem v praxi by byl pokyn ke zhotovení prototypu navrženého stroje s následným měřením veličin a následným porovnáním. Obecně by se dalo očekávat, že by vyrobený prototyp dosahoval mírně horších parametrů například vlivem nedokonalých materiálů (zejména pak vlivem vlastností plechů ovlivněných stříhem), či přítomností dodatečných ztrát.

3.2 Úprava původního stroje

Druhou variantu bude představovat variace původního návrhu stroje s přijetím několika dílčích změn za účelem navýšení účinnosti motoru. Zároveň, jak již bylo dříve zmíněno, budou zachovány některé parametry jako např. tvar a výška magnetů a vnitřní a vnější průměr statorového plechu. Počet pólů stroje a délku svazku v případě této varianty ponecháme původní.

Návrh se bude soustředit, mimo jiné, na vhodnější úpravu geometrie statorového plechu. Vzhledem k tomu, že cílem této varianty je dosažení vyšší účinnosti ve srovnání s původním návrhem, by rovněž mohl být použit kvalitnější statorový plech, i když se výhoda této volby projeví více až při vícepólových variantách; v tomto případě ještě ponecháme původní materiál plechu. Změna tvaru i materiálu plechů by v reálné výrobě mohla představovat znatelné navýšení ceny, takže je v každém návrhu vylepšení stroje nutno brát v úvahu taktéž změnu ceny doprovázející navrhované změny. Vzhledem k charakteru této práce však není ekonomické hodnocení dále zohledňováno a není zde srovnávacím faktorem.

Na základě toho, že postup výpočtu dle [1] vykazuje rozdíl ve výsledcích ve srovnání s výsledky z prostředí RMxprt a Maxwell, nebo je nutná následná korekce, budou dále počítané varianty postupovat kombinací návrhových postupů dle [1], [2] a [7]. Tímto chceme dosáhnout přesnějšího výpočtu bez nutnosti následné korekce některých parametrů vykazujících významné odchylky. Zároveň bude platit, že ve veškerých dalších návrzích budou zobrazeny pouze výpočty parametrů, jenž se jakýmkoliv způsobem liší.

První kroky návrhu budou opět spojeny s kalkulací EMF konstanty motoru. Pro zjištění této konstanty odhadujeme otáčky naprázdno stroje jako $n_0 = 5700 \text{ min}^{-1}$. Úhlová rychlost potom bude:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 5700}{60} = 597 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.56)$$

Předběžná kalkulace EMF konstanty odpovídá:

$$k_E = \frac{U}{\omega_0} = \frac{207}{597} = 0,346 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}} \quad (3.57)$$

Opět zavádíme zjednodušující předpoklad $k_E = k_T$, jmenovitý proud odpovídající konstantě a momentu stroje bude odpovídat:

$$I_n = \frac{M}{k_T} = \frac{1}{0,346} = 2,89 \text{ A} \quad (3.58)$$

Efektivní hodnota proudu za předpokladu, že v daný moment jsou aktivní vždy dvě ze tří drážek:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_n = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 2,89 \text{ A} = 2,36 \text{ A} \quad (3.59)$$

Následující část bude spojena s návrhem rozměrů statorové drážky. Pro dopočet těchto rozměrů je nutno zvolit proudovou hustotu a na základě hustoty vodivého proudu stanovit odpovídající požadovaný průřez vodiče. Vzhledem k faktu, že zachováváme vnější průměr statoru a v původním tvaru plechu je poměrně vysoké statorové jho, můžeme snížit proudovou hustotu ve vodiči a přeneseně i velikost drážky, aniž bychom se museli obávat nebezpečného sycení jha vlivem nedostatečné výšky statorového jha.

Průřez vodiče je dán poměrem efektivní hodnoty proudu a proudové hustoty:

$$S_v = \frac{I_{ef}}{\sigma} = \frac{2,36}{4} = 0,59 \text{ mm}^2 \quad (3.60)$$

Vypočtenému průřezu odpovídá následující průměr vodiče:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,59}{\pi}} = 0,866 \rightarrow 0,85 \text{ mm} \quad (3.61)$$

Pro výsledný průměr vodiče zvolíme nejbližší nižší z řady běžně dostupných průměrů drátu a následně provedeme přepočet plochy průřezu dle:

$$S_v = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,85^2}{4} = 0,568 \text{ mm}^2 \quad (3.62)$$

Snížení průřezu mimo jiné také povede na zvýšení proudové hustoty vodičem přibližně na $\sigma = 4,16 \text{ A/mm}^2$.

Následujícím krokem bude stanovení počtu vodičů v drážce. Pro výpočet je nutno stanovit střední délku vzduchové mezery dle:

$$r_\delta = \frac{d_{si}}{2} - \frac{\delta}{2} = \frac{50}{2} - \frac{0,7}{2} = 24,65 \text{ mm} \quad (3.63)$$

Počet vodičů jedné fáze zapojených do série je dán vztahem:

$$N_{1f} = \frac{U_{i1fmax}}{B_\delta \cdot r_\delta \cdot l_{Fe} \cdot \omega} = \frac{100}{0,8 \cdot 24,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,03 \cdot 523,6} = 322,8 \quad (3.64)$$

Zde již volíme indukované napětí jedné fáze s ohledem na napěťové úbytky na tranzistorech měniče, s jistou rezervou. Volíme tedy hodnotu 100 V. Magnetickou indukci ve vzduchové mezeře volíme $B = 0,8 \text{ T}$.

Počet vodičů uložených v jedné drážce následně určíme jako:

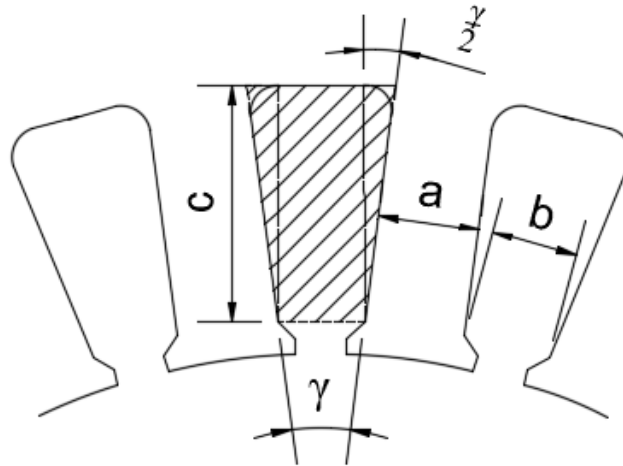
$$N_{dr} = \frac{N_{1f}}{q \cdot 2p} = \frac{322,8}{2 \cdot 4} = 40,35 \rightarrow 40 \text{ vodičů} \quad (3.65)$$

Potřebná plocha drážky se odvíjí od počtu vodičů v drážce o daném průřezu a voleného činitele plnění; zde volíme $k_{p,Cu} = 0,4$.

$$S_{dr} = \frac{N \cdot S_v}{k_{p,Cu}} = \frac{40 \cdot 0,568}{0,4} = 56,8 \text{ mm}^2 \quad (3.66)$$

Nyní již můžeme přistoupit k dopočtu rozměrů drážek. Návrh geometrických rozměrů plechu stroje je věcí neustálého kompromisu, neboť každý parametr má nějakým způsobem dopad na parametry jiné. Pokud bychom se rozhodli neustále zvětšovat drážku, narazíme brzy na problém příliš velkého sycení ve zúžených částech plechu. Naopak redukce rozměrů drážky vede na vodiče o menších průřezích a navýšení proudové hustoty. Z technologického hlediska rovněž nesmíme opomínat fakt, že některé rozměry drážky významně souvisí s obtížností navíjení, ať už se jedná o strojové navíjení, či ruční vsypávání. Kromě počítaných parametrů znázorněných na **Obr. č. 14** se nebudeme ostatními rozměry geometrie drážky dopodrobna zabývat; v praxi provede návrh tvaru a rozměrů paty zubu zkušený konstruktér.

První krok této části návrhu spočívá ve stanovení velikosti šířky zubu. Zde lze často volit oba rozměry stejné, ale s ohledem na rozložení indukce na **Obr. č. 9** a podobné velikosti ztrát v železe i ve vinutí zvolíme mírné rozšíření statorového zubu.



Obr. č. 14 – Orientační náčrt znázorňující počítané rozměry drážky

Oblouk popisující šířku zubu a drážky lze popsat následovně:

$$(a + b) = 2\pi \cdot \frac{(r_{ro} + \delta + 1,2)}{Q} = 2\pi \cdot \frac{(24,3 + 0,7 + 1,2)}{24} = 6,86 \text{ mm} \quad (3.67)$$

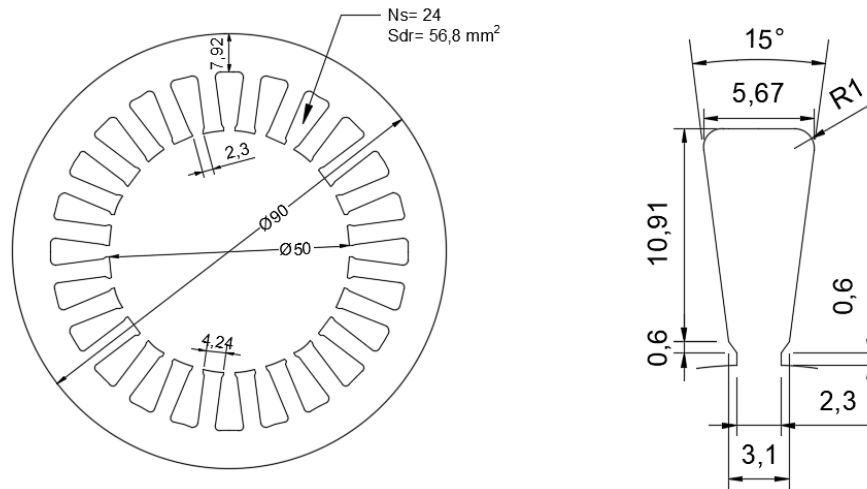
Pro zajištění větší šířky zubu ve srovnání se šířkou drážky tento výsledek rozdělíme v poměru 55:45. Potom bude platit $b_z = a = 3,77 \text{ mm}$ a $b_{ds} = b = 3,09 \text{ mm}$.

Úhel drážky bude dán vztahem:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{Q} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ \quad (3.68)$$

A výšku užitečné plochy drážky dopočteme pomocí následujícího vztahu:

$$c = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4S_{dr} \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{-3,77 + \sqrt{3,77^2 + 4 \cdot 56,8 \cdot \tan(7,5^\circ)}}{2 \cdot \tan(7,5^\circ)} = 10,91\text{mm} \quad (3.69)$$



Obr. č. 15: Orientační znázornění geometrie statorového plechu druhého stroje

V tuto chvíli již můžeme přistoupit ke zrychlenému stanovení střední délky závitů:

$$l_z = 2l_{Fe} + 4 \frac{b_{ds}}{2} + 2l_{z1} \quad (3.70)$$

Střední poloměr drážky:

$$r_{ds} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(d_{si} + d_{dso})}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(50 + 74,22)}{2} = 31,06\text{mm} \quad (3.71)$$

Délka oblouku spojujícího středy statorových drážek:

$$l_{z1} = \frac{2\pi \cdot r_{ds}}{2p} = \frac{2\pi \cdot 31,06}{4} = 48,79\text{mm} \quad (3.72)$$

Šířka drážky odpovídající střednímu poloměru:

$$b_{ds} = \frac{2\pi \cdot r_{ds}}{Q} - b_z = \frac{2\pi \cdot r_{ds}}{24} - 3,77 = 4,36\text{mm} \quad (3.73)$$

Celková střední délka závitů:

$$l_z = 2 \cdot 30 + 4 \cdot \frac{4,36}{2} + 2 \cdot 48,79 = 166,3\text{mm} \quad (3.74)$$

Nyní je možno zrychleně dopočítat příslušné odpory:

$$R_{cívky} = \frac{N \cdot l_z}{S_v} \cdot \rho_{60^\circ C} = \frac{40 \cdot 166,3 \cdot 10^{-3}}{0,568 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,01 \cdot 10^{-8} = 235,4 m\Omega \quad (3.75)$$

$$R_f = 4R_{cívky} = 4 \cdot 235,4 = 941,6 m\Omega \quad (3.76)$$

$$R_v = 2R_{fáze} = 2 \cdot 941,6 = 1,883 \Omega \quad (3.77)$$

Následný krok spočívá ve zkráceném odhadu magnetických indukcí v jednotlivých částech:

$$B_{zs} = B_\delta \cdot \frac{b_{zs} + b_s}{b_{zs}} = 0,8 \cdot \frac{3,77 + 3,09}{3,77} = 1,46 T \quad (3.78)$$

$$B_{js} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{js}} = \frac{25,45}{2} \cdot \frac{0,8}{7,92} = 1,29 T \quad (3.79)$$

$$B_{jr} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{jr}} = \frac{25,45}{2} \cdot \frac{0,8}{14} = 0,72 T \quad (3.80)$$

Dále je nutno vypočítat objemy jednotlivých částí tvořených elektrotechnickými plechy dle následujících vztahů:

Ekvivalentní objem statorových drážek:

$$V_{dr} = S_{dr} \cdot l_{Fe} \cdot Q = 56,8 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 24 = 4,09 \cdot 10^{-5} m^3 \quad (3.81)$$

Objem jha statoru:

$$\begin{aligned} V_{Fe,js} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{so}^2}{4} - \frac{d_{sij}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(90 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(74,16 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 6,127 \cdot 10^{-5} m^3 \end{aligned} \quad (3.82)$$

Objem statorových zubů:

$$\begin{aligned} V_{Fe,z} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{sij}^2}{4} - \frac{d_{si}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} - V_{dr} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(74,16 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(50 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 30 \cdot 10^{-3} - 4,09 \cdot 10^{-5} = 2,98 \cdot 10^{-5} m^3 \end{aligned} \quad (3.83)$$

Objem rotorového železa:

$$V_{Fe,jr} = \pi \cdot \left(\frac{d_{rj}^2}{4} - \frac{d_{rji}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} =$$

$$= \pi \cdot \left(\frac{(42,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(30 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 2,16 \cdot 10^{-5} m^3 \quad (3.84)$$

Nyní již budeme schopni provést dopočet dílčích ztrát v železe stroje dle následujících rovnic. Měrné ztráty jsou odečítány dle jednotlivých předpokládaných indukcí z [8] s ohledem na linearizaci hodnot pro dané hodnoty indukcí při dané frekvenci. Hustotu plechu volíme $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$.

Ztráty tvořené ve jhu statoru:

$$\Delta P_{Fe,js} = \Delta p_{1,0js} \cdot V_{Fe,js} \cdot \rho_{Fe} = 20,2 \cdot 6,127 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 9,65W \quad (3.85)$$

Podíl ztrát vytvořených ve statorových zubech:

$$\Delta P_{Fe,zs} = \Delta p_{1,0zs} \cdot V_{Fe,z} \cdot \rho_{Fe} = 28,3 \cdot 2,98 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 6,58W \quad (3.86)$$

Magnetický tok se uzavírá cestou: magnet (pól) – jho rotoru – sousední pól – vzduchová mezera – zub statoru – jho statoru – zub statoru – vzduchová mezera – výchozí bod. Vzhledem k tomu, že uvažujeme rotor rovněž tvořen plechy, počítáme rovněž přírůstek ztrát v železe tvořený touto geometrií. Ztráty v železe rotoru:

$$\Delta P_{Fe,r} = \Delta p_{1,0r} \cdot V_{Fe,r} \cdot \rho_{Fe} = 11,7 \cdot 2,16 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 1,97W \quad (3.87)$$

Výsledné ztráty v železe stroje jsou poté dány součtem dílčích částí:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe,js} + \Delta P_{Fe,zs} + \Delta P_{Fe,r} = 9,65 + 6,58 + 1,97 = 18,2W \quad (3.88)$$

Reálně můžeme počítat značné zhoršení ztrát v železe odpovídající různým faktorům. Z rozložení indukce řezem stroje bylo možno pozorovat, že v jednotlivých částech plechu není velikost indukce rozložena rovnoměrně, ale místně dosahuje znatelně vyšších hodnot, než je průměr (až 1,93T). Rovněž je nutno předpokládat, že reálný plech nedisponuje dokonalými vlastnostmi po celé geometrii, ale naopak může vykazovat vlastnosti zhoršené, a to zejména v místech stříhu.

Nyní zbývá dopočítat ztráty ve vinutí způsobené průchodem proudu:

$$\Delta P_{Cu} = R_v \cdot I_n^2 = 1,883 \cdot 2,89^2 = 15,73W \quad (3.89)$$

Ztráty mechanické budeme napříč variantami návrhů uvažovat totožné, tedy $\Delta P_{mech} = 10 \text{ W}$.

Celkové ztráty budou odpovídat součtu dílčích ztrát získaných dříve:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 15,73 + 18,2 + 10 = 43,93W \quad (3.90)$$

V tuto chvíli již můžeme stanovit účinnost stroje dle vztahu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{525}{525 + 43,93} = 92,2\% \quad (3.91)$$

Nakonec je ještě potřeba odhadnout maximální možný proud, který se ve stroji za běžného provozu může objevit:

$$I_{max} = \frac{U - k_E \omega - \Delta U_{tr}}{R_v + R_n} = \frac{207 - 0,346 \cdot 523,6 - 7}{1,883 + 1} = 6,53A \quad (3.92)$$

A pro kontrolu stanovíme velikost proudu, který by způsobit trvalou demagnetizaci permanentního magnetu jako:

$$\begin{aligned} I_{demag} &= \left[\frac{1000}{4\pi \cdot 39,37} \right] \cdot \frac{4 \cdot p \cdot a \cdot (\delta + l_{PM}) \cdot 10^{-3} \cdot H_d}{N_{sa}} = \\ &= 2,02 \cdot \frac{4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot (0,7 + 3) \cdot 10^{-3} \cdot 994700}{16 \cdot 40} = 92,93A \end{aligned} \quad (3.93)$$

Velikost demagnetizačního proudu je několikanásobně větší a ve stroji se za běžných podmínek nemůže objevit. Můžeme konstatovat, že zničení permanentních magnetů vlivem demagnetizace nehrozí.

V příštím kroku bude opět sestaveno zadání v prostředí RMxprt odvíjejícího se od zadaných parametrů a bude proveden výpočet. Získané výsledky budou promítnuty do tabulky společně se seznamem výsledků získaných ručním výpočtem pro možnost přehledného porovnání.

Parametr	Jednotka	Výpočet	RMxpřt
k_E	[Vs/rad]	0,346	0,349
k_T	[Nm/A]	0,346	0,359
N	[-]	40	40
l_z	[mm]	166,3	172,8
R_{civky}	[Ω]	0,235	0,252
R_{faze}	[Ω]	0,942	1,006
$R_{2/3faze}$	[Ω]	1,883	2,012
I_n	[A]	2,89	2,84
I_{ef}	[A]	2,36	2,38
σ	[A/mm ²]	4,16	4,19
B_δ	[T]	0,8	0,8
B_{js}	[T]	1,29	1,34
B_{zs}	[T]	1,46	1,51
B_{jr}	[T]	0,72	0,97
ΔP_{Fe}	[W]	18,2	27,43
ΔP_{Cu}	[W]	15,73	17,08
ΔP_{mech}	[W]	10	10,1
ΔP_c	[W]	43,93	54,61
η	[%]	92,2	90,6
n	[min ⁻¹]	5000	5025
M	[Nm]	1	1

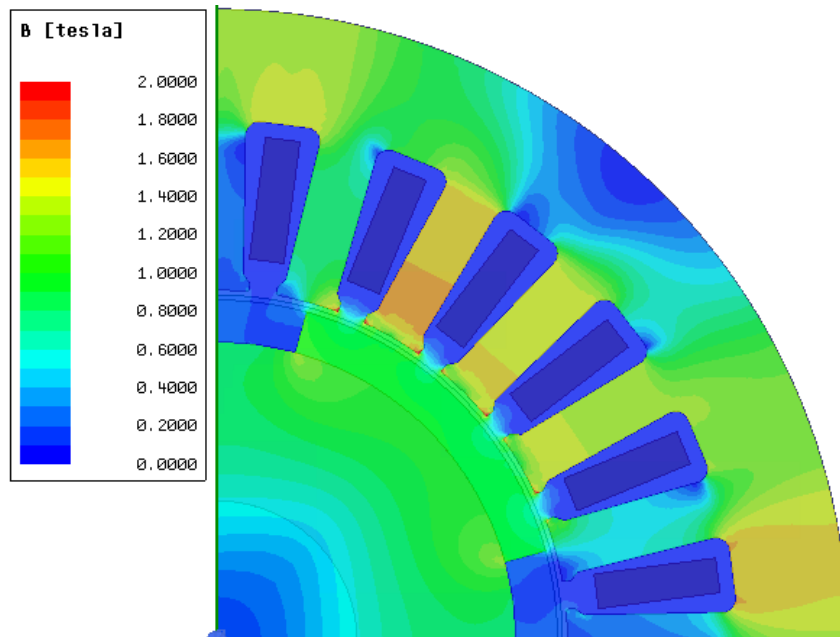
Tabulka. č. 7: Výsledky ručního návrhu a hodnoty vypočtené v RMxpřt

Na základě výsledků uvedených v tabulce výše lze pozorovat, že změnou metody výpočtu bylo dosaženo mnohem přesnějších výsledků oproti původní metodě návrhu, a to i za předpokladu, že nebyla prováděna jakákoliv korekce. Tímto můžeme označit druhou možnost metody návrhu za vhodnější pro následnou práci a porovnání s programovými částmi Ansys RMxpřt a Maxwell a rovněž se dá říci, že použitá metoda se jeví jako méně časově náročná.

Lze pozorovat, že účinnost vypočtená analytickým návrhem opět dosahuje optimističtějších hodnot, a to s rozdílem 1,6 %. To je způsobeno zejména rozdílem mezi výsledky ztrát v železe stroje, kde rozdíl činí 9,23 W. Mírně se liší i ztráty ve vinutí stroje, což je způsobeno zjednodušeným výpočtem střední délky závitů, neboť reálně v drážce nejsou vodiče rozmístěny rovnoměrně a oblouk spojující středy dvou drážek musí být delší z důvodu přítomnosti ostatních čel vinutí.

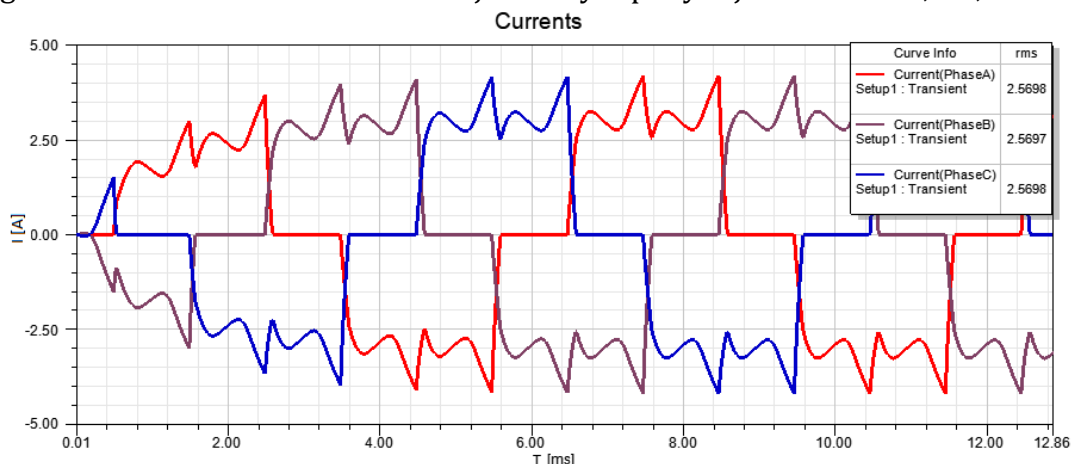
Mimo zmíněné parametry jsou výsledky velmi podobné a dá se konstatovat, že z hlediska prvotního ručního návrhu se výsledky nikterak zásadně neliší od výsledků získaných z RMxpřt. Dalším krokem tedy bude opět analýza v prostředí maxwell a následná prezentace výsledků získaných analýzou MKP.

Následující část této podkapitoly bude opět věnována zobrazení vybraných výsledků simulace:



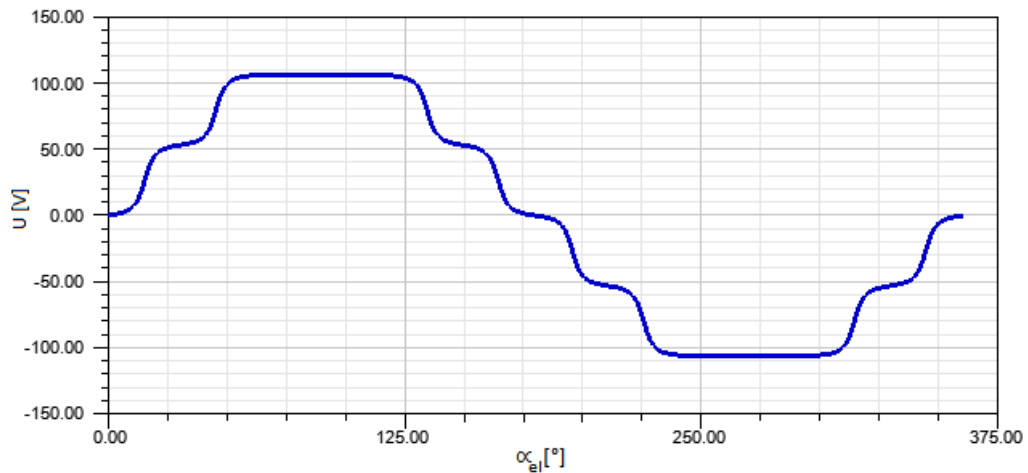
Obr. č. 16 – Rozložení magnetické indukce u druhé varianty návrhu

Ve srovnání s prvotním návrhem je možno pozorovat, že došlo k redukci lokálních oblastí dosahujících velmi vysoké hodnoty magnetické indukce vlivem nerovnoměrnosti. Jedinými zbývajícími místy bodově dosahujícími vysoké hodnoty indukce jsou hrany zubů statoru v bezprostřední blízkosti magnetu. Oproti prvotnímu návrhu stroje byla vhodnou změnou geometrie drážky snížena velikost indukce v zubu, kde nyní dosahuje maxima 1,61 T oproti dřívějším 1,93 T. Zároveň byla drážka upravena tak, že došlo k redukci výšky statorového jha, a snížením výšky jha byl potvrzen předpoklad mírného navýšení sycení v této geometrii. Nyní je zřetelné, že je statorové jho velmi nerovnoměrně syceno v závislosti na poloze magnetů. Rozsah velikosti indukce ve jhu se nyní pohybuje v rozmezí 0,2-1,5 T.



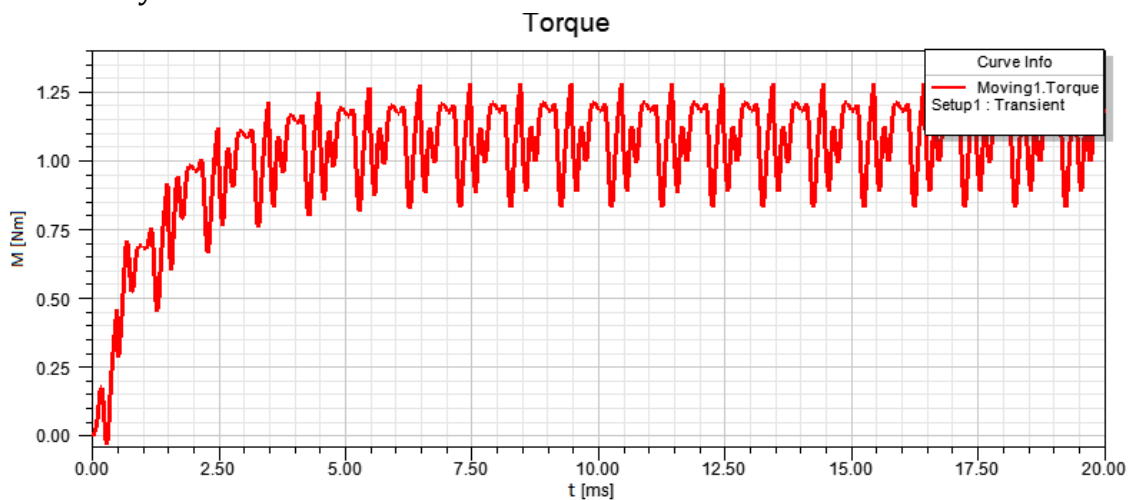
Obr. č. 17 – Průběhy proudů druhé varianty stroje

Tvary proudů opět vykazují deformaci oproti idealizovanému průběhu, ale ve srovnání s prvotním návrhem se příliš neliší. Drážka stroje se sice pozměnila, ale ze srovnávacího hlediska je stále velmi podobná. Jedinou změnou je fakt, že v případě efektivní hodnoty proudu došlo v případě upravené varianty k navýšení z původních 2,41 A na 2,56A.



Obr. č. 18 – Průběh indukovaného napětí ve druhé variantě stroje

V případě průběhu indukovaného napětí v nezatíženém stavu se nesetkáváme s žádnými významnými odchylkami a tvar charakteristiky opět odpovídá předpokládanému průběhu pro dvě drážky na pól a fázi. Přijaté změny v případě druhé varianty návrhu zmiňovanou charakteristiku indukovaného napětí nikterak neovlivnily.



Obr. č. 19 – Průběh momentu pro druhou variantu motoru

Charakteristika momentu v závislosti na čase opět vykazuje zvlnění a vzhledem k tomu, že v této oblasti nebyla přijata žádná cílená opatření, můžeme průběhy momentu pro první a druhou variantu návrhu považovat za téměř totožné.

Veličina	Jednotka	Vylepšení prvotního návrhu stroje		
		Výpočet	RMxpřt	Maxwell
B_{δ}	[T]	0,8	0,8	0,81
B_{js}	[T]	1,29	1,34	1,53
B_{jr}	[T]	0,72	0,97	0,88
B_{zs}	[T]	1,46	1,51	1,58
I	[A]	2,36	2,38	2,57
M	[Nm]	1	1	1,08
ΔP_{Fe}	[W]	18,2	27,43	16,58
ΔP_j	[W]	15,73	17,08	24,2
P_1	[W]	568,03	582,1	604,3
P_2	[W]	525	527,4	543,81
η	[%]	92,2	90,6	89,99

Tabulka č. 8: Souhrn výsledků druhé varianty návrhu stroje

Již zde lze pozorovat trend, že nejenže veličiny počítané ručně dávají optimističtější výsledky z důvodu zanedbávání celé řady jevů a parametrů, ale výsledky získané analýzou metodou konečných prvků v prostředí Ansys Maxwell bývají zpravidla v porovnání ještě horší. Důvodem je, že vzhledem ke své podstatě je metoda konečných prvků velmi přesným nástrojem pro výpočet veličin s cílem vysoké přesnosti. Při správném zadání a zohlednění parametrů, které mohou být v případě předběžného návrhu zanedbávány, jsme schopni získat velice přesné a komplexní informace. Metoda rovněž dovoluje účinně řešit a zobrazit výsledky veličin s ohledem na to, že jejich rozložení nemusí být napříč geometrií rovnoměrné, to je zřejmé právě v rozložení magnetické indukce geometrií stroje na **Obr. č. 15**. Vzhledem k charakteru metody používané výpočtem v Maxwell jsme schopni dosáhnout komplexních výsledků s vysokou přesností, a to zároveň s uvažováním vlivů jako např. ztrát v celých částech stroje (ztráty v PM). Na základě výše zmíněného tedy označujeme právě výsledky ze simulace Maxwell jako směrodatné

3.3 Stroj s jednovrstvým soustředěným vinutím

Další z variant úprav bude přistoupení ke změně vinutí z rozloženého na jednovrstvé soustředěné, čímž je možno dosáhnout významného zkrácení čel vinutí a přeneseně tedy i lepšího využití vinutí. Pro účinné využití soustředěného vinutí je však nutno přihlídnout také na kombinaci počtu drážek a pólů, jelikož původních 24 drážek se čtyřpólovým provedením nepředstavuje vhodného kandidáta pro zmíněnou úpravu vinutí, bude tedy zvolena nová kombinace, a to 12 drážek na 10 pólů. Tato kombinace v dnešní době představuje oblíbenou a hojně používanou variantu pro menší synchronní stroje s PM, a rovněž, oproti původní kombinaci, obecně disponuje nižším reluktančním momentem.

Volbou provedení stroje s vyšším počtem pólů se mimo jiné také sníží potřebná výška statorového jha a ušetřený prostor je možno využít ve prospěch drážky. Vzhledem k navrhovanému navýšení počtu pólů stroje však můžeme očekávat výrazné zvýšení ztrát v železe, proto pro desetipólové aplikace budeme uvažovat plech s nižším ztrátovým číslem na vyšších frekvencích, a to plech M235-35A. Aplikací těchto změn společně s opětovným návrhem drážky statoru máme za cíl dosáhnout vyšší účinnosti v porovnání s původním strojem.

První kroky návrhu jsou opět spojeny se stanovením úhlové rychlosti naprázdno:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 5600}{60} = 586,43 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.94)$$

A určení velikosti EMF konstanty:

$$k_E = \frac{U}{\omega_0} = \frac{207}{586,43} = 0,353 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}} \quad (3.95)$$

Za zjednodušujícího předpokladu rovnosti $k_E = k_T$ bude proud:

$$I_n = \frac{M}{k_T} = \frac{1}{0,353} = 2,83\text{A} \quad (3.96)$$

A efektivní hodnota proudu za předpokladu dvou třetin drážek současně aktivních:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_n = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 2,83\text{A} = 2,31\text{A} \quad (3.97)$$

Druhým krokem bude opět návrh vlastní geometrie stroje. Ve třetí variantě se nám mění počet drážek i počet pólů; s narůstajícím počtem pólů nám klesá velikost nutné výšky jha oproti původní variantě, ale rovněž musíme očekávat přítomnost značných ztrát v železe vzhledem k více než dvojnásobné frekvenci změny napětí. I v tomto případě je volba geometrie statorového plechu kompromisem mezi dostatečnou šířkou zubů a jha stroje při současné snaze o zajištění dostatečné velikosti drážky. Tvar plechu budeme navrhovat s cílem snížení indukce v zubu kvůli předpokládaným významným ztrátám v železe stroje.

Nejprve určíme průřez vodiče na základě jmenovitého proudu a volené proudové hustoty:

$$S_v = \frac{I_{ef}}{\sigma} = \frac{2,31}{4} = 0,578 \text{ mm}^2 \quad (3.98)$$

Vypočtenému průřezu odpovídá následující průměr vodiče:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,578}{\pi}} = 0,858 \rightarrow 0,85 \text{ mm} \quad (3.99)$$

Nejbližší reálně vyráběný průměr drátu jsme zvolili 0,85mm a průřez odpovídající nově zvolenému vodiči:

$$S_v = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,85^2}{4} = 0,568 \text{ mm}^2 \quad (3.100)$$

Snížení průřezu má za následek mírné zvýšení proudové hustoty vodičem přibližně na $\sigma = 4,07 \text{ A/mm}^2$.

Střední délka vzduchové mezery nutná pro stanovení počtu závitů bude:

$$r_\delta = \frac{d_{si}}{2} - \frac{\delta}{2} = \frac{50}{2} - \frac{0,7}{2} = 24,65 \text{ mm} \quad (3.101)$$

Počet vodičů jedné fáze zapojených do série je dán vztahem:

$$N_{1f} = \frac{U_{i1fmax}}{B_\delta \cdot r_\delta \cdot l_{Fe} \cdot \omega} = \frac{100}{0,8 \cdot 24,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,03 \cdot 523,6} = 322,8 \quad (3.102)$$

Magnetickou indukci ve vzduchové mezeře volíme jako $B_\delta = 0,8 \text{ T}$. Počet vodičů uložených v jedné drážce následně určíme jako:

$$N_{dr} = \frac{N_{1f}}{Q_f} = \frac{322,8}{4} = 81 \text{ vodičů} \quad (3.103)$$

Potřebná plocha drážky je závislá na počtu vodičů o spočteném průřezu zvětšená činitelem plnění (voleno $k_{p,Cu} = 0,4$).

$$S_{dr} = \frac{N \cdot S_v}{k_{p,Cu}} = \frac{81 \cdot 0,568}{0,4} = 115,02 \text{ mm}^2 \quad (3.104)$$

Oblouk popisující šířku zubu a drážky spočítáme dle vztahu:

$$(a + b) = 2\pi \cdot \frac{(r_{ro} + \delta + 1,2)}{Q} = 2\pi \cdot \frac{(24,3 + 0,7 + 1,2)}{12} = 13,72 \text{ mm} \quad (3.105)$$

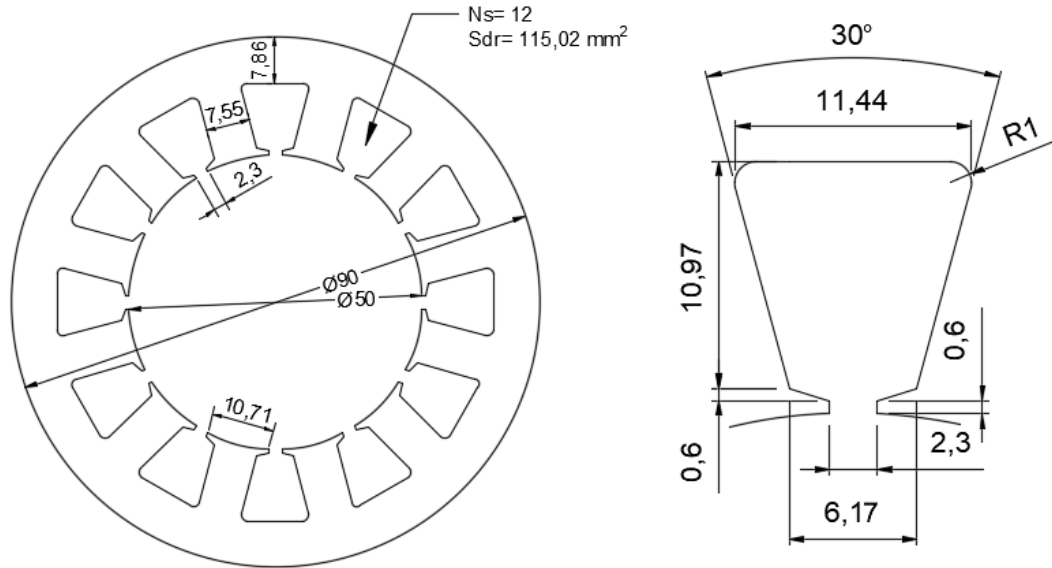
Vzhledem k výrazně vyšší frekvenci indukce napětí ve stroji předpokládáme poměrně vysoké ztráty v železe, a to i přes použité plechy s nižším ztrátovým číslem, proto budeme také přistupovat k mírnému rozšíření zubu oproti šířce drážky tak, že bude platit $b_z = a = 7,55 \text{ mm}$ a $b_{ds} = b = 6,17 \text{ mm}$.

Úhel drážky určíme jako:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{Q} = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ \quad (3.106)$$

A výšku užitečné plochy drážky dopočteme pomocí následujícího vztahu:

$$c = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4S_{dr} \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{-7,55 + \sqrt{7,55^2 + 4 \cdot 115,02 \cdot \tan(15^\circ)}}{2 \cdot \tan(15^\circ)} = 10,97\text{mm} \quad (3.107)$$



Obr. č. 20: Orientační znázornění geometrie statorového plechu třetího stroje

Nyní budeme pokračovat zrychleným dopočtem střední délky závitu:

$$l_z = 2l_{Fe} + 2l_{z1} \quad (3.108)$$

Střední poloměr drážky:

$$r_{ds} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(d_{si} + d_{dso})}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(50 + 73,14)}{2} = 30,79\text{mm} \quad (3.109)$$

Délka oblouku spojujícího středy statorových drážek:

$$l_{z1} = \frac{2\pi \cdot r_{ds}}{Q} = \frac{2\pi \cdot 30,79}{12} = 16,12\text{mm} \quad (3.110)$$

Celková střední délka závitu:

$$l_z = 2 \cdot 30 + 2 \cdot 16,12 = 92,24\text{mm} \quad (3.111)$$

Nyní je možno zrychleně dopočítat příslušné odpory:

$$R_{cívky} = \frac{N \cdot l_z}{S_v} \cdot \rho_{60^\circ C} = \frac{81 \cdot 92,24 \cdot 10^{-3}}{0,568 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,01 \cdot 10^{-8} = 0,264\Omega \quad (3.112)$$

$$R_f = 2R_{cívky} = 2 \cdot 0,264 = 0,529\Omega \quad (3.113)$$

$$R_v = 2R_{fáze} = 2 \cdot 0,529 = 1,06\Omega \quad (3.114)$$

Dále odhadneme indukce ve vybraných částech geometrie:

$$B_{zs} = B_\delta \cdot \frac{b_{zs} + b_s}{b_{zs}} = 0,8 \cdot \frac{7,55 + 6,17}{7,55} = 1,45\text{T} \quad (3.115)$$

$$B_{js} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{js}} = \frac{10,18}{2} \cdot \frac{0,8}{7,86} = 0,52T \quad (3.116)$$

$$B_{jr} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{jr}} = \frac{10,18}{2} \cdot \frac{0,8}{14} = 0,3T \quad (3.117)$$

Kde délka oblouku pólu l_p odpovídá:

$$l_p = \frac{2\pi \cdot r_{ro}}{2p} \cdot \frac{\alpha}{180} = \frac{2\pi \cdot 24,3}{10} \cdot \frac{120}{180} = 10,18mm \quad (3.118)$$

V následujícím kroku stanovíme objemy jednotlivých částí železa stroje:

Ekvivalentní objem statorových drážek:

$$V_{dr} = S_{dr} \cdot l_{Fe} \cdot Q = 115,02 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 12 = 4,14 \cdot 10^{-5}m^3 \quad (3.119)$$

Objem jha statoru:

$$\begin{aligned} V_{Fe,js} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{so}^2}{4} - \frac{d_{sij}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(90 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(74,28 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 6,09 \cdot 10^{-5}m^3 \end{aligned} \quad (3.120)$$

Objem statorových zubů:

$$\begin{aligned} V_{Fe,z} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{sij}^2}{4} - \frac{d_{si}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} - V_{dr} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(74,28 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(50 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 30 \cdot 10^{-3} - 4,14 \cdot 10^{-5} \\ &= 2,97 \cdot 10^{-5}m^3 \end{aligned} \quad (3.121)$$

Objem rotorového železa:

$$\begin{aligned} V_{Fe,jr} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{rj}^2}{4} - \frac{d_{rji}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(42,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(30 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 2,16 \cdot 10^{-5}m^3 \end{aligned} \quad (3.122)$$

Na základě stanovených objemů v tuto chvíli dopočítáme ztráty v železe v jednotlivých částech pomocí měrných ztrát převzatých z [11] a přepočtených pro požadovanou indukci při dané frekvenci. Hustotu plechu volíme $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$.

Ztráty tvořené ve jhu statoru:

$$\Delta P_{Fe,js} = \Delta p_{1,0js} \cdot V_{Fe,js} \cdot \rho_{Fe} = 6,82 \cdot 6,09 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 3,24W \quad (3.123)$$

Podíl ztrát vytvořených ve statorových zubech:

$$\Delta P_{Fe,zs} = \Delta p_{1,0zs} \cdot V_{Fe,z} \cdot \rho_{Fe} = 42,93 \cdot 2,97 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 9,94W \quad (3.124)$$

Ztráty v železe rotoru:

$$\Delta P_{Fe,r} = \Delta p_{1,0r} \cdot V_{Fe,r} \cdot \rho_{Fe} = 6,82 \cdot 2,16 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 1,15W \quad (3.125)$$

Výsledné ztráty v železe stroje jsou poté dány součtem jednotlivých částí:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe,js} + \Delta P_{Fe,zs} + \Delta P_{Fe,r} = 3,24 + 9,94 + 1,15 = 14,33W \quad (3.126)$$

Dle předběžného výpočtu se jeví, že použití kvalitnějších plechů výrazně pomáhá snížení ztrát v železe, a to i přes skutečnost, že volbou vícepólového provedení pracujeme s vyšší frekvencí indukce napětí. V reálném případě a v případě simulace pomocí MKP ovšem můžeme čekat ztráty v železe opět značně vyšší, zejména z důvodu nerovnoměrného rozložení indukce napříč plechem a vlivem horších vlastností materiálu.

Nyní zbývá dopočítat ztráty ve vinutí způsobené průchodem proudu:

$$\Delta P_{Cu} = R_v \cdot I_n^2 = 1,06 \cdot 2,83^2 = 8,49W \quad (3.127)$$

Vzhledem k nižšímu odporu dosaženému volbou soustředěného vinutí a snížením počtu drážek vychází podíl Jouleových ztrát nižší než v původních případech.

Ztráty mechanické volíme opět $\Delta P_{mech} = 10 W$.

Celkové ztráty budou odpovídat součtu dílčích ztrát získaných dříve:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 8,49 + 14,33 + 10 = 32,82W \quad (3.128)$$

Výpočet účinnosti bude dán vztahem:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{525}{525 + 32,82} = 94,1\% \quad (3.129)$$

Nakonec je ještě potřeba odhadnout maximální možný proud, který se ve stroji může objevit:

$$I_{max} = \frac{U - k_E \omega - \Delta U_{tr}}{R_v + R_n} = \frac{207 - 0,353 \cdot 523,6 - 7}{1,252 + 1} = 6,73A \quad (3.130)$$

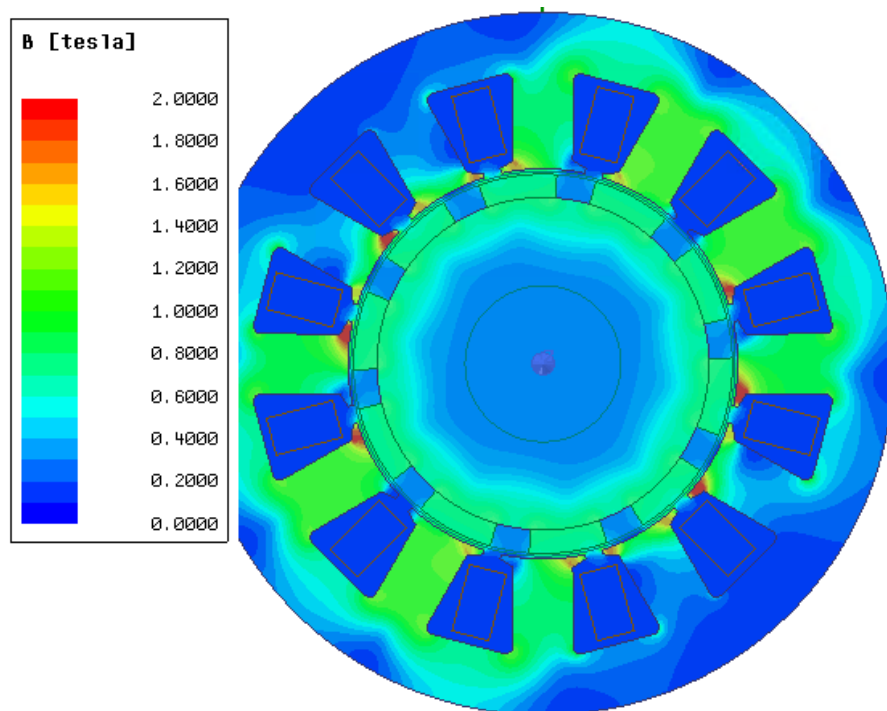
A pro kontrolu stanovíme velikost proudu, který by způsobit trvalou demagnetizaci permanentního magnetu jako:

$$\begin{aligned} I_{demag} &= \left[\frac{1000}{4\pi \cdot 39,37} \right] \cdot \frac{4 \cdot p \cdot a \cdot (\delta + l_{PM}) \cdot 10^{-3} \cdot H_d}{N_{sa}} = \\ &= 2,02 \cdot \frac{4 \cdot 5 \cdot 1 \cdot (0,7 + 3) \cdot 10^{-3} \cdot 994700}{8 \cdot 81} = 229,46A \end{aligned} \quad (3.131)$$

Vzhledem k mnohanásobné velikosti demagnetizačního proudu můžeme s jistotou říci, že trvalá demagnetizace za běžných provozních podmínek nehrozí.

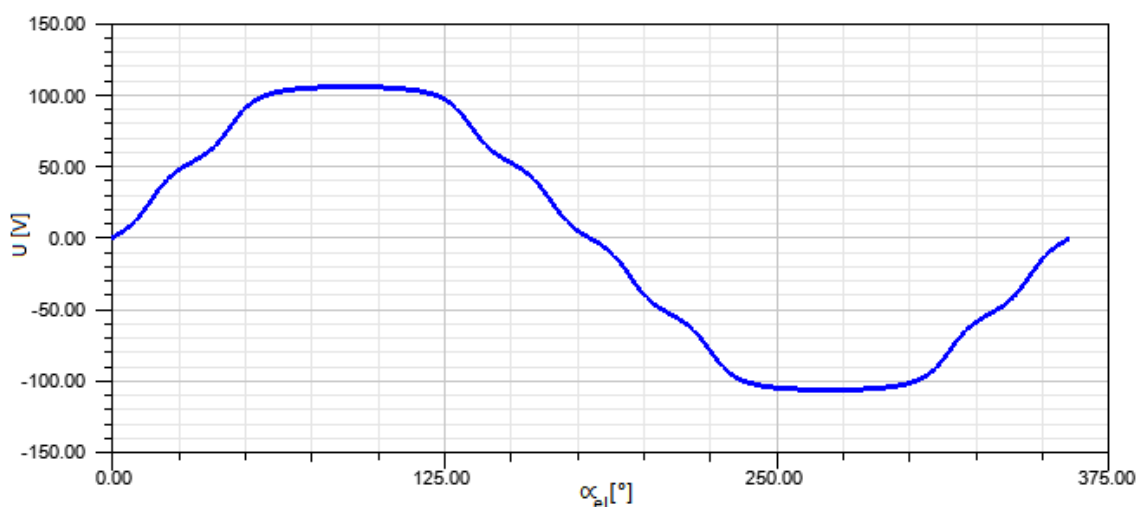
Parametr	Jednotka	Výpočet	RMxpřt
k_E	[Vs/rad]	0,353	0,344
k_T	[Nm/A]	0,353	0,369
N	[-]	81	81
l_z	[mm]	92,24	84,96
R_{civky}	[Ω]	0,264	0,224
R_{faze}	[Ω]	0,529	0,448
$R_{2/3faze}$	[Ω]	1,06	0,896
I_n	[A]	2,83	2,76
I_{ef}	[A]	2,31	2,39
σ	[A/mm ²]	4,07	4,08
B_δ	[T]	0,8	0,85
B_{js}	[T]	0,52	0,58
B_{zs}	[T]	1,45	1,24
B_{jr}	[T]	0,3	0,42
ΔP_{Fe}	[W]	14,33	20,16
ΔP_{Cu}	[W]	8,49	7,73
ΔP_{mech}	[W]	10	10,17
ΔP_c	[W]	32,82	38,06
η	[%]	94,11	93,26
n	[min ⁻¹]	5000	5043
M	[Nm]	1	1

Tabulka č. 9 – Porovnání ručního návrhu a výsledků z RMxpřt pro třetí stroj



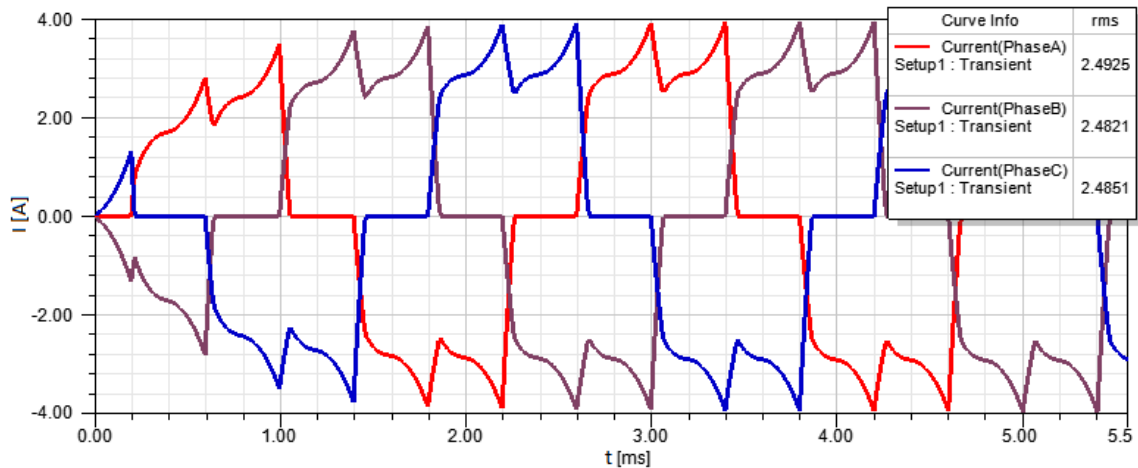
Obr. č. 21 – Rozložení magnetické indukce v třetí variantě stroje

Z Obr. č. 21 můžeme pozorovat, že z hlediska rozložení magnetické indukce dochází k nižšímu sycení ve stroji vlivem velké výšky jha a šířky zubů statoru. Sycení v zubu se nyní pohybuje okolo 1,2 T a indukce ve jhu dosahuje přibližně 0,6T s maximem okolo 1,3 T. Za zmínku stojí značné lokální sycení u paty namáhaného zubu statoru, kde indukce dosahuje až 2 T. Vzhledem k malé ploše této oblasti nebude navýšení ztrát vlivem velkého sycení paty zubu značné. Případná redukce lokálního přesycování by se dala řešit navýšením paty zubu statoru.



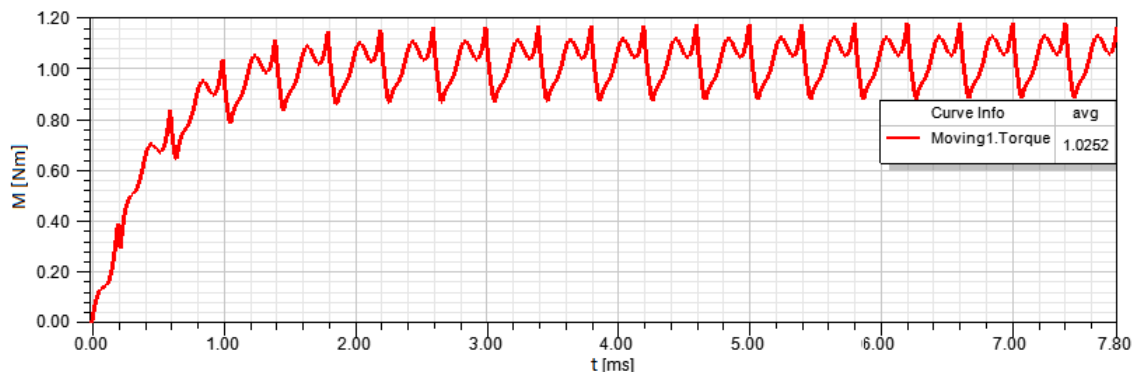
Obr. č. 22 – Tvar indukovaného napětí jedné fáze pro třetí variantu motoru

Vzhledem ke změně provedení vinutí a současně úpravy kombinace drážek a počtu pólů se zajisté musel změnit i tvar indukovaného napětí. Charakteristika stále vykazuje podobnost s průběhem typickým pro dvě drážky na pól a fázi, ale tvarem se více blíží lichoběžníku.



Obr. č. 23 – Průběh proudů třetí varianty stroje

Průběh proudů je srovnání se předešlými dvěma návrhy méně deformován, ale deformace je stále zratelná.



Obr. č. 24 – Průběh momentu třetí varianty stroje

Tvar momentu třetí varianty stroje sice stále vykazuje zvlnění na základě tvaru procházejícího proudu a přítomnosti jisté velikosti reluktančního momentu. Cogging je zde však téměř desetkrát nižší než v prvních dvou variantách, což je dáno zejména kombinací počtu drážek a pólů ve spojení s příznivou volbou pólového krytí.

Veličina	Jednotka	Vylepšení prvotního návrhu stroje		
		Výpočet	RMxprt	Maxwell
B_{δ}	[T]	0,8	0,85	0,84
B_{js}	[T]	0,52	0,58	0,59
B_{jr}	[T]	0,3	0,42	0,32
B_{zs}	[T]	1,45	1,24	1,21
I	[A]	2,31	2,39	2,48
M	[Nm]	1	1	1,03
ΔP_{Fe}	[W]	14,33	20,16	15,53
ΔP_j	[W]	8,49	7,73	5,11
P_1	[W]	557,82	564,76	596,07
P_2	[W]	525	526,7	541,3
η	[%]	94,11	93,26	90,83

Tabulka č. 10 – Souhrn výsledků třetí varianty návrhu stroje

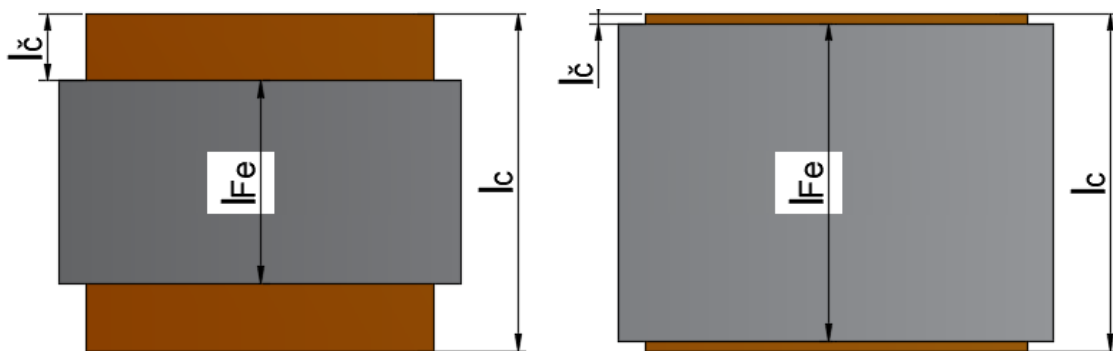
3.4 Stroj s dvouvrstvým soustředěným vinutím – první varianta

Poslední dvě varianty budou věnovány aplikaci varianty soustředěného vinutí dvouvrstvého, tedy takovému provedení vinutí, kde se ovíjí každý statorový zub samostatně. Jak již bylo zmíněno, ať už se jedná o jednovrstvé či dvouvrstvé vinutí, v každém z případů můžeme očekávat výraznou redukci rozměrů vlivem redukce výšky čel. Tímto se nám při návrhu otevírají dvě možné cesty, kudy se metodika výpočtu může odvíjet.

První možnost spočívá v ponechání stejného zástavbového prostoru, tedy ten objem, který bude ušetřen aplikací soustředěného vinutí, bude využit k navýšení délky svazku. Tímto snížíme počet závitů a ve srovnání s rozloženým vinutím bude nyní větší část vinutí lépe využita (redukce čel), ale změna je neoddelitelně spjata s navýšením použitého materiálu, a to jak v podobě mědi, tak v podobě plechů.

Druhou variantou je přístup k návrhu počítajícím se zjištěním minimální délky železa stroje, při které bude ještě schopen dosáhnout požadovaných vlastností. Tímto jsme potenciálně schopni významně uspořit množství používaného materiálu, a případně i redukovat celkové rozměry v axiálním směru.

V této části se zaměříme na první zmiňovanou možnost a s ohledem na vyplnění téhož zástavbového prostoru budeme volit prodloužení svazku navýšením délky svazku na $l_{Fe} = 50$ mm.



Obr. č. 25 – Znázornění využití zástavbového prostoru

Samotný návrh se v tomto případě neliší, první kroky budou opět spočívat ve stanovení úhlové rychlosti v nezátíženém stavu:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 5400}{60} = 565,49 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.132)$$

A určení velikosti EMF konstanty:

$$k_E = \frac{U}{\omega_0} = \frac{207}{565,49} = 0,365 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}} \quad (3.133)$$

Za předpokladu rovnosti $k_E = k_T$ stanovíme proud:

$$I_n = \frac{M}{k_T} = \frac{1}{0,365} = 2,73\text{A} \quad (3.134)$$

A efektivní hodnota proudu za předpokladu dvou třetin drážek aktivních v tentýž moment:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_n = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 2,73\text{A} = 2,23\text{A} \quad (3.135)$$

Druhým krokem bude opět návrh vlastní geometrie stroje. Použijeme opět vhodnější kombinaci počtu drážek a pólů – 12drážek na 10 pólů, ale oproti minulé variantě můžeme očekávat (při zachování stejné požadované indukce ve vzduchové mezeře) snížení počtu závitů. Při zajištění stejné volby požadované proudové hustoty ve vodiči získáme geometrii modifikovanou tak, že vzhledem k nižším požadavkům na rozměry drážky zbyde více prostoru pro rozšíření zubu a jha satoru, což potenciálně povede k nižším ztrátám v železe satoru. Je však nutno podotknout, že ztráty v železe, ve srovnání s třetí variantou stroje, předpokládáme vyšší, neboť prodloužení svazku vede na vyšší objem železa, ve kterém se hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy tvoří.

Návrh geometrie drážky se opět neobejde bez stanovení průřezu vodiče odpovídajícího volené proudové hustotě:

$$S_v = \frac{I_{ef}}{\sigma} = \frac{2,23}{4} = 0,557\text{mm}^2 \quad (3.136)$$

Vypočtenému průřezu odpovídá následující průměr vodiče:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,557}{\pi}} = 0,842 \rightarrow 0,85 \text{ mm} \quad (3.137)$$

Nejbližší reálně vyráběný průměr drátu volíme 0,85mm a průřez odpovídající nově zvolenému vodiči bude:

$$S_v = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,85^2}{4} = 0,568 \text{ mm}^2 \quad (3.138)$$

Snížení průřezu má za následek mírné zvýšení proudové hustoty vodičem přibližně na $\sigma = 3,98 \text{ A/mm}^2$.

Střední délka vzduchové mezery nutná pro stanovení počtu závitů bude:

$$r_\delta = \frac{d_{si}}{2} - \frac{\delta}{2} = \frac{50}{2} - \frac{0,7}{2} = 24,65 \text{ mm} \quad (3.139)$$

Počet vodičů jedné fáze zapojených do série je dán vztahem:

$$N_{1f} = \frac{U_{i1fmax}}{B_\delta \cdot r_\delta \cdot l_{Fe} \cdot \omega} = \frac{100}{0,8 \cdot 24,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 \cdot 523,6} = 194 \quad (3.140)$$

Magnetickou indukci ve vzduchové mezeře volíme jako $B_\delta = 0,8 \text{ T}$. Počet vodičů uložených v jedné drážce následně určíme jako:

$$N_{dr} = \frac{N_{1f}}{Q_f} = \frac{194}{4} = 48 \text{ vodičů} \quad (3.141)$$

V jedné drážce bude v tomto případě uloženo 48 vodičů, přičemž se jedná o dvě cívkové strany po 24 vodičích.

Potřebná plocha drážky je závislá na zjištěném počtu vodičů o spočteném průřezu navýšená činitelem plnění. Vzhledem k tomu, že uvažujeme dvouvrstvé vinutí, je nutno předpokládat fakt, že ve srovnání s jednovrstvým, kdy drážku zaplňuje pouze jediná cívková strana, zde reálně budeme dosahovat nižšího činitele plnění vlivem technologií vinutí a přítomností další izolace. Činitel plnění tedy volíme v tomto případě s jistou rezervou, a to $k_{pCu} = 0,35$; plocha drážky tedy bude:

$$S_{dr} = \frac{N \cdot S_v}{k_{p,Cu}} = \frac{48 \cdot 0,568}{0,35} = 79,9 \text{ mm}^2 \quad (3.142)$$

Oblouk popisující šířku zubu a drážky spočítáme dle vztahu:

$$(a + b) = 2\pi \cdot \frac{(r_{ro} + \delta + 1,2)}{Q} = 2\pi \cdot \frac{(24,3 + 0,7 + 1,2)}{12} = 13,72 \text{ mm} \quad (3.143)$$

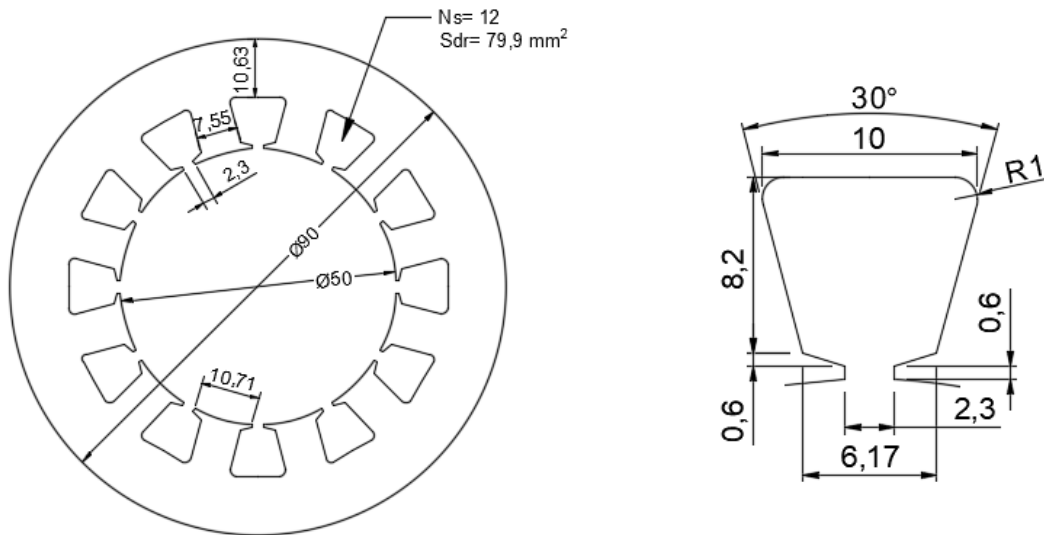
Vzhledem k předpokladu značných ztrát v železe, nyní zvětšených o navýšenou délku železa, budeme přistupovat k mírnému rozšíření zubu na úkor drážky tak, že bude platit $b_z = a = 7,55 \text{ mm}$ a $b_{ds} = b = 6,17 \text{ mm}$.

Úhel drážky určíme jako:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{Q} = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ \quad (3.144)$$

A výšku užitečné plochy drážky dopočteme pomocí následujícího vztahu:

$$c = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4S_{dr} \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{-7,55 + \sqrt{7,55^2 + 4 \cdot 79,9 \cdot \tan(15^\circ)}}{2 \cdot \tan(15^\circ)} = 8,2\text{mm} \quad (3.145)$$



Obr. č. 26: Orientační znázornění geometrie statorového plechu čtvrtého stroje

Nyní budeme pokračovat zrychleným dopočtem střední délky závitu:

$$l_z = 2l_{Fe} + 2l_{z1} \quad (3.146)$$

Délka oblouku cívky ovinuté kolem statorového zubu (změřeno v prostředí AutoCAD):

$$l_{z1} = 10,1\text{mm} \quad (3.147)$$

Celková střední délka závitu:

$$l_z = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 10,1 = 120,2\text{mm} \quad (3.148)$$

Nyní je možno zrychleně dopočítat příslušné odpory:

$$R_{cívky} = \frac{N \cdot l_z}{S_v} \cdot \rho_{60^\circ C} = \frac{24 \cdot 120,2 \cdot 10^{-3}}{0,568 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,01 \cdot 10^{-8} = 0,102\Omega \quad (3.149)$$

$$R_f = 4R_{cívky} = 4 \cdot 0,102 = 0,408\Omega \quad (3.150)$$

$$R_v = 2R_{fáze} = 2 \cdot 0,408 = 0,816\Omega \quad (3.151)$$

Dále odhadneme indukce ve vybraných částech geometrie:

$$B_{zs} = B_\delta \cdot \frac{b_{zs} + b_s}{b_{zs}} = 0,8 \cdot \frac{7,55 + 6,17}{7,55} = 1,45T \quad (3.152)$$

$$B_{js} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{js}} = \frac{10,18}{2} \cdot \frac{0,8}{10,63} = 0,38T \quad (3.153)$$

$$B_{jr} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{jr}} = \frac{10,18}{2} \cdot \frac{0,8}{14} = 0,3T \quad (3.154)$$

Kde délka oblouku pólu l_p odpovídá vztahu:

$$l_p = \frac{2\pi \cdot r_{ro}}{2p} \cdot \frac{\alpha}{180} = \frac{2\pi \cdot 24,3}{10} \cdot \frac{120}{180} = 10,18mm \quad (3.155)$$

V následujícím kroku stanovíme objemy jednotlivých částí železa stroje:
Ekvivalentní objem statorových drážek:

$$V_{dr} = S_{dr} \cdot l_{Fe} \cdot Q = 79,9 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 12 = 4,79 \cdot 10^{-5}m^3 \quad (3.156)$$

Objem jha statoru:

$$\begin{aligned} V_{Fe,js} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{so}^2}{4} - \frac{d_{sij}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(90 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(68,7 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 1,33 \cdot 10^{-4}m^3 \end{aligned} \quad (3.157)$$

Objem statorových zubů:

$$\begin{aligned} V_{Fe,z} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{sij}^2}{4} - \frac{d_{si}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} - V_{dr} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(68,7 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(50 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 50 \cdot 10^{-3} - 4,79 \cdot 10^{-5} = 3,95 \cdot 10^{-5}m^3 \end{aligned} \quad (3.158)$$

Objem rotorového železa:

$$\begin{aligned} V_{Fe,jr} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{rj}^2}{4} - \frac{d_{rji}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(42,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(30 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 3,59 \cdot 10^{-5}m^3 \end{aligned} \quad (3.159)$$

Na základě zjištěných objemů již můžeme dopočítat ztráty v železe v jednotlivých částech pomocí měrných ztrát odpovídajících velikostem indukcí z [11], přepočtené pro požadované sycení při dané frekvenci. Hustotu plechu volíme $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$.

Ztráty tvořené ve jhu statoru:

$$\Delta P_{Fe,js} = \Delta p_{1,0js} \cdot V_{Fe,js} \cdot \rho_{Fe} = 3,30 \cdot 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot 7800 = 3,42W \quad (3.160)$$

Podíl ztrát vytvořených ve statorových zubech:

$$\Delta P_{Fe,zs} = \Delta p_{1,0zs} \cdot V_{Fe,z} \cdot \rho_{Fe} = 42,85 \cdot 3,95 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 13,2W \quad (3.161)$$

Ztráty v železe rotoru:

$$\Delta P_{Fe,r} = \Delta p_{1,0r} \cdot V_{Fe,r} \cdot \rho_{Fe} = 1,96 \cdot 3,59 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 0,55W \quad (3.162)$$

Výsledné ztráty v železe stroje jsou poté dány součtem jednotlivých částí:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe,js} + \Delta P_{Fe,zs} + \Delta P_{Fe,r} = 3,42 + 13,2 + 0,55 = 17,17W \quad (3.163)$$

Nyní zbývá dopočítat ztráty ve vinutí způsobené průchodem proudem:

$$\Delta P_{Cu} = R_v \cdot I_n^2 = 0,816 \cdot 2,73^2 = 6,08W \quad (3.164)$$

Ztráty mechanické volíme opět $\Delta P_{mech} = 10 W$.

Celkové ztráty jsou dány součtem jednotlivých ztrát zjištěných výše:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 6,08 + 17,17 + 10 = 33,25W \quad (3.165)$$

A účinnost stroje dopočteme ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{525}{525 + 34,34} = 94,04\% \quad (3.166)$$

V neposlední řadě je nutno stanovit maximální možný proud, který se ve stroji za běžného provozu může objevit:

$$I_{max} = \frac{U - k_E \omega - \Delta U_{tr}}{R_v + R_n} = \frac{207 - 0,365 \cdot 523,6 - 7}{0,816 + 1} = 4,89A \quad (3.167)$$

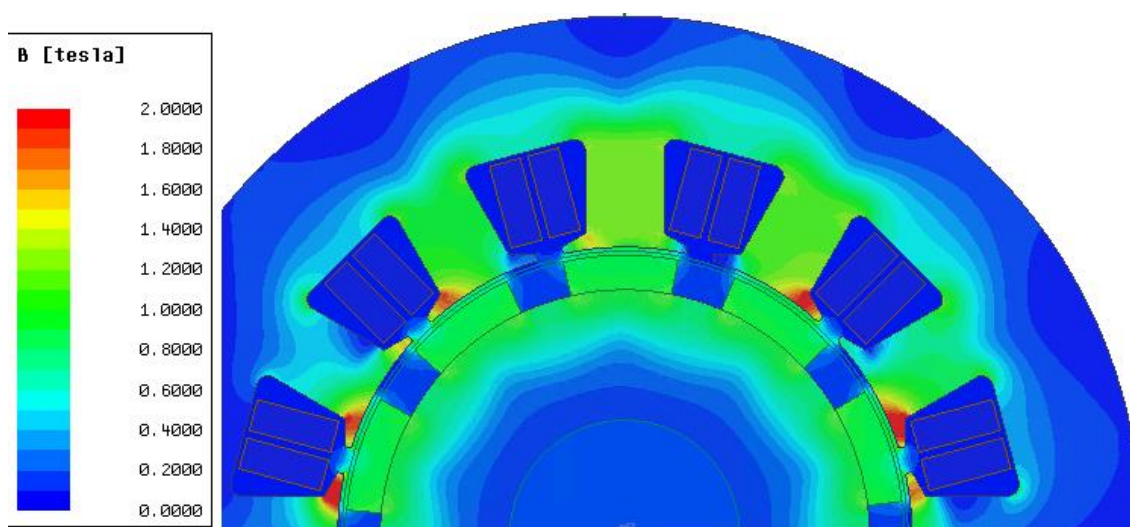
A pro kontrolu stanovíme velikost proudu, který by způsobil trvalou demagnetizaci permanentního magnetu jako:

$$\begin{aligned} I_{demag} &= \left[\frac{1000}{4\pi \cdot 39,37} \right] \cdot \frac{4 \cdot p \cdot a \cdot (\delta + l_{PM}) \cdot 10^{-3} \cdot H_d}{N_{sa}} = \\ &= 2,02 \cdot \frac{4 \cdot 5 \cdot 1 \cdot (0,7 + 3) \cdot 10^{-3} \cdot 994700}{8 \cdot 48} = 387,2A \end{aligned} \quad (3.168)$$

Vzhledem k mnohanásobné velikosti demagnetizačního proudu můžeme s jistotou říci, že trvalá demagnetizace za běžných provozních podmínek nepředstavuje jakoukoliv hrozbu.

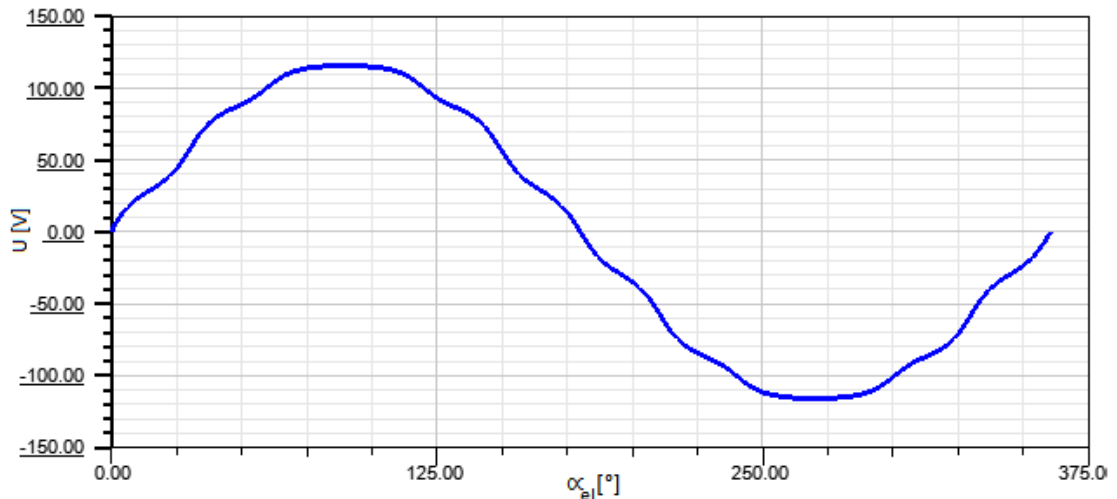
Parametr	Jednotka	Výpočet	RMxprt
k_E	[Vs/rad]	0,365	0,368
k_T	[Nm/A]	0,365	0,369
N	[-]	48	48
l_z	[mm]	120,2	124,88
R_{civky}	[Ω]	0,102	0,114
R_{faze}	[Ω]	0,408	0,454
$R_{2/3faze}$	[Ω]	0,816	0,908
I_n	[A]	2,73	2,76
I_{ef}	[A]	2,23	2,25
σ	[A/mm ²]	3,98	3,97
B_δ	[T]	0,8	0,87
B_{js}	[T]	0,38	0,43
B_{zs}	[T]	1,45	1,24
B_{jr}	[T]	0,3	0,41
ΔP_{Fe}	[W]	17,17	24,08
ΔP_{Cu}	[W]	6,08	6,93
ΔP_{mech}	[W]	10	10,06
ΔP_c	[W]	32,25	41,07
η	[%]	94	92,74
n	[min ⁻¹]	5000	5014
M	[Nm]	1	1

Tabulka č. 11 – Porovnání ručního návrhu a výsledků z RMxprt pro čtvrtý stroj



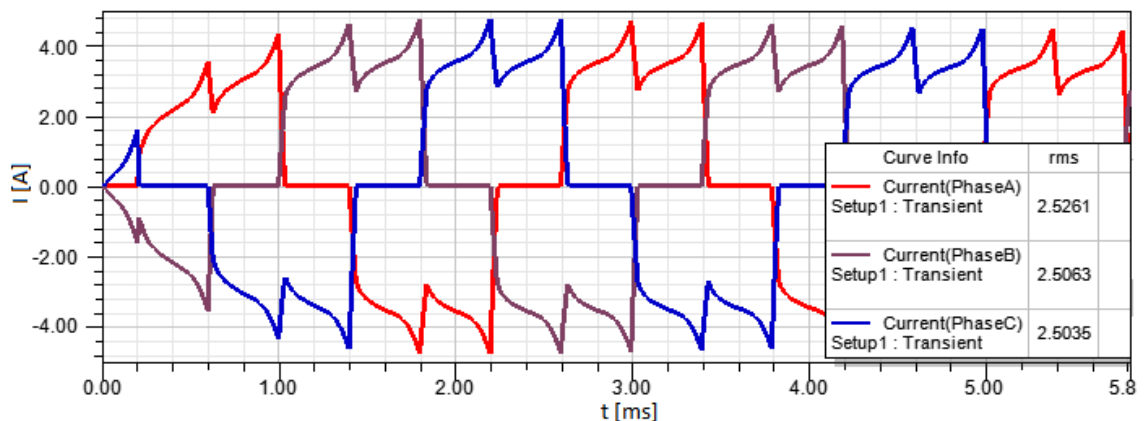
Obr. č. 27 – Rozložení magnetické indukce ve čtvrtém stroji

Je možno si povšimnout, že minimalizací drážky byly značně navýšeny rozměry statorového jha a zubů statoru, a tedy bylo sníženo sycení v těchto částech. Geometrie se z hlediska sycení může zdát nedostatečně využitá, ale nízké hodnoty indukce jsou také spojeny s redukcí ztrát v železe a mohou tedy být příznivým faktorem. Podobně jako v předešlé variantě se objevuje vysoké lokální sycení u paty zubu a z hlediska možné budoucí optimalizace by bylo vhodné se zabývat úpravou těchto částí.



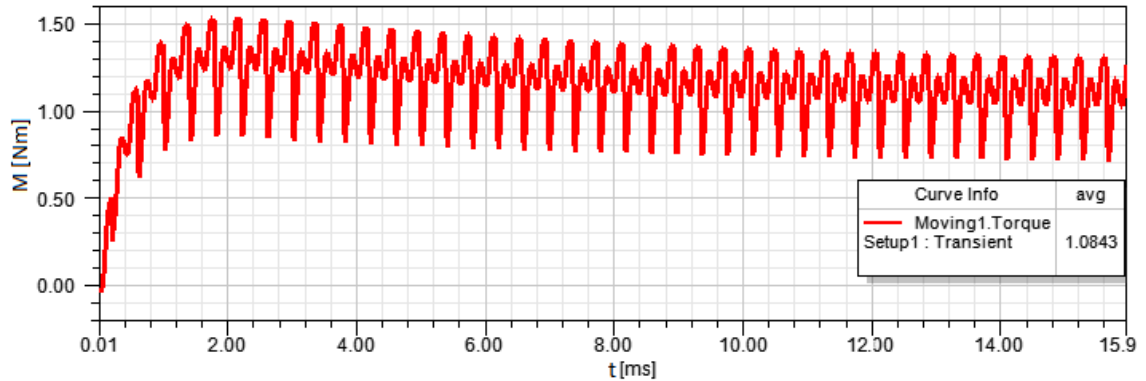
Obr. č. 28 – Průběh indukovaného napětí ve čtvrtém stroji

Indukované napětí v nezatíženém stavu je u čtvrté varianty stroje vlivem použití dvouvrstvého soustředěného vinutí značně podobný sinusovému průběhu, a může se zdát, že se nejedná o vhodný návrh. V případě chodu při jmenovité zátěži se však průběh indukovaného napětí v zatíženém stavu mění, a v tomto případě nabývá silně lichoběžníkového tvaru, což vede na příhodnější výsledky oproti předešlým variantám, kde průběh indukovaného napětí v zatíženém stavu připomíná deformovaný sinusový průběh.



Obr. č. 29 – Průběh proudů ve čtvrtém stroji

Charakteristika tvaru proudů je velmi podobná variantě s jednovrstvým soustředěným vinutím. Ve srovnání s prvními dvěma návrhy je proud tvarově méně deformován, ale v tomto případě se navýšily špičky průběhu proudu, čemuž odpovídá vyšší efektivní hodnota proudu.



Obr. č. 30– Průběh momentu ve čtvrtém stroji

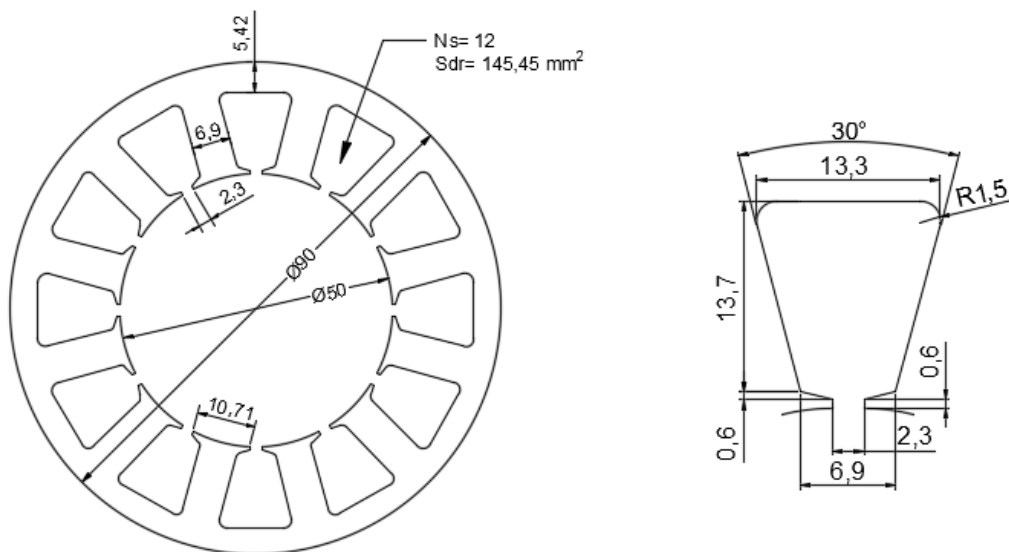
Moment čtvrté varianty stroje je charakterizován deformací v podobě značných častých špiček, což je ovlivněno tvarem a velikostí procházejícího proudu. Vliv má též vyšší hodnota reluktančního momentu, který zde dosahuje 0,06 Nm mezi dvěma zuby, což je více než u předešlé varianty, ale rovněž tato velikost dosahuje poloviny původní velikosti reluktančního momentu.

Veličina	Jednotka	Vylepšení prvotního návrhu stroje		
		Výpočet	RMxpřt	Maxwell
B_{δ}	[T]	0,8	0,85	0,84
B_{js}	[T]	0,52	0,58	0,59
B_{jr}	[T]	0,3	0,42	0,32
B_{zs}	[T]	1,45	1,24	1,21
I	[A]	2,31	2,39	2,48
M	[Nm]	1	1	1,03
ΔP_{Fe}	[W]	14,33	20,16	22,9
ΔP_j	[W]	8,49	7,73	8,96
P_1	[W]	557,82	564,76	621,24
P_2	[W]	525	526,7	567,07
η	[%]	94,11	93,26	91,28

Tabulka č. 12 – Souhrn výsledků čtvrté varianty návrhu stroje

3.5 Stroj s dvouvrstvým soustředěným vinutím - druhá varianta

Pátou a poslední variantou bude stroj s dvouvrstvým soustředěným vinutím s rozdílnou délkou železa oproti předešlému typu stroje. Pokud se nezaměřujeme na vyplnění stejného zástavbového prostoru, vzniká při volbě dostatečně velké plochy drážky možnost dokonce zkrátit svazek železa a tím ušetřit materiál v podobě jak železa, tak mědi i materiálu magnetu. Pro výpočet poslouží již hotová geometrie statorového plechu, která byla navržena dříve pro variantu stroje, jenž zde není uváděn.



Obr. č. 31: Orientační znázornění geometrie statorového plechu pátého stroje

První kroky budou spočívat stanovení úhlové rychlosti v nezátíženém stavu:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 5850}{60} = 612,6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.169)$$

A určení velikosti EMF konstanty:

$$k_E = \frac{U}{\omega_0} = \frac{207}{612,6} = 0,338 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}} \quad (3.170)$$

Za předpokladu rovnosti $k_E = k_T$ bude proud:

$$I_n = \frac{M}{k_T} = \frac{1}{0,338} = 2,96\text{A} \quad (3.171)$$

A efektivní hodnota proudu za předpokladu dvou třetin drážek aktivních v tentýž moment:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_n = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 2,96\text{A} = 2,42\text{A} \quad (3.172)$$

V předešlých variantách byl další krok spojen s návrhem vlastní geometrie plechu statoru. Zde použijeme již hotový plech a na základě rozměrů jeho drážky dopočítáme celkový proud pro stanovení minimální potřebné délky svazku. Velikost celkového proudu v motoru při předpokladu vždy 2/3 fází současně aktivních bude dána:

$$I_{tot} = Q_{SA} \cdot S_{dr} \cdot k_{pCu} \cdot \sigma = 8 \cdot 145,42 \cdot 10^{-6} \cdot 0,35 \cdot 5 \cdot 10^6 = 2320,52A \quad (3.173)$$

Vzhledem k tomu, že v předešlých variantách nebyly Jouleovy ztráty nikterak nebezpečně vysoké, volíme zde proudovou hustotu $\sigma = 5 \text{ A/mm}^2$.

Na základě zjištěného celkového proudu určíme minimální potřebnou délku svazku dle vztahu:

$$l_{Fe} = \frac{M}{B_{\delta} \cdot r_{\delta} \cdot I_{tot}} = \frac{1}{0,8 \cdot 24,65 \cdot 10^{-3} \cdot 2320,52} = 21,5mm \quad (3.174)$$

Dále návrh pokračuje určením počtu závitů na fázi:

$$N_{1f} = \frac{U_{i1fmax}}{B_{\delta} \cdot r_{\delta} \cdot l_{Fe} \cdot \omega} = \frac{100}{0,8 \cdot 24,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0215 \cdot 523,6} = 450 \quad (3.175)$$

A počet vodičů v drážce je dán:

$$N_{dr} = \frac{N_{1f}}{Q_f} = \frac{450}{4} = 112 \text{ vodičů} \quad (3.176)$$

Vzhledem ke dvouvrstvému provedení vinutí jsou v každé drážce dvě cívkové strany, takže platí, že každé cívkové straně v tomto případě připadá 56 vodičů.

Průřez vodiče daný volenou proudovou hustotou:

$$S_v = \frac{I_{ef}}{\sigma} = \frac{2,42}{5} = 0,484mm^2 \quad (3.177)$$

Vypočtenému průřezu odpovídá následující průměr vodiče:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,484}{\pi}} = 0,785 \rightarrow 0,8mm \quad (3.178)$$

Nejbližší reálně vyráběný průměr drátu volíme 0,8mm a průřez odpovídající nově zvolenému vodiči bude:

$$S_v = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} = 0,503mm^2 \quad (3.179)$$

Po kontrolním přepočtu nabývá činitel plnění mědi stále nižší hodnoty, než původně volených 0,4. Můžeme tedy použít vodič o zvoleném vyšším průřezu. Zvolené navýšení plochy řezu vodiče má za následek snížení proudové hustoty vodičem přibližně na $\sigma = 4,81 \text{ A/mm}^2$.

$$l_z = 2l_{Fe} + 2l_{z1} \quad (3.180)$$

Délka oblouku cívky ovinuté kolem statorového zubu (změřeno v prostředí AutoCAD):

$$l_{z1} = 9,7mm \quad (3.181)$$

Celková střední délka závitu:

$$l_z = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 9,7 = 62,4mm \quad (3.182)$$

Nyní je možno zrychleně dopočítat příslušné odpory:

$$R_{cívky} = \frac{N \cdot l_z}{S_v} \cdot \rho_{60^\circ C} = \frac{56 \cdot 62,4 \cdot 10^{-3}}{0,503 \cdot 10^{-6}} \cdot 2,01 \cdot 10^{-8} = 0,140\Omega \quad (3.183)$$

$$R_f = 4R_{cívky} = 4 \cdot 0,140 = 0,56\Omega \quad (3.184)$$

$$R_v = 2R_{fáze} = 2 \cdot 0,56 = 1,12\Omega \quad (3.185)$$

Dále odhadneme indukce ve vybraných částech geometrie:

$$B_{zs} = B_\delta \cdot \frac{b_{zs} + b_s}{b_{zs}} = 0,8 \cdot \frac{6,9 + 6,9}{6,9} = 1,6T \quad (3.186)$$

$$B_{js} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{js}} = \frac{10,18}{2} \cdot \frac{0,8}{5,13} = 0,8T \quad (3.187)$$

$$B_{jr} = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B_\delta}{h_{jr}} = \frac{10,18}{2} \cdot \frac{0,8}{14} = 0,3T \quad (3.188)$$

Kde délka oblouku pólu l_p odpovídá vztahu:

$$l_p = \frac{2\pi \cdot r_{ro}}{2p} \cdot \frac{\alpha}{180} = \frac{2\pi \cdot 24,3}{10} \cdot \frac{120}{180} = 10,18mm \quad (3.189)$$

V následujícím kroku stanovíme objemy jednotlivých částí železa stroje:
Ekvivalentní objem statorových drážek:

$$V_{dr} = S_{dr} \cdot l_{Fe} \cdot Q = 145,45 \cdot 10^{-6} \cdot 21,5 \cdot 10^{-3} \cdot 12 = 3,95 \cdot 10^{-5}m^3 \quad (3.190)$$

Objem jha statoru:

$$\begin{aligned} V_{Fe,js} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{so}^2}{4} - \frac{d_{sij}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(90 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(79,94 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 21,5 \cdot 10^{-3} = 2,89 \cdot 10^{-5}m^3 \end{aligned} \quad (3.191)$$

Objem statorových zubů:

$$\begin{aligned} V_{Fe,z} &= \pi \cdot \left(\frac{d_{sij}^2}{4} - \frac{d_{si}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} - V_{dr} = \\ &= \pi \cdot \left(\frac{(79,94 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(50 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 21,5 \cdot 10^{-3} - 3,95 \cdot 10^{-5} = 2,62 \cdot 10^{-5}m^3 \end{aligned} \quad (3.192)$$

Objem rotorového železa:

$$V_{Fe,jr} = \pi \cdot \left(\frac{d_{rj}^2}{4} - \frac{d_{rji}^2}{4} \right) \cdot l_{Fe} = \quad (3.193)$$

$$= \pi \cdot \left(\frac{(42,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{(30 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 21,5 \cdot 10^{-3} = 1,55 \cdot 10^{-5} m^3$$

Na základě zjištěných objemů již můžeme dopočítat ztráty v železe v jednotlivých částech pomocí měrných ztrát odpovídajících přepočteným velikostem indukci z [11] při dané frekvenci; hustotu plechu volíme $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$.

Ztráty tvořené ve jhu statoru:

$$\Delta P_{Fe,js} = \Delta p_{1,0js} \cdot V_{Fe,js} \cdot \rho_{Fe} = 11,44 \cdot 2,89 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 2,58W \quad (3.194)$$

Podíl ztrát vytvořených ve statorových zubech:

$$\Delta P_{Fe,zs} = \Delta p_{1,0zs} \cdot V_{Fe,z} \cdot \rho_{Fe} = 46,85 \cdot 2,62 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 9,57W \quad (3.195)$$

Ztráty v železe rotoru:

$$\Delta P_{Fe,r} = \Delta p_{1,0r} \cdot V_{Fe,r} \cdot \rho_{Fe} = 1,96 \cdot 1,55 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 0,24W \quad (3.196)$$

Výsledné ztráty v železe stroje jsou poté dány součtem jednotlivých částí:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe,js} + \Delta P_{Fe,zs} + \Delta P_{Fe,r} = 2,58 + 9,57 + 0,24 = 12,39W \quad (3.197)$$

Nyní dopočítáme ztráty ve vinutí způsobené průchodem proudu:

$$\Delta P_{Cu} = R_v \cdot I_n^2 = 1,12 \cdot 2,96^2 = 9,81W \quad (3.198)$$

Ztráty mechanické volíme opět $\Delta P_{mech} = 10 \text{ W}$.

Celkové ztráty jsou dány součtem jednotlivých ztrát zjištěných výše:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 9,81 + 12,39 + 10 = 32,2W \quad (3.199)$$

A účinnost stroje dopočteme ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{525}{525 + 32,2} = 94,2\% \quad (3.200)$$

V neposlední řadě je nutno stanovit maximální možný proud, který se ve stroji může při jmenovitém zatížení objevit:

$$I_{max} = \frac{U - k_E \omega - \Delta U_{tr}}{R_v + R_n} = \frac{207 - 0,338 \cdot 523,6 - 7}{1,12 + 1} = 10,86A \quad (3.201)$$

A pro kontrolu stanovíme velikost proudu, který by způsobit trvalou demagnetizaci permanentního magnetu jako:

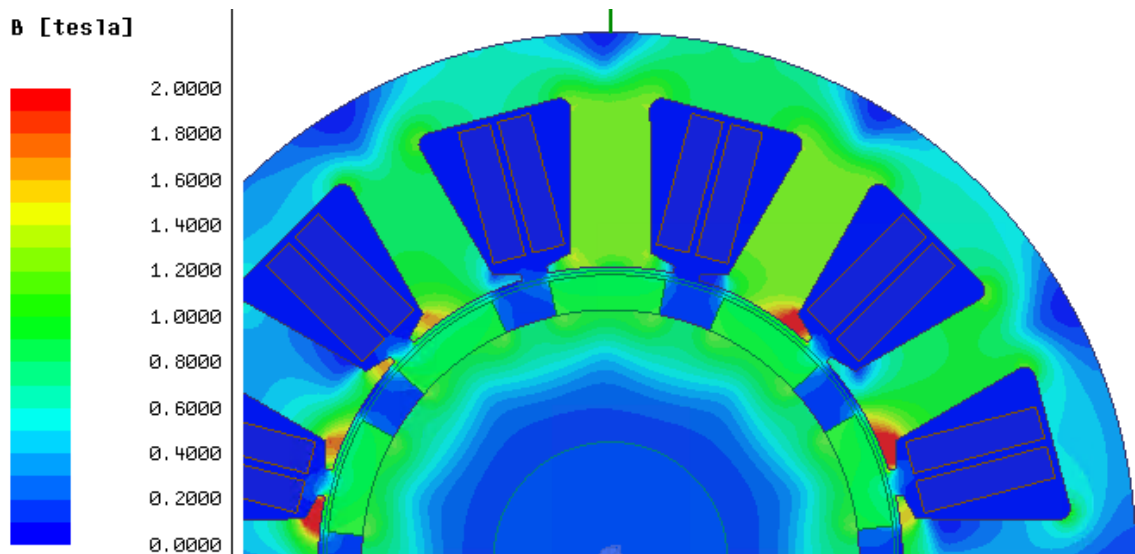
$$I_{demag} = \left[\frac{1000}{4\pi \cdot 39,37} \right] \cdot \frac{4 \cdot p \cdot a \cdot (\delta + l_{PM}) \cdot 10^{-3} \cdot H_d}{N_{sa}} = \quad (3.202)$$

$$= 2,02 \cdot \frac{4 \cdot 5 \cdot 1 \cdot (0,7 + 3) \cdot 10^{-3} \cdot 994700}{8 \cdot 112} = 165,95A$$

Ani v tomto případě za běžných provozních podmínek nehrozí demagnetizace vlivem průchodu příliš velkého proudu.

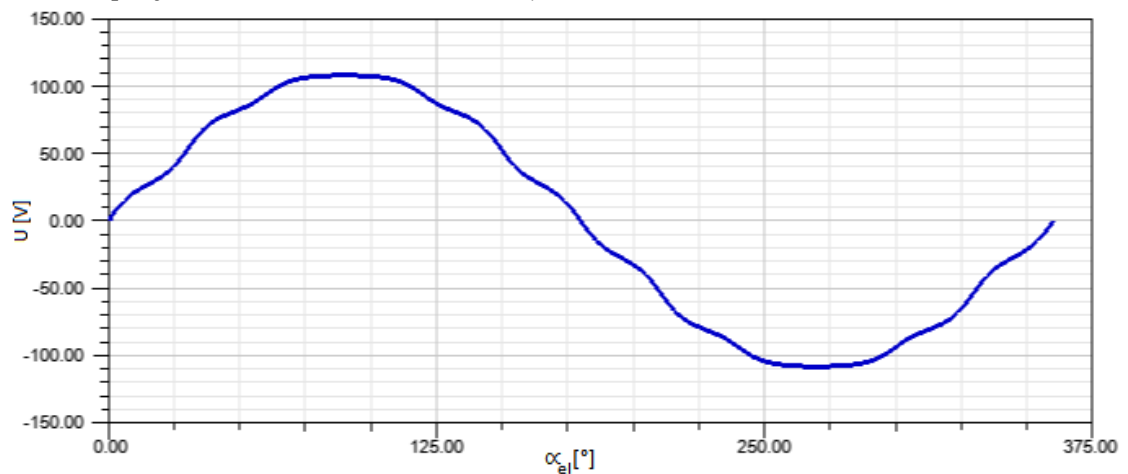
Parametr	Jednotka	Výpočet	RMxpřt
k_E	[Vs/rad]	0,338	0,343
k_T	[Nm/A]	0,338	0,369
N	[-]	112	112
l_z	[mm]	62,4	67,64
R_{civky}	[Ω]	0,14	0,15
R_{faze}	[Ω]	0,56	0,6
$R_{2/3faze}$	[Ω]	1,12	1,2
I_n	[A]	2,96	2,76
I_{ef}	[A]	2,42	2,43
σ	[A/mm ²]	4,81	4,83
B_δ	[T]	0,8	0,84
B_{js}	[T]	0,8	0,76
B_{zs}	[T]	1,6	1,38
B_{jr}	[T]	0,3	0,41
ΔP_{Fe}	[W]	12,39	19,07
ΔP_{Cu}	[W]	9,81	10,6
ΔP_{mech}	[W]	10	10,07
ΔP_c	[W]	32,2	39,74
η	[%]	94,2	93
n	[min ⁻¹]	5000	5018
M	[Nm]	1	1

Tabulka č. 13 - Porovnání ručního návrhu a výsledků z RMxpřt pro pátý stroj



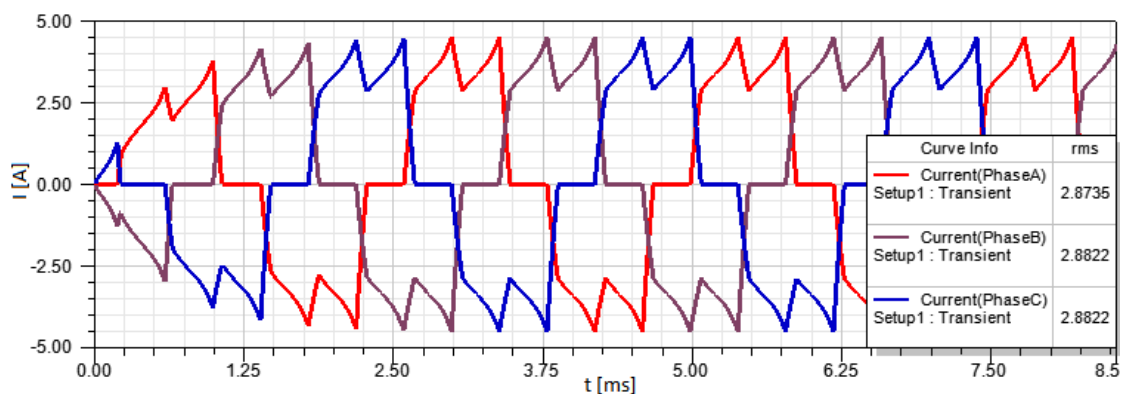
Obr. č. 32 – Rozložení magnetické indukce v pátém stroji

Poslední varianta se svým rozložením magnetické indukce v řezu podobá předchozím dvěma, aktivní zub je sycen na hodnotu indukce přibližně 1,28T, indukce ve jhu se pohybuje okolo 0,83 T. Opět se zde můžeme setkat s lokálním sycením u paty zubu, kde indukce dosahuje až 2 T.



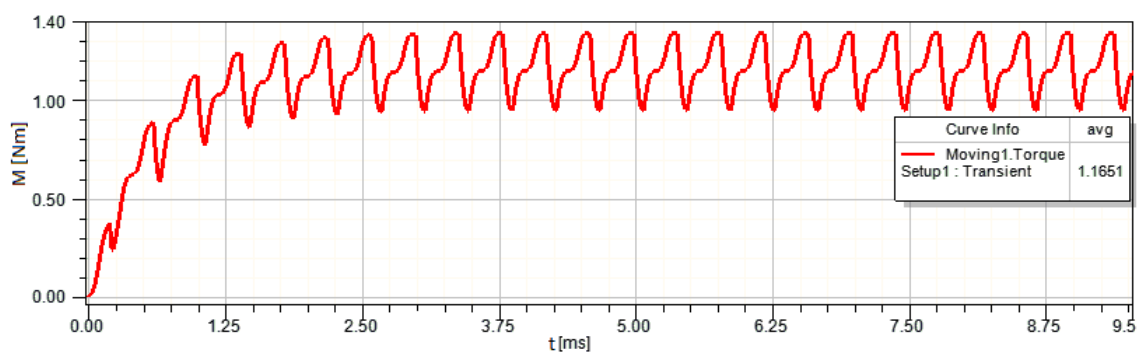
Obr. č. 33 – Průběh indukovaného napětí v pátém stroji

I v poslední variantě stroje se tvar průběhu indukovaného napětí v nezatíženém stavu značně podobá sinusovému průběhu, ale v momentě, kdy je stroj v zatíženém stavu je výsledný tvar indukovaného napětí podobný lichoběžníku.



Obr. č. 34 – Průběh tvarů proudů v pátém stroji

Tvar proudů je téměř totožný ve srovnání s předešlou variantou návrhu, ale v tomto případě lze pozorovat, že změna v postupu návrhu představovala výsledné navýšení efektivní hodnoty proudu, jenž se zde pohybuje okolo 2,88 A.



Obr. č. 35 – Vyobrazení tvaru momentu v pátém stroji

Moment je velmi podobný průběhu třetí varianty stroje, což se odvíjí od stejné kombinace drážek a pólů a velmi podobného tvaru procházejícího elektrického proudu. Rozdíl je však dán navýšením velikosti proudu, což se projevilo na mírném zvýšení velikosti střední hodnoty momentu.

Veličina	Jednotka	Vylepšení prvotního návrhu stroje		
		Výpočet	RMxprt	Maxwell
B_{δ}	[T]	0,8	0,84	0,81
B_{js}	[T]	0,8	0,76	0,83
B_{jr}	[T]	0,3	0,41	0,4
B_{zs}	[T]	1,6	1,38	1,28
I	[A]	2,42	2,43	2,87
M	[Nm]	1	1	1,17
ΔP_{Fe}	[W]	12,39	19,07	15,28
ΔP_j	[W]	9,81	10,6	13,34
P_1	[W]	557,2	566,14	662,14
P_2	[W]	525	526,4	609,5
η	[%]	94,2	93	92,05

Tabulka č. 14 – Souhrn výsledků páté varianty návrhu stroje

3.6 Zhodnocení výsledků

Tato podkapitola bude věnována finálnímu zhodnocení dosažených výsledků napříč variantami provedení motorů s ohledem na provedené změny a jejich dopady. V neposlední řadě bude část podkapitoly zaměřena na zhodnocení metod použitých při návrhu.

3.6.1 Zhodnocení výsledků návrhů

Bylo zpracováno pět variant provedení BLDC motoru v návaznosti na zadané parametry, s ohledem na některé volené veličiny, které napříč návrhy zůstaly neměnné.

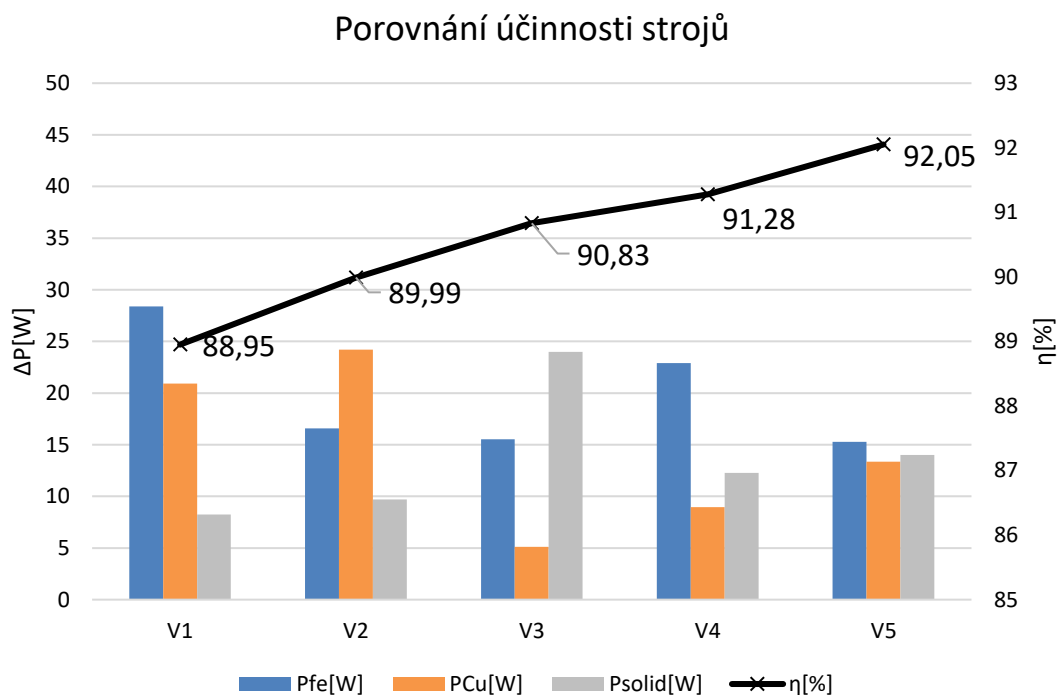
První varianta byla vytvořena na základě představy převzetí velké části konstrukčních prvků ze strojů asynchronních tak, aby nedocházelo ke zbytečnému navyšování nákladů a nároků na technologii. Taková volba však s sebou přinesla nectnosti v podobě nevýhodných vlastností a přítomnosti značného reluktančního momentu.

Druhý stroj stavěl na základech návrhu motoru prvního s cílem zlepšení vlastností a navýšení účinnosti. Na základě těchto požadavků byla zhotovena nová geometrie statorového plechu vzhledem k dominantním ztrátám v železe.

Třetí typ představoval razantnější zásah do původních konstrukčních prvků za účelem dalšího navýšení účinnosti. Došlo ke změně kombinace počtu drážek a pólů na 12 drážek/10 pólů, a rovněž se změnilo provedení vinutí z klasického rozloženého na soustředěné jednovrstvé. Vzhledem k vyššímu počtu pólů byl zvolen materiál statorových plechů s nižšími měrnými ztrátami při vyšších frekvencích a

byla navržena nová geometrie statorové drážky. Aplikací těchto změn se dosáhlo opětovného navýšení účinnosti.

Poslední dvě varianty provedení navazovaly na použití stejné kombinace počtu drážek statoru a počtu pólů, ale vinutí bylo provedeno jako soustředěné dvouvrstvé. Návrhy se navzájem lišily přístupem k využití prostoru stroje. Čtvrtá varianta byla vedena ve smyslu využití stejného zástavbového prostoru, takže objem ušetřený zkrácením čel, získaný přechodem na soustředěné vinutí, byl využit pro prodloužení statorového svazku. Pátý a poslední motor byl naopak navrhován s myšlenkou zjištění minimální potřebné délky železa stroje. Obě varianty vedly k opětovnému zvýšení účinnosti.



Obr. č. 36 – Porovnání účinnosti strojů

Na **Obr. č. 35** je znázorněno finální rozložení jednotlivých ztrát a účinnosti a jejich zastoupení napříč variantami. Jak je možno pozorovat v grafickém zobrazení výše, ve variantách stroje se mimo ztráty v železe a v mědi (ztráty mechanické uvažujeme téměř totožné a v grafu nejsou vyobrazeny) projevuje další podíl ztrát o nezanedbatelné velikosti. Jedná se o ztráty v plném materiálu, čímž jsou v případě BLDC motorů zejména permanentní magnety. Vzhledem k tomu, že tyto ztráty lze efektivně uvažovat pouze při simulaci pomocí metody konečných prvků a výsledky vycházející z prostředí Maxwell jsou ze zvolených metod nejvíce komplexní, uvažujeme právě hodnoty získané z tohoto prostředí jako nejvíce přesné a směrodatné.

Celkově lze pozorovat, že postupnými navrhovanými úpravami bylo dosaženo stále vyšší účinnosti, která z původních 88,95 % vzrostla až na 92,05 % v případě poslední možnosti provedení. Tímto bylo dosaženo finálního navýšení účinnosti o 3,1 % oproti původnímu návrhu, ale za cenu jistého zvýšení finálních nákladů na výrobu. Z hlediska účinnosti se nejlépe jeví kombinace dvouvrstvého soustředěného vinutí v 12 drážkách desetipólového motoru. Velmi dobrých výsledků rovněž dosáhl motor s jednovrstvým soustředěným vinutím, ale tento stroj na základě analýzy MKP vykazoval nejvyšší podíl ztrát v plném materiálu. Právě uvážení těchto ztrát představovalo v případě třetí varianty stroje značné snížení výsledné účinnosti. Nejvyšších ztrát v mědi dosahoval druhý stroj i přesto, že dle analytického výpočtu a kontrole v RMXprt nevykazoval nesrovnalosti v porovnání s původním motorem. Největší podíl ztrát v železe se mimo původní motor dle očekávání objevil ve stroji č. 4, kde jsme cíleně navyšovali délku železa. Z hlediska zastoupení jednotlivých ztrát se jeví pátá varianta motoru jako nejvíce vyvážená.

Je zřejmé, že aplikací vhodných úprav lze dosáhnout navýšení účinnosti, a to několika různými způsoby přístupu. Faktem však zůstává, že většina takových úprav představuje pro výrobce běžně neopomenutelné výdaje, a tak by bylo ve finále nutno zhodnotit vhodnost navrhovaných vylepšení i po stránce ekonomické. Z hlediska udržení co nejnižší ceny, se jako nejpříznivější jeví první varianta, neboť se odvíjí od použití poměrně levných částí asynchronního stroje a uvažuje levnější plechy statorového svazku.

Mimo ekonomické zhodnocení by měl být věnován čas dalším úpravám, a to zejména parametrům, které byly pro lepší srovnatelnost cíleně udržovány neměnné, tedy vnější průměr a rovedení a rozměry magnetů na nichž by se vhodnou úpravou dal ušetřit materiál.

3.6.2 Posouzení použitých metod

Vzhledem k charakteru zpracování návrhů je zřejmé, že možností přístupu k návrhu nových strojů je mnoho, a jinak tomu není ani v případě návrhových pomůcek. Těmi v rámci této práce byly ruční výpočet, výpočet v prostředí Ansys RMXprt a následná analýza metodou konečných prvků v prostředí Ansys Maxwell. Lze usoudit, že každá z metod disponuje jistými výhodami i slabiny.

Ruční výpočet dnes již do jisté míry odchází do pozadí vlivem přítomnosti rychlých výpočetních programů a designových pomůcek. Kládnu stránkou analytického výpočtu je možnost měnit složitost výpočtu dle potřeby, či cílený výpočet jen některých požadovaných parametrů. Nevýhodou je nižší efektivita a značná závislost správnosti výsledků na základě vhodné metody postupu výpočtu.

RMxpert a podobné výpočtové programy dohání efektivní využití návrhového času a jejich nejsilnější stránkou je možnost provádění velkého množství výpočtů spojených s drobnými změnami jednotlivých parametrů a následnou kontrolou vlivů na výsledný stav a parametry stroje. [19]

Programy pro analýzu metodou konečných prvků, jako je Ansys Maxwell či například FEMM jsou vhodné k hloubkové analýze sledovaného stroje s možností uvažování parametrů či vlivů běžně zanedbávaných za účelem úspory času. Simulační programy analyzující pomocí metody konečných prvků jsou téměř nepostradatelným nástrojem, ale již zmíněná široká škála možností a výsledků se neobejde bez nevýhody v podobě značné výpočetní/simulační doby. [18] [19]

Je zřejmé, že každá z metod přináší jisté výhody i nevýhody a jejich efektivita se odvíjí také od správného využití. Vhodnou kombinací výpočetních metod na různá stádia, je v rovině návrhu možno velmi efektivně navrhovat či upravovat stroje společně s možností pozorování vlivů a změn s následnou možností interpretace přesných a rozmanitých výsledků.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s problematikou týkající se synchronních motorů s permanentními magnety a následně provést návrh BLDC stroje odpovídajícího parametrům zadání. Na základě literárních pramenů byl sestaven teoretický úvod zahrnující popis principu činnosti synchronních strojů s permanentními magnety, jejich typické vlastnosti a možnosti využití.

V oddílu konstrukčního provedení stroje bylo pojednáno o problematice konstrukčních částí synchronních strojů s PM, včetně zmínky o typických vlastnostech a funkci používaných materiálů. Teoretický úvod byl završen rozбором běžně užívaných vinutí s ohledem na jejich provedení a využití jednotlivých variant na základě jejich typických vlastností.

Hlavní část diplomové práce spočívala ve výpočtu zadaného synchronního motoru s permanentními magnety dle požadavků na parametry ze strany firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Účelem bylo navrhnout synchronní stroj s permanentními magnety pro pohon elektromagnetického ventilu, který měl pracovat v rozmezí otáček $0-5000 \text{ min}^{-1}$ a měl být schopen dodávat 1 Nm točivého momentu.

Předmětem třetí kapitoly tedy bylo zpracování pěti variant provedení BLDC motoru, přičemž každý ze strojů se navzájem lišil specifickou úpravou některých z parametrů. V několika případech byly některé volené parametry v rámci zpracované závěrečné práce cíleně zachovány totožné tak, aby bylo možno provést odpovídající porovnání jednotlivých aplikovaných změn.

Prvotní variantou byl výpočtový návrh elektricky komutovaného motoru, jehož vlastnosti byly voleny s ohledem na možnosti dispozice výrobce asynchronních strojů. V kapitole je uveden kompletní postup výpočtu BLDC motoru s rozloženým vinutím a výsledky byly porovnány s hodnotami získanými z výpočtu v programu Ansys RMxprt. Jak se ukázalo, použitý postup výpočtu vedl na nepřesnost v podobě neodpovídající volby počtu závitů stroje, jejíž následkem vznikly rozdíly simulovaných a vypočtených výsledků s chybou až 38 %.

Na základě této skutečnosti byla provedena korekce počtu závitů a kompletní přepočtení veličin ovlivněných touto změnou. Výsledky nového výpočtu byly porovnány s odpovídajícím přepočtem v programu Ansys RMxprt. Vlivem přijatých změn bylo dosaženo mnohem příznivější shody výsledků obou metod, kde se procentuální chyba pohybovala v průměru pod 5 %. Nakonec byla provedena simulace motoru pomocí MKP a byly vyobrazeny výsledné průběhy.

Druhá varianta stavěla na základech prvotního výpočtu s cílem přijetí takových změn, aby bylo dosaženo vyšší účinnosti. Toho bylo docíleno individuálním návrhem geometrie statorového plechu, čímž se navýšila účinnost přibližně o 1 %. Aplikací takovéto úpravy společně s následným přepočtem bylo dosaženo mírného

zvýšení účinnosti při současném minimálním navýšení nákladů. Změna geometrie statorového plechu je spojena s pořízením nové formy na prostřihovadlo, ale při produkci dostatečného počtu kusů stroje se takováto změna může vyplatit.

Následující tři varianty byly spojeny s volbou vhodnější kombinace počtu drážek a pólů stroje. Bylo zvoleno provedení 12 drážek na 10 pólů a vzhledem k navýšení počtu pólů byl zvolen materiál plechu disponující nižšími měrnými ztrátami na vyšších frekvencích. Do nové kombinace drážek bylo navrženo postupně jednovrstvé soustředěné vinutí ve třetím provedení stroje, a dále také dvouvrstvé soustředěné vinutí v případě čtvrté a páté varianty. Každá ze změn byla doprovázena dalším navýšením účinnosti až na konečných 92,05 %. V těchto variantách již však bylo aplikováno několik změn spojených se znatelným navýšením výrobních nákladů, a proto by bylo nutno se v praxi touto problematikou dále zabývat.

Poslední část třetí kapitoly byla zaměřena na konečné zhodnocení společně s porovnáním výsledných účinností jednotlivých variant výpočtů motorů. Z výsledků vyplývá, že při návrhu s cílem maximálního zvýšení účinnosti je nejlepší variantou pátý motor, u kterého byla aplikována celá řada úprav. Pokud by byl jedním z rozhodujících parametrů cena výroby, poslouží nejlépe první či druhá varianta, i když jejich technické a provozní vlastnosti nedosahují tak dobrých výsledků. Ukázalo se tedy, že vhodnou aplikací úprav je možno efektivně navýšit účinnost stroje společně se zlepšením některých parametrů. Každá změna je zde samozřejmě také otázkou kompromisu, a veškeré změny za cílem zlepšení jedné oblasti jsou zpravidla prováděny na úkor zhoršení vlastností v oblasti jiné. Každá z navrhovaných úprav se taktéž v praxi podepíše na výsledných výrobních nákladech, a proto bude nutné zhodnotit navrhovaná vylepšení i po této stránce.

Literatura

[1] HENDERSHOT, J.R. a T.J.E. MILLER. Design of Brushless Permanent-Magnet motors. USA: Oxford University Press,. 1995. p. 584. ISBN 978-0198593898.

[2] VOREL P. Synchronní stroje s permanentními magnety. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-7204-417-6

[3] PYRHÖNEN J., JOKINEN T., HRABOVCOVÁ V. Design of rotating electrical machines. JOHN WILEY & SONS, LTD. ISBN: 978-0-470-69516-6, 2008, 512 STR

[4] VÍTEK, O. Prezentace synchronní stroje s permanentními magnety: Studijní podklady. Brno, 2012.

[5] HANSELMAN, Duane C., "Brushless Permanent Magnet Motor Design" (2003). *Faculty and Staff Monograph Publications*. 231.

[6] GIERAS, Jacek F. a Mitchell WING. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications. New York: CRC Press, Inc., 2002. 2. ISBN 0-8247-0739-1.

[7] VÍTEK O. Výpočet magnetického obvodu BLDC motoru s permanentními magnety. STUDIJNÍ PODKLADY. BRNO, 2012, 17 STR.

[8] TYPICAL DATA FOR SURA M400-50A. PLECHY COGENT, TATA STEEL GROUP [ONLINE]. 2015, DOSTUPNÉ Z http://www.sura.se/Sura/hp_main.nsf/startupFrameset?ReadForm

[9] NEODYMIUM-IRON-BORON MAGNET CATALOGS. ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES CORPORATION [ONLINE]. 2015, DOSTUPNÉ Z <http://www.arnoldmagnetics.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=5022>

[10] HÖLL J. Vysokomomentové pohony nezávislé trakce. DIZERTAČNÍ PRÁCE, vedoucí DOC. DR. ING. KUCHYŇKOVÁ H. BRNO, 2011, 108 STR.

[11] TYPICAL DATA FOR SURA M235-35A. PLECHY COGENT, TATA STEEL GROUP [ONLINE]. 2015, DOSTUPNÉ Z http://www.sura.se/Sura/hp_main.nsf/startupFrameset?ReadForm

[12] A. J. Pawar and A. Patil, "Design and development of 48V PMBLDC motor for radiator fan application by using ANSYS Maxwell software," *2017 Third International Conference on Sensing, Signal Processing and Security (ICSSS)*, Chennai, 2017, pp. 247-252.

- [13] R. Hiremath, "Finite element study of induced Emf, cogging torque and its reductions in BLDC motor," *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, Kerala State, Kannur, India, 2017, pp. 1665-1668.
- [14] R. Hiremath and B. A. Sridhara, "Finite element analysis of BLDC motor," *2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC)*, Melmaruvathur, 2017, pp. 527-529.
- [15] HENDERSHOT, Jamer R. Brushless DC motor phase, pole and slot configurations. *Magna physics corporation*. Hillsboro, Ohio, 2002, , 17.
- [16] KENJŌ, Takashi. a Shigenobu NAGAMORI. *Permanent-magnet and brushless DC motors*. New York: Oxford University Press, 1985. ISBN 01-985-6214-4.
- [17] YEDAMALE, Padmaraja. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. *Microchip*. 2003, , 20.
- [18] ANSYS INC. *USER'S GUIDE-MAXWELL 2D. ELECTRONIC DESIGN AUTOMATION SOFTWARE*. CANONSBURG, 2010, Dostupné z: <http://www.ansys.com>
- [19] ANSYS ANSOFT SOFTWARE. SPOLEČNOST SVS FEM S.R.O. [ONLINE], 2015, Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/ansys-ansoft>