

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

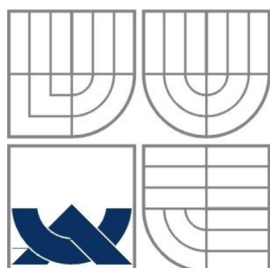
ELEKTRICKÝ STROJ S AXIÁLNÍM MAGNETICKÝM TOKEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

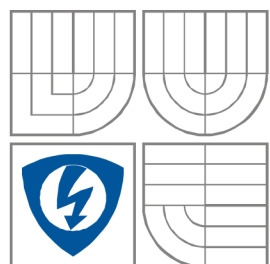
DAVID LACINA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ELEKTRICKÝ STROJ S AXIÁLNÍM MAGNETICKÝM TOKEM

AXIAL MAGNETIC FLUX ELECTRIC MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

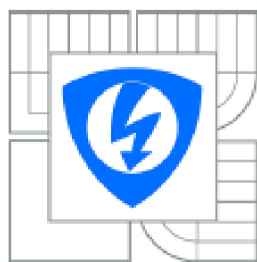
DAVID LACINA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROSTISLAV HUZLÍK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: David Lacina

ID: 158183

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Elektrický stroj s axiálním magnetickým tokem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě podkladů od vedoucího proveďte analytické výpočet vyrobeného stroje
2. Vlastnosti vyrobeného motoru ověřte v programu Ansys Maxwell.
3. Na vyrobeném stroji proveďte měření pro ověření analytického výpočtu a modelu v Maxwellsu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] M. Aydin, S. Huang, and T. A. Lipo, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review," in Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation, and Motion (SPEEDAM) 2004, 2004.
- [2] J. F. Gieras, M. J. Kamper, and R.-J. Wang, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, 2nd Edition. Springer, 2008, p. 362.
- [3] M. J. Kamper, R.-J. Wang, and F. G. Rossouw, "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils," in 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007, pp. 13–20.

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 2.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

Anotace

Tato práce se zabývá elektrickými stroji s axiálním magnetickým tokem. Práce je rozdělena na čtyři části. V první části jsou popsány základní druhy konstrukce těchto strojů a jejich základní vlastnosti. V druhé části se práce zabývá návrhem stroje s axiálním magnetickým tokem. Výpočet tohoto stroje je poté ověřen pomocí výpočtu metody konečných prvků v programu Ansys Maxwell. V poslední část práce jsou předchozí výpočty ověřeny praktickým měřením axiálního stroje. Na závěr jsou výsledky analytického výpočtu, simulace a měření porovnány.

Klíčová slova

Stroj s axiálním tokem, generátor, bezželezné stroje

Abstract

This thesis deals with axial flux permanent magnet machines. It is divided into four parts. The first one describes how axial-flux machines can be categorized. It also explains basic construction designs and their properties. Second part focuses on designing axial-flux machine. The analytical calculation of the machine is then checked using finite element method in software Ansys Maxwell. In the last part the calculations are also checked by measurement of an actual axial flux machine. In the summary is a comparison of analytical calculation, simulation and measuring.

Keywords

axial flux machine , generator, coreless machine

Bibliografická citace

LACINA, D. *Elektrický stroj s axiálním magnetickým tokem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh elektrického stroje s axiálním magnetickým tokem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

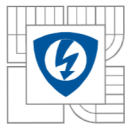
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

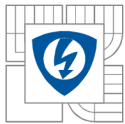
V Brně dne

Podpis autora

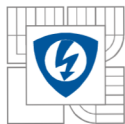


OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
ÚVOD	15
1 LITERÁRNÍ ROZBOR.....	16
1.1 JEDNOSTRANNÉ AXIÁLNÍ STROJE	16
1.2 OBOUSTRANNÉ AXIÁLNÍ STROJE.....	17
1.2.1 OBOUSTRANNÉ AXIÁLNÍ STROJE S VNITŘNÍM ROTOREM.....	17
1.2.2 OBOUSTRANNÉ STROJE S VNITŘNÍM STATOREM.....	18
1.3 VÍCEDISKOVÉ STROJE.....	18
1.4 VINUTÍ.....	19
1.4.1 KLASICKÉ VINUTÍ	20
1.4.2 TOROIDÁLNÍ VINUTÍ.....	21
1.5 STATOR.....	21
1.5.1 DRÁŽKOVANÝ STATOR	21
1.5.2 BEZDRÁŽKOVÝ STATOR.....	21
1.5.3 FEROMAGNETICKÝ STATOR	22
1.5.4 BEZJÁDROVÝ STATOR.....	22
1.6 SHRUTÍ.....	22
2 VÝPOČET PŘEDLOŽENÉHO STROJE	23
2.1 ZJEDNODUŠENÝ VÝKRES STROJE.....	23
2.2 VÝPOČET STROJE.....	24
2.2.1 HODNOTY ZADANÉ PRO VÝPOČET STROJE.....	24
2.2.2 OBECNÝ VÝPOČET AXIÁLNÍHO STROJE	25
2.2.3 VÝPOČET NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ STROJE.....	29
2.2.4 VÝPOČET ZTRÁT	31
2.2.5 VYPOČÍTANÉ VÝSLEDKY	32
2.2.6 VÝPOČET VLASTNOSTÍ MOTORU.....	34
2.2.7 VÝPOČET INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ GENERÁTORU	36
3 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ STROJE V PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	37
3.1 VÝPOČET ROZLOŽENÍ INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE	39
3.2 VÝPOČET INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ.....	43
4 MĚŘENÍ	47
4.1 MĚŘENÍ INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ.....	47
4.2 MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE	50
5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	51

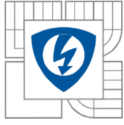


6 ZÁVĚR	53
LITERATURA	55

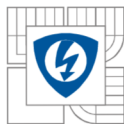


SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Jednostranný axiální stroj [6]	16
Obr. 1.2 oboustranný axiální stroj s vnitřním rotorem [6]	17
Obr. 1.3 Oboustranný axiální stroj s vnitřním statorem [6]	18
Obr. 1.4 Vícediskový axiální stroj [6]	19
Obr. 1.5 Klasické vinutí cívek [1]	19
Obr. 1.6 Toroidální vinutí cívek [1]	19
Obr. 1.7 Vinutí s překrývajícími se cívkami [1]	20
Obr. 1.8 Vinutí s nepřekrývajícími se cívkami [6]	20
Obr. 1.9 Vinutí se všemi cívkami jedné fáze u sebe [6]	20
Obr. 1.10 drážkovaný stator [4]	21
Obr. 1.11 Bezdrážkový stator [4]	21
Obr. 2.1 Výkres statoru stroje	23
Obr. 2.2 Výkres rotoru stroje	23
Obr. 2.3 Průřez konstrukcí stroje	23
Obr. 2.4 Rozměry a rozložení permanentních magnetů na rotorech	23
Obr. 3.1 Ukázka pracovního okna v programu Ansys Maxwell	37
Obr. 3.2 Model axiálního stroje vytvořený v programu Inventor	38
Obr. 3.3 model pro simulaci rozložení magnetického pole bez statorových cívek	39
Obr. 3.4 Základní roviny pro zobrazení rozložení magnetického pole	39
Obr. 3.5 Zobrazení rozložení magnetické indukce v rovině A procházející středem permanentního magnetu	40
Obr. 3.6 Zobrazení rozložení magnetické indukce v rovině C procházející středem poloměru magnetu	41
Obr. 3.7 zobrazení rozložení magnetické indukce v rovině B procházející středem vzduchové mezery	41
Obr. 3.8 Celkové rozložení magnetické indukce ve všech třech rovinách	42
Obr. 3.9 Nasimulovaný průběh magnetické indukce ve vinutí stroje	42
Obr. 3.10 Model statorového vinutí	43
Obr. 3.11 Zobrazení celkové konstrukce modelu pro transientní analýzu	43
Obr. 3.12 průběh indukovaného napětí pro 430 ot.min ⁻¹	44
Obr. 3.13 průběh indukovaného napětí pro 586 ot.min ⁻¹	45
Obr. 3.14 průběh indukovaného napětí pro 730 ot.min ⁻¹	46

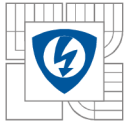


Obr. 4.1 vnitřní strana statorového vinutí stroje.....	47
Obr. 4.2 vnější strana statorového vinutí stroje.....	47
Obr. 4.3 měřicí pracoviště	47
Obr. 4.4 Naměřené průběhy indukovaného napětí při 430 ot.min ⁻¹	48
Obr. 4.5 Naměřené průběhy indukovaného napětí při 586 ot.min ⁻¹	49
Obr. 4.6 Naměřené průběhy indukovaného napětí při 730 ot.min ⁻¹	49
Obr. 4.7 průběh magnetické indukce ve vinutí stroje.....	50



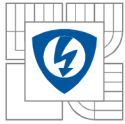
SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 tabulka zadaných a odhadovaných hodnot.....	24
Tab. 2.2 hodnoty přeepsané z výkresu stroje	25
Tab. 2.3 Vypočítané obecné parametry axiálního stroje	33
Tab. 2.4 Vypočítané hodnoty náhradních parametrů stroje	34
Tab. 2.5 Tabulka vypočítaných ztrát stroje	34
Tab. 2.6 Vypočítané celkové vlastnosti motoru	35
Tab. 2.7 Vypočítaná indukovaná napětí pro různé otáčky	36
Tab. 3.1 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 430 ot.min ⁻¹	44
Tab. 3.2 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min ⁻¹	45
Tab. 3.3 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min ⁻¹	46
Tab. 4.1 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 430 ot.min ⁻¹	48
Tab. 4.2 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min ⁻¹	49
Tab. 4.3 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min ⁻¹	50
Tab. 5.1 Tabulka s výsledky pro 430 ot.min ⁻¹	51
Tab. 5.2 Tabulka s výsledky pro 586 ot.min ⁻¹	51
Tab. 5.3 Tabulka s výsledky pro 730 ot.min ⁻¹	51
Tab. 5.4 Porovnání magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery	52



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

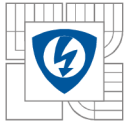
Značení	Název	Jednotka
m_1	Počet fází	-
p	Počet pólových dvojic	-
rpm	Jmenovité otáčky	ot·min ⁻¹
s_1	Celkový počet cívkových stran	-
H_c	Koercitivní intenzita magnetu	A·m ⁻¹
μ_r	Relativní permeabilita	-
k_d	Poměrový koeficient	-
N_1	Počet závitů ve fázi	-
a_w	Počet paralelních drátů v jednom vodiči	-
w_c	Cívkový krok	-
d_w	Průměr holého vodiče	m
I_a	Statorový proud	A
k_{sat}	Koeficient saturace magnetického obvodu	-
ρ_{PM}	Hustota permanentních magnetů	kg·m ³
ρ_{Fe}	Hustota měkké oceli	kg·m ³
ρ	Hustota mědi	kg·m ³
ρ_{air}	Hustota vzduchu	kg·m ³
μ_{air}	Dynamická viskozita vzduchu	Pa·s
σ	Elektrická vodivost vodiče	S·m ⁻¹
k_{fb}	Koeficient tření v ložiscích	m ² ·s ⁻²
η_d	Koeficient zkreslení magnetické indukce	-
t	Vzdálenost mezi protilehlými magnety	m
t_w	Tloušťka vinutí	m
h_M	Tloušťka permanentního magnetu	m
D_{out}	Vnější průměr	m
R_{sh}	Poloměr hřídele	m
D_{inPM}	Vnitřní průměr permanentních magnetů	m
h_H	Délka hřídele	m
h_r	Šířka rotorového disku	m
n_c	Počet závitů na fázi u jedné vrstvy vinutí	-



N_{ct}	Počet závitů na pól a fázi	-
q_1	Počet stran cívky na pól a fázi	-
g	Šířka Vzduchové mezery	m
τ_c	Pólová rozteč	-
n	Otáčky	ot · s ⁻¹
f	Frekvence statorového proudu	Hz
B_r	Remanentní indukce	T
B_{mg}	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T
ϕ_f	Magnetický tok	Wb
k_{dl}	Činitel rozloženého vinutí	-
k_{pl}	Činitel kroku vinutí	-
β	Podíl cívkové rozteči k pólové rozteči	-
k_{wl}	Koeficient vinutí	-
U_{if}	Indukované napětí	V
k_E	Napěťová konstanta	V · (ot · s ⁻¹) ⁻¹
k_M	Konstanta točivého momentu	Nm · A ⁻¹
M	Elektromagnetický moment	Nm
P_{elm}	Elektromagnetický výkon	W
D_{in}	Vnitřní průměr permanentních magnetů	m
D	Střední průměr permanentních magnetů	m
τ	Střední pólová rozteč	m
w_w	Šířka cívky ve spodním průměru	m
N_c	Počet závitů na pól a fázi	-
k_{fmax}	Maximální hodnota faktoru výplně cívky na D_{in}	m
j_a	Hustota proudu statorového vinutí	A · m ²
m_r	Hmotnost rotoru	kg
m_{sh}	Hmotnost hřídele	kg
m_{con}	Hmotnost statorových vodičů	kg
L_i	Délka cívkové strany	m
l_M	Délka strany permanentního magnetu	m
l_{emin}	Čelo cívky vnitřního průměru	m
l_{emax}	Čelo cívky vnějšího průměru	m
l_{lav}	Celková délka vodiče v cívice	m



R_1	Odpor	Ω
λ_{le}	koeficient pro x_{le}	-
λ_{ls}	koeficient pro x_{ls}	-
τ_{dl}	činitel statorového diferenčního rozptylu	-
λ_{ld}	koeficient pro x_{ld}	-
X_1	Rozptylová reaktance	Ω
g_{eq}	Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v d ose	m
g_{eqq}	Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v q ose	m
k_{fd}	poměr první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v d ose	-
k_{fq}	poměr první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v q ose	-
X_{ad}	Vlastní reaktance v ose d	Ω
X_{aq}	Vlastní reaktance v ose q	Ω
X_{sd}	Celková reaktance v ose d	Ω
X_{sq}	Celková reaktance v ose q	Ω
ΔP_{1w}	Ztráty ve statorovém vinutí (Joulovy ztráty)	W
ΔP_e	Ztráty vířivými proudy	W
ΔP_{fr}	Ztráty třením v ložiscích	W
ΔP_{rot}	Mechanické ztráty	W
P_{in}	Příkon motoru	W
P_{out}	Výkon motoru	W
η	Účinnost motoru	%
M_{sh}	Točivý moment motoru	Nm
V_1	Vstupní fázové napětí	V
V_{1L}	Vstupní sdružené napětí	V
$\cos \phi$	Účinník motoru	-



ÚVOD

Historie točivých strojů sahá až do doby prvních experimentů převodu elektrické energie na energii mechanickou. V době raného vývoje točivých strojů to byly právě stroje s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety (dále jen axiální stroje), které se používaly nejčastěji. Ovšem, když si v roce 1873 Thomas Davenport nechal patentovat stroj s radiálním magnetickým tokem, začaly být axiální stroje využívány jen minimálně. Důvodem proč axiální stroje nenašly širší uplatnění, byla především jednoduchá konstrukce radiálních strojů. Oproti radiálním strojům byly axiální stroje konstrukčně náročné a velmi drahé na výrobu. Konstrukční náročnost spočívala v nemožnosti strojového navinování cívek a v působení velkých axiálních sil mezi státorem a rotorem, které mohly vést k deformaci stroje a proto do doby, než se objevily dostatečně pevné materiály, muselo být na konstrukci strojů s axiálním magnetickým tokem používáno velké množství materiálu.

Teprve když byl v roce 1931 vynalezen permanentní magnet pomocí slitin hliníku, niklu a kobaltu a permanentní magnety se tak staly dostupnější, získaly axiální stroje opět širší uplatnění. Cena strojů klesla a byly tak dostupné pro více aplikací. Později s vynálezem silných permanentních magnetů ze vzácných zemi se jejich uplatnění ještě více rozšířilo. Přestože je v posledních letech používání axiálních strojů stále častější, i nadále zůstávají například motory s axiálním magnetickým tokem oproti nejjednodušším motorům, kterými jsou asynchronní motory poměrně drahé. Proto se axiální stroje používají zvláště ve speciálních aplikacích. Výhodou těchto strojů je především jejich malá axiální délka a proto se jim také někdy říká diskové stroje. Další výhodou je u axiálních motorů schopnost vytvoření vysokého točivého momentu. Proto se tyto motory používají například pro pohon elektromobilů, kde mohou být zabudovány přímo v kole vozidla. U elektromobilů je využívána i další výhoda axiálních motorů a to, že zde nejsou potřeba jakékoliv převody. Oproti jiným strojům mají axiální stroje také vyšší účinnost. I přes to že se podařilo překonat spoustu problému s výrobou axiálních strojů, zůstávají tyto stroje i nadále poměrně drahé a náročné na výrobu, dá se ale předpokládat jejich další vývoj a větší rozšíření.

1 LITERÁRNÍ ROZBOR

Konstrukce elektrického stroje s axiálním magnetickým tokem (dále jen axiální stroj) je založena na principu působení magnetického pole v axiálním směru. V konstrukcích těchto strojů leží cívky v jedné rovině, stejně tak jako magnety. Jedná se o třífázové střídavé synchronní stroje. Synchronní stroje jsou charakterizovány tím, že rotor stroje se otáčí synchronně s točivým polem statoru. Tyto stroje mohou být provozovány v motorickém i v generátorovém režimu.

Existuje několik možných základních druhů provedení konstrukce axiálního stroje.

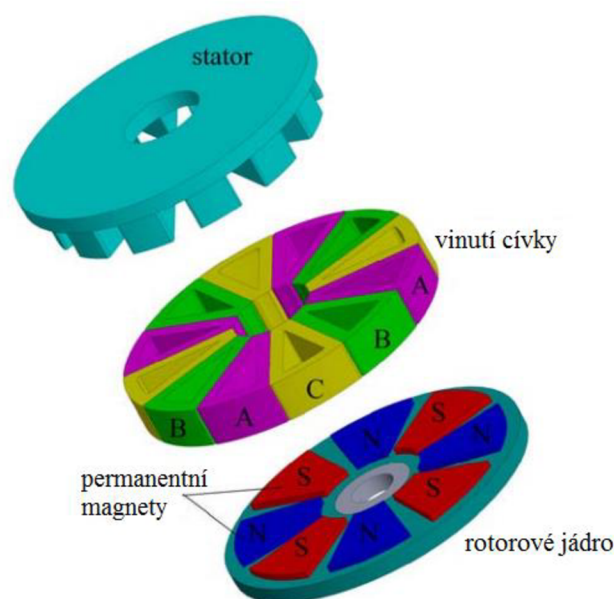
Podle [1] stroje s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety lze konstrukčně rozdělit na:

- Jednostranné axiální stroje
- Oboustranné axiální stroje
 - S vnitřním rotorem
 - S vnitřním státorem
- Vicediskové axiální stroje

1.1 Jednostranné axiální stroje

Konstrukčně nejjednodušší stroje s axiálním magnetickým tokem představují jednostranné stroje, skládající se z jednoho statoru a jednoho rotoru. Rotor je tvořen permanentní magnety, které jsou přidělané na rotorovém disku, rotorovým diskem a hřídelí. Stator je zde tvořen statorovým vinutím a statorovým jádrem.

Tyto stroje mají oproti ostatním axiálním strojům jednoduchou konstrukci, ovšem na úkor menšího točivého momentu oproti složitějším axiálním strojům.[1]



Obr. 1.1 Jednostranný axiální stroj [6]

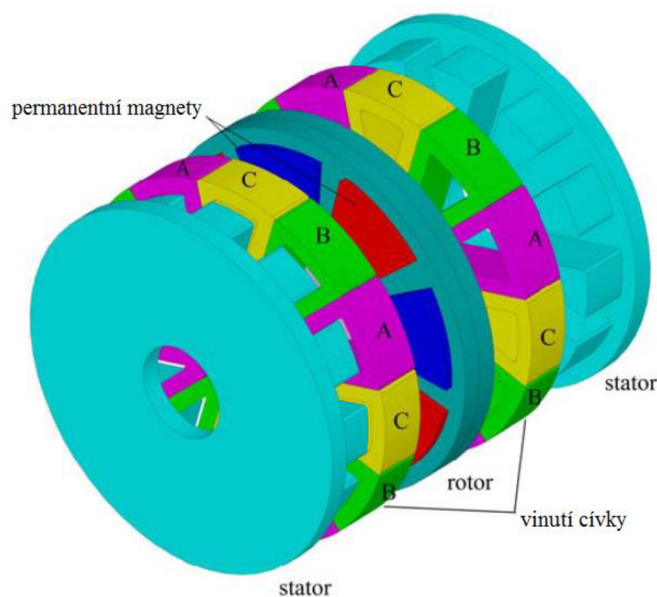
Předností axiálních strojů v porovnání se stroji radiálními je především jejich vysoký točivý moment v porovnání s radiálními motory stejné velikosti. V případě, že má stroj ve statoru železné jádro, vzniká zde problém, s axiálními silami působícími, mezi permanentními magnety a železným jádrem statoru. Vlivem těchto sil poté může dojít až k deformaci celé konstrukce stroje. V neposlední řadě jsou těmito silami také velmi namáhána ložiska vymezující pohyb rotoru, u kterých také může dojít k poškození. S tímto problémem je třeba při konstrukci axiálních strojů počítat a je možné řešit ho tím, že se ve stroji použije zesílený rotorový disk a speciální ložiskové uspořádání.[1]

1.2 Oboustranné axiální stroje

Druhou skupinou axiálních strojů konstrukčně náročnějších oproti jednostranným strojům jsou stroje oboustranné. Oboustranné stroje se od jednostranných liší tím, že bývají konstruovány jako stroje s vnitřním statorem a dvěma vnějšími rotory, nebo jako stroje s vnitřním rotorem a dvěma vnějšími statory. To znamená, že mají stator nebo rotor po obou stranách stroje. Výhodou těchto strojů je, že díky své konstrukci dosahují oproti jednostranným axiálním motorům vyššího točivého momentu.

1.2.1 Oboustranné axiální stroje s vnitřním rotorem

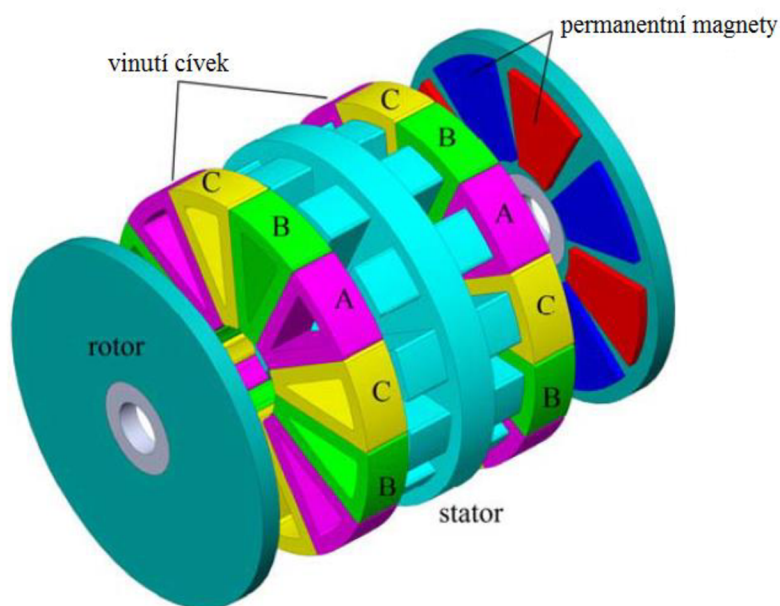
Konstrukci těchto strojů tvoří dva vnější statory a jeden vnitřní rotor. Rotor se skládá z rotorového disku, na kterém jsou připevněny permanentní magnety. Magnety mohou být konstruovány tak, že na každé straně disku je jeden magnet, ovšem protilehlé magnety musejí být uloženy tak, aby se navzájem přitahovaly. Druhou možností je, že jeden magnet je zabudován v rotorovém disku, a prochází jím na skrz. Výhodou konstrukce axiálních strojů s vnitřním rotorem je nižší spotřeba permanentních magnetů než u strojů s vnějšími rotory, ovšem oproti strojům s vnějšími rotory je zde menší využitelnost vinutí, protože pouze vnitřní část vinutí se podílí na výrobě momentu.[1]



Obr. 1.2 oboustranný axiální stroj s vnitřním rotorem [6]

1.2.2 Oboustranné stroje s vnitřním statorem

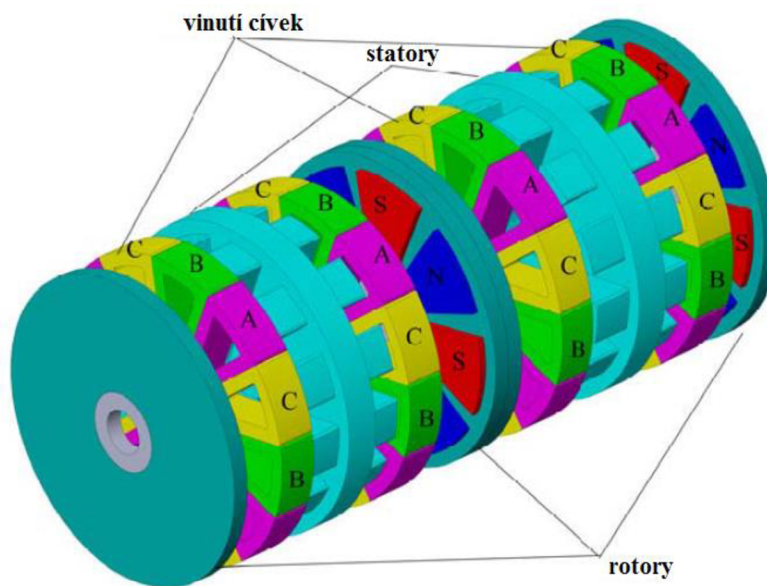
Tyto stroje jsou konstruovány tak, že mají jeden vnitřní stator a dva vnější rotory. Rotory se stejně jako v předchozích případech skládají z rotorových disků, na nichž jsou na povrchu přidělány permanentní magnety. Protilehlé magnety jsou v případě, že se na statoru nachází klasické vinutí polarizovány tak, aby se navzájem přitahovaly. V případě, že-li na statoru vinutí toroidální, jsou protilehlé magnety umístěny tak, aby se navzájem odpuzovaly. Výhodou oproti konstrukci s vnitřním rotorem je, že se na výrobě momentu podílejí obě strany vinutí. [1]



Obr. 1.3 Oboustranný axiální stroj s vnitřním statorem [6]

1.3 Vícediskové stroje

Protože nelze neomezeně zvětšovat průměr stroje kvůli dosažení vyššího momentu motoru, z důvodů jako jsou například axiální síla působící na ložiska, pevnost spoje mezi rotorem a diskem nebo mechanická pevnost rotorového disku, řeší se problém zvyšování výkonu řazením více disků za sebe na jednu hřídel. Takovéto stroje se nazývají vícediskové stroje. Principiálně se jedná o více jednotlivých strojů spojených za sebou na jedné hřídeli. V takovéto konstrukci mohou být cívky jedné fáze navzájem pospojovány sériově nebo paralelně. Tyto stroje mohou být konstruovány jako stroje s dvojitými statory nebo dvojitými rotory.



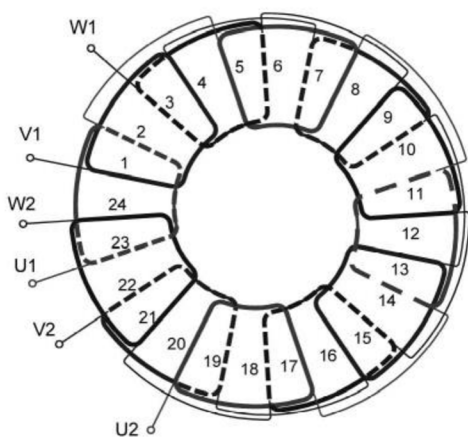
Obr. 1.4 Vícediskový axiální stroj [6]

1.4 Vinutí

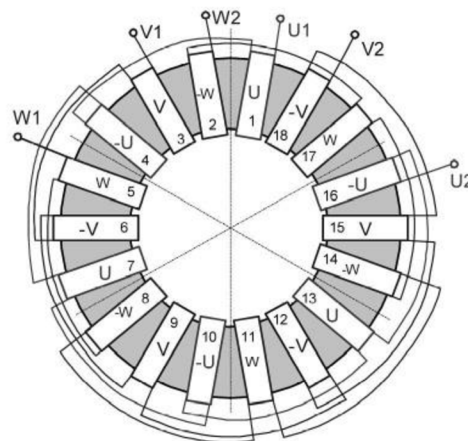
Jako další kritérium, podle kterého mohou být axiální stroje děleny je konstrukce satorového vinutí.

Různými konstrukčními typy vinutí se zabývá literatura [1] a [6]. Obecně lze druhy vinutí rozdělit takto:

- Klasické vinutí
 - Vinutí s překrývajícími se cívkami
 - Vinutí s nepřekrývajícími se cívkami
 - Vinutí se všemi cívkami jedné fáze u sebe
- Toroidální vinutí



Obr. 1.5 Klasické vinutí cívek [1]



Obr. 1.6 Toroidální vinutí cívek [1]

Vinutí bývá nejčastěji vyrobené z měděného vodiče, kruhového, nebo obdélníkového průřezu. Vinutí může být tvořeno jedním silným vodičem, ale kvůli snížení ztrát vířivými proudy se používá více slabých vodičů. Aby se zamezilo pohybu navinutých cívek, bývají cívky zality v laku nebo pryskyřici.

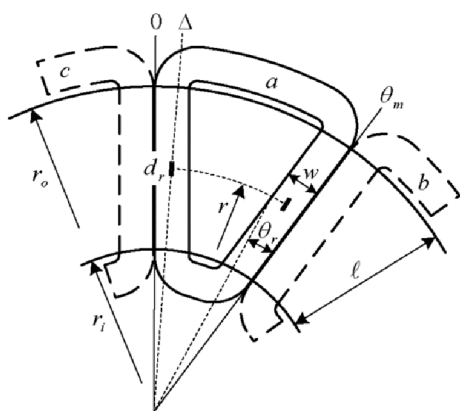
1.4.1 Klasické vinutí

Mluvíme-li o klasickém vinutí, máme na mysli vinutí, které je běžně používané ve strojích s radiálním magnetickým tokem, ovšem zde je vinutí umístěno v jedné rovině. Příklad takového vinutí je znázorněn na Obr. 1.5. Toto vinutí se nejčastěji skládá z několika lichoběžníkově tvarovaných cívek. Pro klasické vinutí existuje několik možných způsobů vzájemné polohy cívek různých fází. Nejčastěji bývá klasické vinutí konstruované s překrývajícími se cívkami, přičemž jednotlivé cívky mohou být ohnuty tak, aby aktivní vodiče ležely ve stejné rovině. Takovéto umístění cívek je zobrazené na Obr. 1.7.



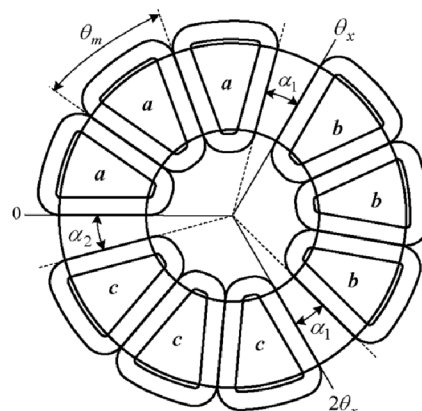
Obr. 1.7 Vinutí s překrývajícími se cívkami [1]

Cívky mohou být také konstruovány jako nepřekrývající se cívky (Obr. 1.8) nebo mohou být cívky jedné fáze umístěné vedle sebe (Obr. 1.9). Z porovnání v literatuře [6] vychází, že nejlepší vlastnosti z těchto třech možných konstrukcí vinutí má vinutí s překrývajícími se cívkami.



Obr. 1.8 Vinutí s nepřekrývajícími se cívkami

[6]



Obr. 1.9 Vinutí se všemi cívkami jedné fáze u

sebe [6]

1.4.2 Toroidální vinutí

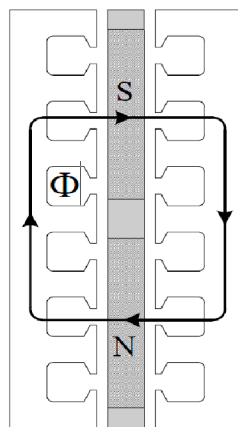
Toroidální vinutí cívek je znázorněno na Obr. 1.6 a jde o jednotlivé toroidy navinuté na prstencovém statoru, přičemž vinutí může být uloženo v drážkách, nebo navinuto na bezdrážkovém statoru. Výhodou tohoto zapojení je jednoduchá konstrukce a snadná konstrukční možnost volitelnosti počtu cívek.

1.5 Stator

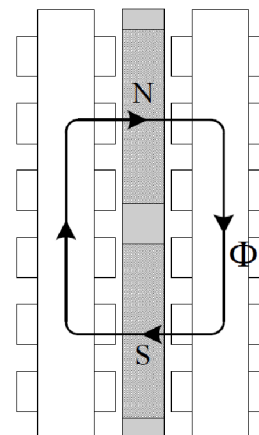
Jako další kritérium pro konstrukční rozdělení axiálních strojů jsou statory, které mohou být konstruovány jako drážkované, nebo bezdrážkové [1],[4].

1.5.1 Drážkovaný stator

Jedná se o feromagnetický stator, ve kterém jsou vyřezány drážky, ve kterých je uloženo statorové vinutí. Tato konstrukce je zobrazena na Obr. 1.10. Tato konstrukce je ve srovnání s bezdrážkovou konstrukcí účinnější, protože je zde kratší měděné vinutí, tudíž i ztráty v mědi jsou menší. Vinutí může být uloženo jako jednovrstvé vinutí, nebo dvouvrstvé vinutí. Je-li vinutí uloženo jako jednovrstvé, nachází se v každé drážce pouze jedna strana jedné cívky. Bude-li vinutí konstruováno jako dvouvrstvé, budou se v každé drážce nacházet strany dvou cívek.



Obr. 1.10 drážkovaný stator [4]



Obr. 1.11 Bezdrážkový stator [4]

1.5.2 Bezdrážkový stator

Na bezdrážkovém statoru bývá navinuto toroidální vinutí, u kterého bývají cívky zality do epoxidové pryskyřice, která vyplní prázdný prostor, chrání cívky před mechanickým poškozením a zlepšuje odvod tepla z vinutí. Nevýhodou takovéto konstrukce je, že pouze vnitřní strany cívek se podílejí na výrobě momentu. Navíc vynutí v takovéto konstrukci je poměrně dlouhé, a proto zde vznikají vyšší ztráty v mědi. Výhodou je naopak možnost volby libovolného počtu cívek na statoru. Příklad bezdrážkové konstrukce axiálního stroje s vnitřním rotorem a magnetický tok v takové konstrukci je uveden na Obr. 1.11.

Jako poslední je konstrukční rozdělení podle materiálu, ze kterého je tvořeno jádro statoru, přičemž stator bývá nejčastěji konstruován jako jádrový nebo bezjádrový.

1.5.3 Feromagnetický stator

Tyto statory mohou být konstruovány jako drážkované nebo jako bezdrážkové jak již bylo popsáno v předchozí kapitole. Nevýhodou takovéto konstrukce jsou ovšem ztráty v železe statoru.

1.5.4 Bezjádrový stator

V této konstrukci je statorové vinutí umístěné ve vzduchové mezeře mezi permanentními magnety rotoru. Vinutí statoru zde bývá zalité v epoxidové pryskyřici. Kvůli zachování dostatečné magnetické indukce ve vzduchové mezeře je v této konstrukci ovšem potřeba vyšších permanentních magnetů, než ve strojích s železným jádrem. Protože se ale ve statoru nenalézá žádné železné jádro, nevznikají zde žádné ztráty v železe a proto má tento stroj vyšší účinnost.[1][2]

Podle literatury [1] je výhodou axiálního motoru lepší ovládání při nízkých otáčkách, eliminace nerovnoměrnosti momentu, možnost vytváření až desetinásobku točivého momentu nebo také motor poskytuje hladký chod motoru při extrémně nízkých otáčkách i když je poháněn standartním polovodičovým měničem. Protože se zahřáté vodiče statorového vinutí v důsledku teploty roztahují, může celá konstrukce z epoxidové pryskyřice podléhat určité deformaci a v důsledku toho může dojít ke kontaktu statoru s rotorem a následnému poškození konstrukce motoru. Aby k tomuto nedocházelo, je třeba, aby byla v konstrukci dostatečná mezera mezi státorem a rotorem.

1.6 Shrnutí

Obecně se dá říct, že axiální stroje mají oproti radiálním strojům výhodu v tom, že dosahují menší axiální délky, dosahují poměrově vyššího výkonu k hmotnosti stroje a mají snadněji nastavitelnou vzduchovou mezeru mezi státorem a rotorem.

Mezi nevýhody axiálních strojů ovšem patří jejich vyšší průměr, vyšší namáhání rotoru v axiálním směru a také vzhledem k poloměru rotoru vysoké odstředivé síly působící na magnety při vyšších otáčkách.

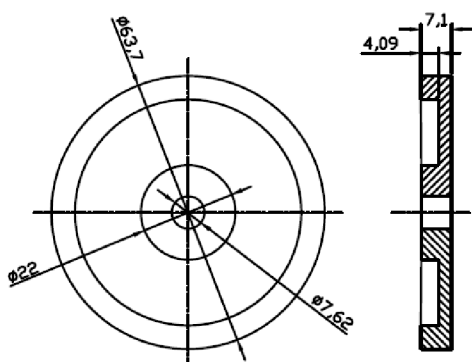
Celkově se tyto stroje uplatňují díky svému vysokému točivému momentu jako pohony v bezpřevodových konstrukcích a aplikacích, kde je třeba krátká délka v axiálním směru. Toho může být využito například pro pohon elektromobilu, kdy je tento motor umístěn přímo v kole automobilu. Využití tyto motory nacházejí také v oblasti elektrické trakce.

2 VÝPOČET PŘEDLOŽENÉHO STROJE

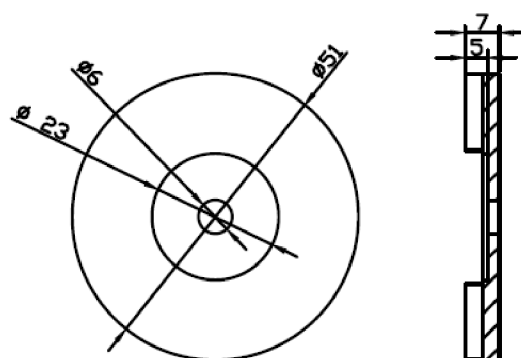
V této části práce bude proveden analytický výpočet axiálního stroje. Jedná se o oboustranný stroj s vnitřním bezjádrovým statorem. V bezjádrovém statoru je umístěno klasické překrývající se vinutí.

2.1 Zjednodušený výkres stroje

Pro potřebu výpočtu stroje byl vedoucím práce předložen zjednodušený výkres zadaného stroje, ze kterého byly odečteny hodnoty potřebné pro další výpočet. Na Obr. 2.1 je znázorněn výkres statorové části stroje a na Obr. 2.2 je znázorněn výkres rotoru. V konstrukci stroje se nacházejí stator i rotor dvakrát a jejich konstrukční umístění je znázorněno na Obr. 2.3.

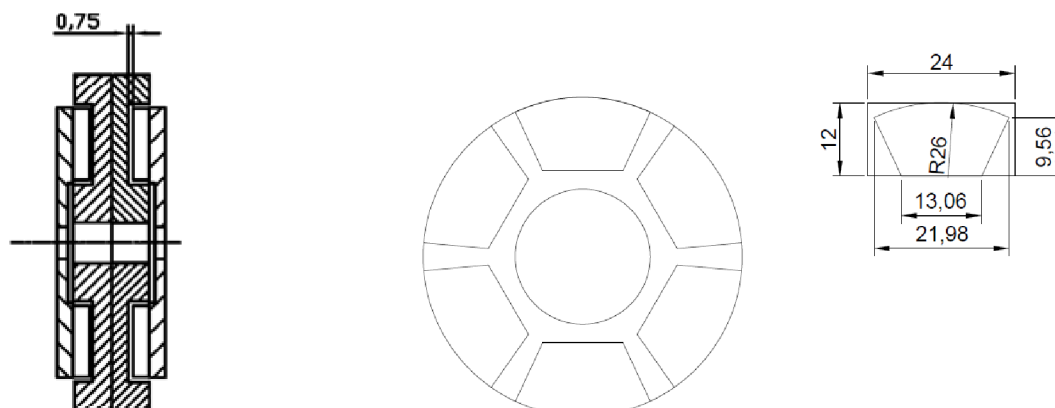


Obr. 2.1 Výkres statoru stroje



Obr. 2.2 Výkres rotoru stroje

Na Obr. 2.4 je znázorněno rozložení permanentních magnetů po obvodu rotorů a jejich rozměry.



Obr. 2.3 Průřez konstrukcí stroje

Obr. 2.4 Rozměry a rozložení permanentních magnetů na rotorech

2.2 Výpočet stroje

2.2.1 Hodnoty zadané pro výpočet stroje

Zadané a odhadované hodnoty pro výpočet stroje jsou přehledně zapsány v **Tab. 2.1**.

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Počet fází	m_1	3	-
Počet pólových dvojic	p	3	-
Jmenovité otáčky	rpm	3000	ot·min ⁻¹
Celkový počet cívkových stran	s_1	36	-
Koercitivní intenzita magnetu	H_c	756000	A·m ⁻¹
Relativní permeabilita	μ_r	1,421	-
Poměrový koeficient	k_d	0,577	-
Počet závitů ve fázi	N_1	300	-
Počet paralelních drátů v jednom vodiči	a_w	1	-
Cívkový krok	w_c	5	-
Průměr holého vodiče	d_w	0,0005	m
Statorový proud	I_a	0,4908	A
Koeficient saturace magnetického obvodu	k_{sat}	1,02	-
Hustota permanentních magnetů	ρ_{PM}	7700	kg·m ³
Hustota měkké oceli	ρ_{Fe}	7850	kg·m ³
Hustota mědi	ρ	8800	kg·m ³
Hustota vzduchu	ρ_{air}	1,2	kg·m ³
Dynamická viskozita vzduchu	μ_{air}	$1,8 \cdot 10^{-5}$	Pa·s
Elektrická vodivost vodiče	σ	$47 \cdot 10^6$	S·m ⁻¹
Koeficient tření v ložiscích	k_{fb}	1,5	m ² ·s ⁻²
Koeficient zkreslení magnetické indukce	η_d	1,15	-
Permeabilita vakua	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	H·m ⁻¹

Tab. 2.1 tabulka zadaných a odhadovaných hodnot

Dále byly z obrázků Obr. 2.1, Obr. 2.2, Obr. 2.3 a Obr. 2.4 odečteny potřebné rozměrové hodnoty a zapsány do **Tab. 2.2**.

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Vzdálenost mezi protilehlými magnety	t	0,00752	m
Tloušťka vinutí	t_w	0,00602	m
Tloušťka permanentního magnetu	h_M	0,005	m
Vnější průměr	D_{out}	0,052	m
Poloměr hřídele	R_{sh}	0,003	m
Vnitřní průměr permanentních magnetů	D_{inPM}	0,051	m
Délka hřídele	h_H	0,0215	m
Šířka rotorového disku	h_r	0,002	m
Délka hřídele	h_H	0,0215	m

Tab. 2.2 hodnoty přepsané z výkresu stroje

2.2.2 Obecný výpočet axiálního stroje

V první části výpočtu je proveden obecný výpočet parametrů axiálního stroje, který byl proveden na základě postupu výpočtu v literatuře [1].

Nejprve lze podle rovnice (2.1) vypočítat počet závitů na fázi u jedné vrstvy vinutí n_c

$$n_c = \frac{s_1}{2 \cdot m_1} \quad (2.1)$$

kde s_1 je celkový počet cívkových stran a m_1 je počet fází stroje.

Jestli-že je znám počet závitů na fázi u jedné vrstvy vinutí, vypočítá se podle vztahu (2.2) počet závitů na pól a fázi N_{ct} , kde N_1 je počet závitů na fázi.

$$N_{ct} = \frac{N_1}{n_c} \quad (2.2)$$

Dále může být vypočítán počet stran cívky na pól a fázi q_1 podle rovnice (2.3).

$$q_1 = \frac{s_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (2.3)$$

kde p je počet pólů stroje.

Šířka Vzduchové mezery g se může vypočítat podle vztahu (2.4). V této rovnici je t vzdálenost mezi protilehlými permanentními magnety a t_w je šířka statorového vinutí.

$$g = 0,5 \cdot (t - t_w) \quad (2.4)$$

Protože jsou známy všechny parametry pro výpočet pólové rozteče τ_c , můžeme být vypočítána podle vztahu (2.5).

$$\tau_c = \frac{s_1}{2 \cdot p} \quad (2.5)$$

Hodnota jmenovitých otáček byla zadána v otáčkách za minutu, proto je třeba tyto otáčky podle rovnice (2.6) přepočítat na otáčky za sekundu.

$$n = \frac{rpm}{60} \quad (2.6)$$

kde rpm jsou jmenovité otáčky stroje za jednu minutu.

Když jsou přepočítané otáčky, může se podle vztahu (2.7) vypočítat frekvence statorového proudu.

$$f = n \cdot p \quad (2.7)$$

Dále bude proveden výpočet remanentní indukce podle rovnice (2.8)

$$B_r = H_c \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.8)$$

kde H_c je koercitivní intenzita magnetu, μ_r je relativní permeabilita a μ_0 je permeabilita vakua

Dále je třeba podle vztahu (2.9) vypočítat magnetickou indukci ve vzduchové mezeře stroje.

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \left[\mu_{rrec} \cdot \frac{(g + 0,5 \cdot t_w)}{h_M} \right] \cdot k_{sat}} \quad (2.9)$$

V rovnici (2.9) je B_r remanentní indukce magnetu, μ_{rrec} je relativní permeabilita permanentního magnetu, h_M je tloušťka permanentního magnetu a k_{sat} je koeficient saturace magnetického obvodu.

Magnetický tok ϕ_f lze dopočítat z rovnice (2.10).

$$\phi_f = \frac{2}{\pi} \cdot B_{mg} \cdot \frac{\pi}{8 \cdot p} \cdot D_{out}^2 \cdot (1 - k_d^2) \quad (2.10)$$

kde D_{out} je vnější průměr permanentních magnetů a k_d je poměrový koeficient.

Dále se vypočítá hodnota činitele rozloženého vinutí podle rovnice (2.11).

$$k_{dl} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q_1}\right)} \quad (2.11)$$

Podle rovnice (2.12) se vypočítá činitel kroku vinutí.

$$k_{pl} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.12)$$

kde β je podíl cívkové rozteče w_c k pólové rozteči τ_c a vypočítá se podle rovnice (2.13).

$$\beta = \frac{w_c}{\tau_c} \quad (2.13)$$

Když je známa hodnota činitele rozloženého vinutí k_{dl} vypočítaná podle vztahu (2.11) a hodnotu činitele kroku vinutí k_{pl} vypočítanou podle vztahu (2.12) může se vypočítat hodnota koeficientu vinutí k_w . Výpočet se provede podle rovnice (2.14).

$$k_{w1} = k_{dl} \cdot k_{pl} \quad (2.14)$$

Ze vztahu (2.15) lze vypočítat hodnotu indukovaného efektivního fázového napětí.

$$U_{if} = k_E \cdot n \quad (2.15)$$

kde k_E je napěťová konstanta a lze ji vypočítat podle vztahu (2.16).

$$k_E = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot p \cdot N_1 \cdot k_{w1} \cdot \phi_f \quad (2.16)$$

Když je známa napěťovou konstantu k_E vypočítanou z rovnice (2.16), může se vypočítat konstanta točivého momentu k_M . Konstanta točivého momentu k_M se vypočítá z rovnice (2.17).

$$k_M = k_E \cdot \frac{m_1}{2 \cdot \pi} \quad (2.17)$$

Elektromagnetický moment M bude vypočítán ze vztahu (2.18).

$$M = k_T \cdot I_a \quad (2.18)$$

kde I_a je statorový proud.

Elektromagnetický výkon se vypočítá ze vztahu (2.19).

$$P_{elm} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad (2.19)$$

Dále mohou být vypočítány rozměry permanentních magnetů, kde vnitřní průměr permanentních magnetů D_{in} se vypočítá podle vztahu (2.20).

$$D_{in} = k_d \cdot D_{out} \quad (2.20)$$

kde D_{out} je vnější průměr permanentních magnetů

Střední průměr permanentních magnetů D bude vypočítán podle vztahu (2.21).

$$D = 0,5 \cdot (D_{out} + D_{in}) \quad (2.21)$$

Dále bude vypočítána střední pólová rozteč podle vztahu (2.22).

$$\tau = \pi \cdot \frac{D}{2 \cdot p} \quad (2.22)$$

Šířka cívky ve spodním průměru w_w se určí podle vztahu (2.23).

$$w_w = \frac{\pi \cdot D_{in}}{s_1} \quad (2.23)$$

Výpočet hodnoty počtu závitů na pól a fázi bude proveden podle rovnice (2.24).

$$N_c = a_w \cdot N_{ct} \quad (2.24)$$

kde a_w je počet paralelních drátů v jednom vodiči.

Maximální hodnota faktoru výplně cívky na D_{in} bude vypočítána podle rovnice (2.25)

$$k_{fmax} = \frac{d_w^2 \cdot N_c}{t_w \cdot w_w} \quad (2.25)$$

kde d_w je průměr holého vodiče.

Dále bude vypočítána hustota proudu statorového vinutí podle rovnice (2.26).

$$j_a = \frac{I_a}{a_w \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4}} \quad (2.26)$$

Ještě je třeba vypočítat hmotnost rotorové dvojice a hmotnost hřídele.

Výpočet hmotnosti rotorové dvojice se provede rozdělením na dva výpočty. Nejprve se podle vzorce (2.27) vypočítá hmotnost permanentních magnetů a poté se podle vzorce (2.28) provede výpočet hmotnosti rotorových disků.

$$m_r = 2 \cdot \rho_{PM} \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{D_{out}}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{D_{inPM}}{2} \right)^2 \right) \cdot h_M \quad (2.27)$$

$$m_{RD} = 2 \cdot \rho_{Fe} \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{D_{out}}{2} \right)^2 - \pi \cdot R_{sh}^2 \right) \cdot h_r \quad (2.28)$$

Kde D_{out} je vnější průměr, D_{inPM} je vnitřní průměr permanentních magnetů, h_M je šířka permanentních magnetů, ρ_{PM} je hustota permanentních magnetů, ρ_{Fe} je hustota železa, R_{sh} je vnitřní poloměr rotorového disku a h_r je šířka rotorového disku.

Jestli-že jsou známy hmotnosti permanentních magnetů, i hmotnosti rotorových disků, tak tyto dvě hmotnosti se podle vzorce (2.29) jednoduše sečtou a získá se výsledná hmotnost dvojitého rotoru m_r .

$$m_r = m_{PM} + m_{RD} \quad (2.29)$$

Ještě zbývá vypočítat hmotnost hřídele. Tato hmotnost bude vypočítána podle vzorce (2.30).

$$m_{sh} = \rho_{Fe} \cdot (\pi \cdot R_{sh}^2) \cdot h_H \quad (2.30)$$

Kde h_H je délka hřídele.

A podle vzorce (2.31) bude vypočítaná hmotnost statorových vodičů stoje.

$$m_{con} = \rho \cdot m_1 \cdot a_w \cdot N_1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_w^2}{4} \right) \cdot (2 \cdot L_i) \quad (2.31)$$

2.2.3 Výpočet náhradních parametrů stroje

Ve druhé části výpočtu budou vypočítány náhradní parametry stroje

Jako první bude vypočítaná délka cívkové strany podle vztahu (2.32).

$$L_i = 0,5 \cdot (D_{out} - D_{in}) \quad (2.32)$$

V tomto výpočtu, bude uvažováno, že délka strany permanentního magnetu l_M je stejná jako délka cívkové strany L_i . Proto platí rovnice (2.33).

$$l_M = L_i \quad (2.33)$$

Dále může být vypočítáno čelo cívky vnitřního průměru l_{lemin} podle rovnice (2.34) a čelo cívky vnějšího průměru l_{lemax} podle rovnice (2.35).

$$l_{lemin} = \beta \cdot \frac{\pi \cdot D_{in}}{2 \cdot p} \quad (2.34)$$

$$l_{lemax} = \beta \cdot \frac{\pi \cdot D_{out}}{2 \cdot p} \quad (2.35)$$

Z vypočítaných hodnot v rovnicích (2.32),(2.34) a (2.35) bude vypočítána celková délka vodiče v cívice podle rovnice (2.36).

$$l_{lav} = 2 \cdot L_i + l_{lemin} + l_{lemax} + 4 \cdot 0,015 \quad (2.36)$$

Při znalosti celkové délky vodiče může být vypočítán jeho celkový odpor podle rovnice (2.37).

$$R_1 = \frac{N_1 \cdot l_{lav}}{\sigma \cdot a_w \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4}} \quad (2.37)$$

kde d_w je průměr holého vodiče, a_w je počet paralelních drátů v jednom vodiči a σ je elektrická vodivost při příslušné teplotě.

Podle rovnice (2.38) může být vypočítán koeficient pro část rozptylu způsobený rozptylovou magnetickou vodivostí čel vinutí λ_{le} .

$$\lambda_{le} = 0,3 \cdot q_1 \quad (2.38)$$

Pro část rozptylu způsobenou rozptylem okolo radiální části vodiče λ_{ls} je možné uvažovat stejnou hodnotu, jako pro λ_{le} .

$$\lambda_{ls} = \lambda_{le} \quad (2.39)$$

Podle rovnice (2.40) lze vypočítat činitel statorového diferenčního rozptylu τ_{dl} .

$$\tau_{dl} = \frac{\pi^2 \cdot (10 \cdot q_1^2 + 2)}{27} \cdot \left(\sin \left(\frac{30}{q_1} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right)^2 - 1 \quad (2.40)$$

Část rozptylu způsobenou diferenčním rozptylovým tokem lze vypočítat podle vztahu (2.41).

$$\lambda_{ld} = \frac{m_1 \cdot q_1 \cdot \tau \cdot k_{w1}^2}{\pi^2 \cdot (2 \cdot g + t_w) \cdot k_{sat}} \cdot \tau_{dl} \quad (2.41)$$

Podle rovnice (2.42) je možné dále vypočítat celkovou rozptylovou reaktanci X_l .

$$X_1 = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{L_i \cdot N_1^2}{p \cdot q_1} \cdot \left(\lambda_{ls} + \frac{l_{lemin}}{L_i} \cdot \frac{\lambda_{le}}{2} + \frac{l_{lemax}}{L_i} \cdot \frac{\lambda_{le}}{2} + \lambda_{ld} \right) \quad (2.42)$$

Pro výpočet vlastních reaktancí je třeba nejprve vypočítat velikosti ekvivalentních vzduchových mezer v d ose a q ose.

Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v d ose lze vypočítat podle vztahu (2.43).

$$g_{eq} = 2 \cdot \left[(g + 0,5 \cdot t_w) \cdot k_{sat} + \frac{h_M}{\mu_{rrec}} \right] \quad (2.43)$$

Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v q ose lze vypočítat podle vztahu (2.44).

$$g_{eqq} = 2 \cdot [(g + 0,5 \cdot t_w) + h_M] \quad (2.44)$$

Dále určíme hodnotu poměru první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v d ose k_{fd} a hodnotu poměru první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v q ose k_{fq} . Pro obě hodnoty můžeme podle [8] v případě povrchové montáže magnetů uvažovat hodnotu 1.

$$k_{fd} = k_{fq} = 1 \quad (2.45)$$

Ze známých hodnot může být vypočítána podle rovnice (2.46) vlastní reaktance X_{ad} .

$$X_{ad} = 2 \cdot m_1 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \right)^2 \cdot \frac{(0,5 \cdot D_{out})^2 - (0,5 \cdot D_{in})^2}{g_{eq}} \cdot k_{fd} \quad (2.46)$$

a vlastní reaktance X_{aq} podle rovnice (2.47).

$$X_{aq} = 2 \cdot m_1 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \right)^2 \cdot \frac{(0,5 \cdot D_{out})^2 - (0,5 \cdot D_{in})^2}{g_{eq}} \cdot k_{fd} \quad (2.47)$$

Celková reaktance v ose d se tedy vypočítá podle vztahu (2.48) a celková reaktance v ose q se vypočítá podle vztahu (2.49).

$$X_{sd} = X_1 + X_{ad} \quad (2.48)$$

$$X_{sq} = X_1 + X_{aq} \quad (2.49)$$

2.2.4 Výpočet ztrát

Další část výpočtu se zabývá výpočtem ztrát ve stroji.

Ztráty ve statorovém vinutí (Joulovy ztráty) lze vypočítat podle vztahu (2.50).

$$\Delta P_{1w} = m_1 \cdot I_a^2 \cdot R_1 \quad (2.50)$$

Dále je možné ze vzorce (2.51) určit ztráty vířivými proudy ve vodičích.

$$\Delta P_e = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{\sigma}{\rho} \cdot f^2 \cdot d_w^2 \cdot m_{con} \cdot B_{mg}^2 \cdot \eta_d^2 \quad (2.51)$$

Kde σ je elektrická vodivost vodiče a η_d je koeficient zkreslení magnetické indukce.

Jako další ztráty mohou být vypočítány ztráty třením v ložiscích. Obecný výpočet těchto ztrát je uveden v rovnici (2.52).

$$\Delta P_{fr} = 0,06 \cdot k_{fb} \cdot (m_r + m_{sh}) \cdot n \quad (2.52)$$

kde m_r je hmotnost dvojitého rotoru, m_{sh} je hmotnost hřídele a n jsou otáčky za sekundu.

Z důvodu zjednodušeného výpočtu stroje byly zanedbány ventilační ztráty a mechanické ztráty ΔP_{rot} se tak rovnají pouze ztrátám vzniklým třením ložisek ΔP_{fr} . (2.53)

$$\Delta P_{rot} = \Delta P_{fr} \quad (2.53)$$

2.2.5 Vypočítané výsledky

Vypočítané výsledky byly přehledně uspořádány do tabulky Tab. 2.3

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Počet závitů na fázi u jedné vrstvy vinutí	n_c	6	-
Počet závitů na pól a fázi	N_{ct}	50	-
Počet stran cívky na pól a fázi	q_1	2	-
Šířka Vzduchové mezery	g	$0,75 \cdot 10^{-3}$	m
Pólová rozteč	τ_c	6	-
Otáčky	n	50	$\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}$
Frekvence statorového proudu	f	150	Hz
Remanentní indukce	B_r	1,35	T
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	B_{mg}	0,636	T
Magnetický tok	ϕ_f	$104 \cdot 10^{-6}$	Wb
Činitel rozloženého vinutí	k_{dl}	0,965	-
Činitel kroku vinutí	k_{pl}	0,965	-
Podíl cívkové rozteči k pólové rozteči	β	0,833	-
Koeficient vinutí	k_{w1}	0,933	-
Indukované napětí	U_{if}	19,481	V
Napěťová konstanta	k_E	0,389	$\text{V} \cdot (\text{ot} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$
Konstanta točivého momentu	k_M	0,186	$\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1}$
Elektromagnetický moment	M	0,091	Nm
Elektromagnetický výkon	P_{elm}	28,688	W
Vnitřní průměr permanentních magnetů	D_{in}	0,030	m
Střední průměr permanentních magnetů	D	0,0410	m
Střední pólová rozteč	τ	0,0214	m
Šířka cívky ve spodním průměru	w_w	$2,618 \cdot 10^{-3}$	m

Počet závitů na pól a fázi	N_c	50	-
Maximální hodnota faktoru výplně cívky na D_{in}	k_{fmax}	0,793	m
Hustota proudu statorového vinutí	j_a	$249,9 \cdot 10^3$	$A \cdot m^2$
Hmotnost rotoru	m_r	0,184	kg
Hmotnost hřídele	m_{sh}	$4,772 \cdot 10^{-3}$	kg
Hmotnost statorových vodičů	m_{con}	$34,2 \cdot 10^{-3}$	kg

Tab. 2.3 Vypočítané obecné parametry axiálního stroje

Po vypočítání obecných hodnot stroje mohlo být přikročeno k výpočtu náhradních parametrů stroje. Vypočítané hodnoty náhradních parametrů stroje jsou zaznamenány v tabulce Tab. 2.4.

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Délka cívkové strany	L_i	$10,99 \cdot 10^{-3}$	m
Délka strany permanentního magnetu	l_M	$10,99 \cdot 10^{-3}$	m
Čelo cívky vnitřního průměru	l_{lemin}	$13,09 \cdot 10^{-3}$	m
Čelo cívky vnějšího průměru	l_{lemax}	$22,68 \cdot 10^{-3}$	m
Celková délka vodiče v cívce	l_{lav}	0,117	m
Odpor	R_1	3,828	Ω
koeficient pro část rozptylu způsobený rozptylovou magnetickou vodivostí čel vinutí	λ_{le}	0,6	-
koeficient pro část rozptylu způsobený rozptylem okolo radiální části vodiče	λ_{ls}	0,6	-
činitel statorového diferenčního rozptylu	τ_{dl}	$28,43 \cdot 10^{-3}$	-
Část rozptylu způsobená diferenčním rozptylovým tokem	λ_{ld}	$35,8 \cdot 10^{-3}$	-
Rozptylová reaktance	X_1	0,629	Ω
Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v d ose	g_{eq}	$18,59 \cdot 10^{-3}$	m
Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v q ose	g_{eqq}	$17,5 \cdot 10^{-3}$	m
poměr první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v d ose	K_{fd}	1	-
poměr první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v q ose	k_{fq}	1	-
Vlastní reaktance v ose d	X_{ad}	0,238	Ω
Vlastní reaktance v ose q	X_{aq}	0,253	Ω

Celková reaktance v ose d	X_{sd}	0,868	Ω
Celková reaktance v ose q	X_{sq}	0,883	Ω

Tab. 2.4 Vypočítané hodnoty náhradních parametrů stroje

Dále byla vytvořena tabulka s vypočítanými ztrátami stroje. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.5.

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Ztráty ve statorovém vinutí (Joulovy ztráty)	ΔP_{1w}	2,767	W
Ztráty vířivými proudy ve vodičích	ΔP_e	1,618	W
Ztráty třením v ložiscích	ΔP_{fr}	0,853	W
Mechanické ztráty	ΔP_{rot}	0,853	W

Tab. 2.5 Tabulka vypočítaných ztrát stroje

2.2.6 Výpočet vlastností motoru

Na základě předchozích výpočtů může být proveden výpočet vlastností stroje, v případě, kdy by byl počítaný stroj použit jako motor.

Výkon motoru může být tedy vypočítán podle rovnice (2.54).

$$P_{out} = P_{elm} - \Delta P_{rot} \quad (2.54)$$

kde P_{elm} je elektromagnetický výkon a ΔP_{rot} jsou mechanické ztráty.

Příkon motoru lze vypočítat podle vztahu (2.55).

$$P_{in} = P_{elm} + \Delta P_{1w} + \Delta P_e \quad (2.55)$$

kde ΔP_{1w} jsou ztráty ve statorovém vinutí a ΔP_e jsou ztráty vířivými proudy.

Je-li znám příkon a výstupní výkon motoru, je možné vypočítat celkovou účinnost motoru. Účinnost motoru se vypočítá podle rovnice (2.56).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.56)$$

Točivý moment motoru se vypočítá podle rovnice (2.57).

$$M_{sh} = \frac{P_{out}}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (2.57)$$

kde n jsou otáčky za sekundu.

Vstupní fázové napětí stroje lze vypočítat ze vztahu (2.58).

$$V_1 = \sqrt{(U_{if} + I_a \cdot R_1)^2 + (I_a \cdot X_{sq})^2} \quad (2.58)$$

Kde U_{if} je indukovaného efektivní fázové napětí, I_a je satorový proud, R_1 je odpor vodiče a X_{sq} je celková reaktance v ose q.

Vstupní sdružené napětí bude tedy vypočítané podle vztahu (2.59).

$$V_{1L} = \sqrt{3} \cdot V_1 \quad (2.59)$$

Nakonec bude ještě podle rovnice (2.60) vypočítán účinník motoru.

$$\cos \phi = \frac{U_{if} + I_a \cdot R_1}{V_1} \quad (2.60)$$

Vypočítané výsledky byly opět přehledně uspořádány do Tab. 2.6

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Příkon motoru	P_{in}	33,075	W
Výkon motoru	P_{out}	27,835	W
Účinnost motoru	η	84,15	%
Točivý moment motoru	M_{sh}	$88,6 \cdot 10^{-3}$	Nm
Vstupní fázové napětí	V_1	21,36	V
Vstupní sdružené napětí	V_{1L}	37,00	V
Účinník motoru	$\cos \phi$	0,9997	-

Tab. 2.6 Vypočítané celkové vlastnosti motoru

2.2.7 Výpočet indukovaného napětí generátoru

Protože se s vyrobeným strojem, bude dále pracovat jako s generátorem, byly vypočítány teoretické hodnoty indukovaného napětí pro tři různé hodnoty otáček.

Výpočet indukovaného efektivního fázového napětí proběhl podle rovnice (2.61).

$$U_{if} = k_E \cdot n \quad (2.61)$$

kde k_E je napěťová konstanta a n jsou otáčky za sekundu.

Efektivní hodnota indukovaného fázového napětí byla přepočítána na hodnotu sdruženou podle rovnice (2.62).

$$U_{is} = \sqrt{3} \cdot U_{if} \quad (2.62)$$

Tyto vypočítaná napětí byla zapsána do tabulky Tab. 2.7

Otáčky[ot·min ⁻¹]	Indukované fázové efektivní napětí	Indukované sdružené efektivní napětí
430	2,792 V	4,835 V
586	3,805 V	6,590 V
730	4,740 V	8,209 V

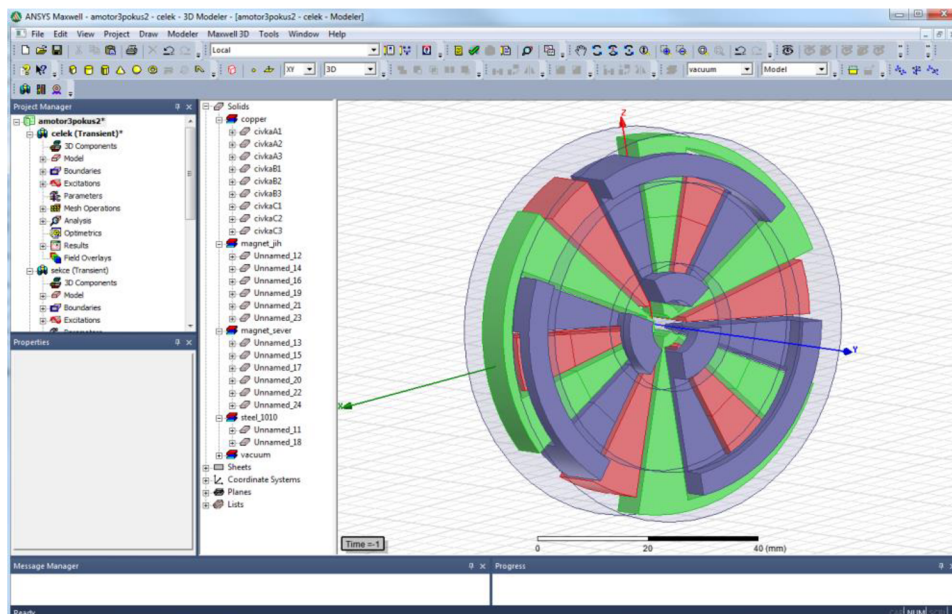
Tab. 2.7 Vypočítaná indukovaná napětí pro různé otáčky

3 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ STROJE V PROGRAMU ANSYS MAXWELL

Ansyes je program který pracuje na principu využití metody konečných prvků (FEM). Základem pro řešení analýzy metodou konečných prvků, je jak už název napovídá, prvek konečných rozměrů. Řešená oblast se rozdělí na konečný počet podoblastí, tedy prvků, přičemž pro každý typ prvku je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Poté jsou parametry řešení hledány v uzlech vzniklé sítě. Kvalita výsledku je tedy zásadně ovlivněna hustotou a topologií prvků sítě. Faktickým omezením je tedy pouze kapacita dostupného hardwaru a časové nároky na výpočet. Výsledky se ovšem vztahují jen ke konkrétně zadanému případu, jakékoli úpravy, optimalizace apod. vyžadují opakování celého náročného procesu řešení. V našem případě byl použit program Ansys Maxwell (dále jen Maxwell), který je určen k simulaci elektromagnetických polí.[10]

Charakteristika programu Ansys Maxwell podle [10]:

- Simulace stacionárních a kvazistacionárních elektromagnetických polí v časové i frekvenční oblasti
- Automatická tvorba sítě s adaptivním zjemněním v kritických místech
- Jednoduchá simulace rotačního a translačního pohybu těles v elektromagnetickém poli, podpora simulace elektrických strojů a pohonů
- Pokročilé magnetické materiálové modely
- Různé možnosti zohlednění elektromagnetických ztrát na základě dostupných materiálových dat (BP charakteristiky)
- Rozsáhlá knihovna elektromagnetických a magnetických materiálů
- Jednoduchá parametrizace modelů, optimalizační a statistické výpočty, možnosti využití více procesorů při optimalizaci i jednotlivých simulacích

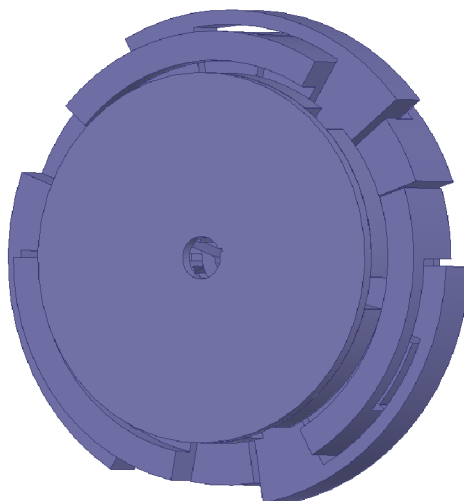


Obr. 3.1 Ukázka pracovního okna v programu Ansys Maxwell

Aby bylo možné v programu Ansys Maxwell simulovat vlastnosti axiálního stroje, bylo nejprve třeba vytvořit model tohoto stroje.

Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor (dále jen Inventor).

Inventor je CAD software, který slouží k vytváření 3D modelů. Výsledný model je zobrazen na obrázku Obr. 3.2.

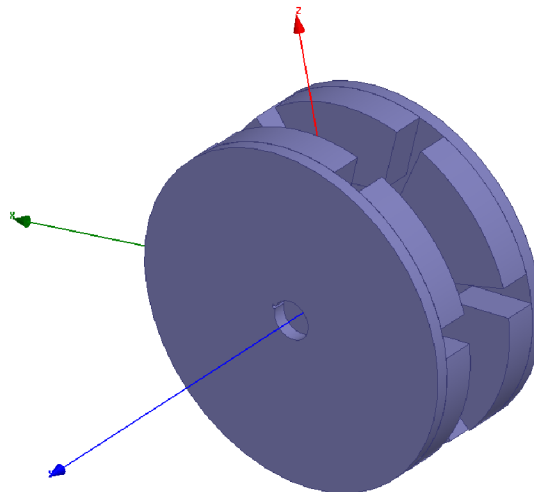


Obr. 3.2 Model axiálního stroje vytvořený v programu Inventor

Model vytvořený v Inventoru byl následně exportován do programu Maxwell, kdy byly jednotlivým částem nadefinovány vlastnosti materiálu. Cívky byly zvoleny z mědi, čemuž v materiálové knihovně odpovídá materiál označený jako „copper“. Pro rotorové disky byl použit materiál z knihovny materiálů označený jako „steel_1010“. Pro magnety byl vybrány magnety „NdFe30“. Polarizace magnetů byla zvolena tak, aby se protilehlé magnety navzájem přitahovaly.

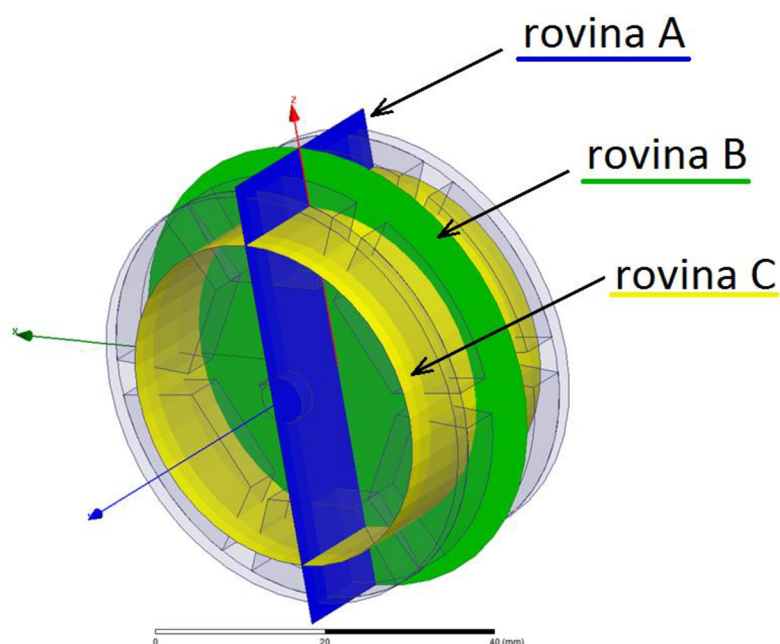
3.1 Výpočet rozložení intenzity magnetického pole

Pro provedení simulace rozložení magnetického pole ve stroji byly z modelu vybrány pouze rotorové disky s magnety, mezi kterými se nachází vzduchová mezera, protože při simulaci magnetického pole mohlo být satorové vinutí nacházející se mezi rotory vzhledem k permeabilitě mědi zanedbáno.



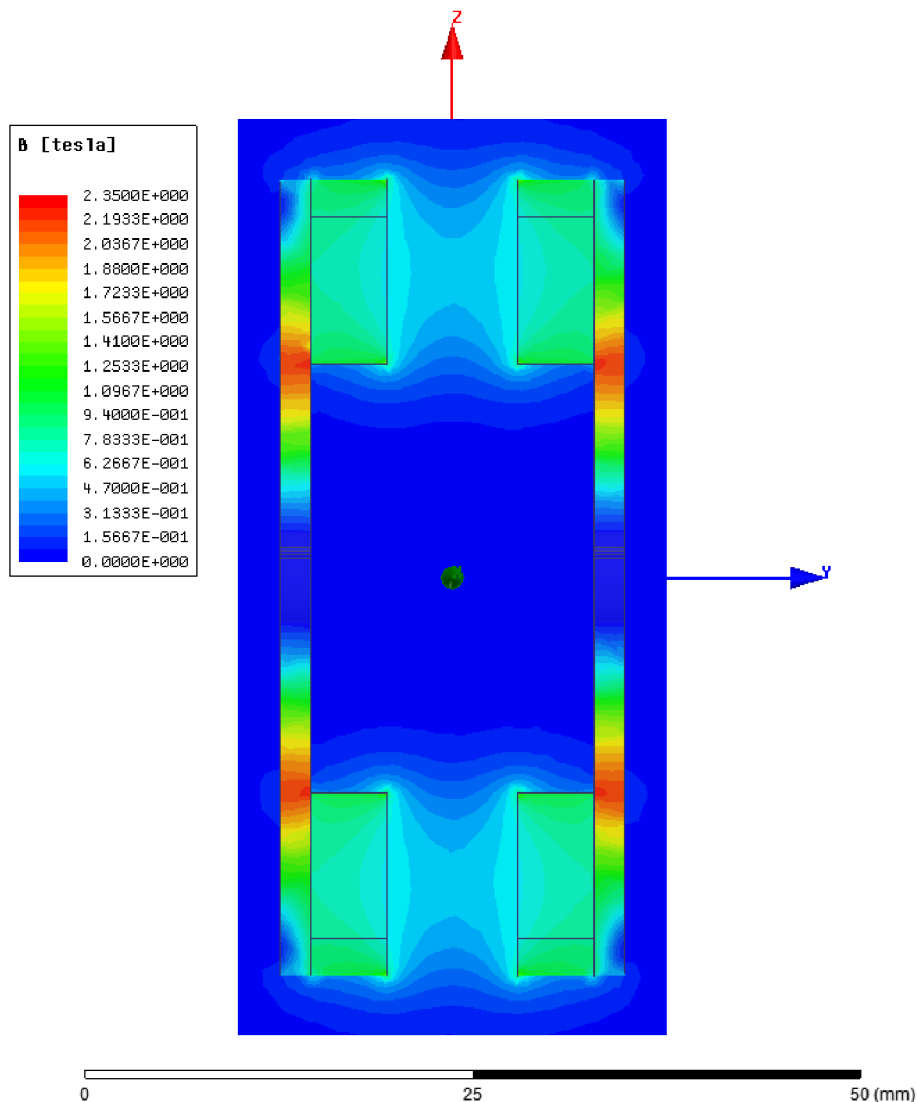
Obr. 3.3 model pro simulaci rozložení magnetického pole bez satorových cívek

Pro zobrazení rozložení velikosti magnetické indukce byly zvoleny tři základní roviny, které jsou zobrazeny na obrázku Obr. 3.4. Rovina A je rovina procházející středem permanentního magnetu. Rovina B je rovina procházející středem vzduchové mezery a rovina C je rovina procházející středem poloměru magnetu.



Obr. 3.4 Základní roviny pro zobrazení rozložení magnetického pole

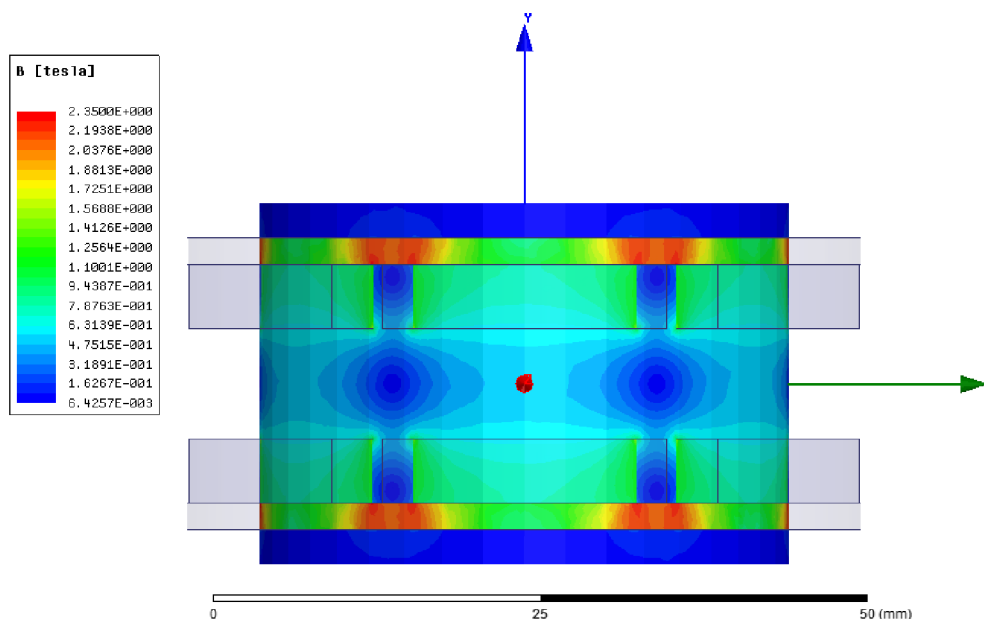
Jako první bylo zobrazeno rozložení magnetické indukce v rovině A, tedy na rovině procházející středem magnetů. Toto rozložení magnetické indukce v rovině A je zobrazeno na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Zobrazení rozložení magnetické indukce v rovině A procházející středem permanentního magnetu

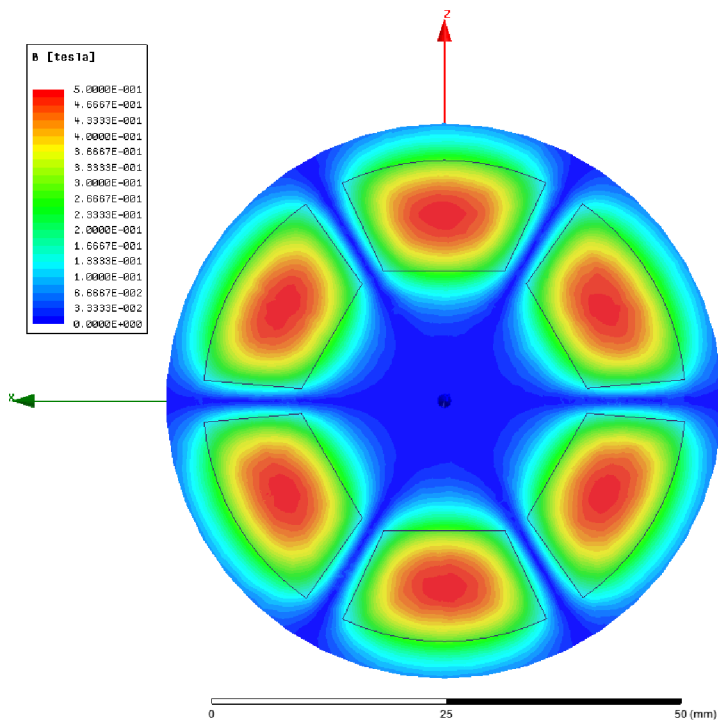
Z Obr. 3.5 je zřejmé, že největší magnetická indukce působící ve vzduchové mezeře je na povrchu obou protilehlých magnetů a směrem ke středu vzduchové mezery velikost magnetické indukce klesá.

Toto rozložení lze pozorovat i na zobrazení průběhu magnetické indukce na rovině C (Obr. 3.6), která prochází středem poloměru magnetu. I zde je patrné, že magnetická indukce se směrem od magnetu do středu vzduchové mezery zmenšuje. Dále je na obrázku patrné, že nejmenší magnetická indukce je právě ve středu vzduchové mezery v místech mezer mezi magnety.



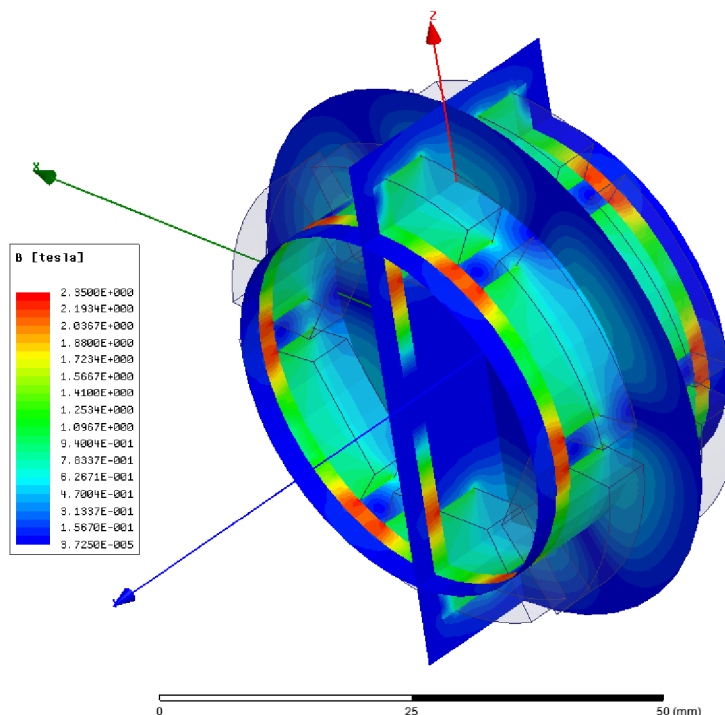
Obr. 3.6 Zobrazení rozložení magnetické indukce v rovině C procházející středem poloměru magnetu

Jako poslední bylo zobrazeno rozložení magnetické indukce v rovině B (Obr. 3.7), tedy v rovině procházející středem vzduchové mezery. Z obrázku je zřejmé, že největší magnetická indukce je ve středu vzduchové mezery právě v úrovni středu magnetů.



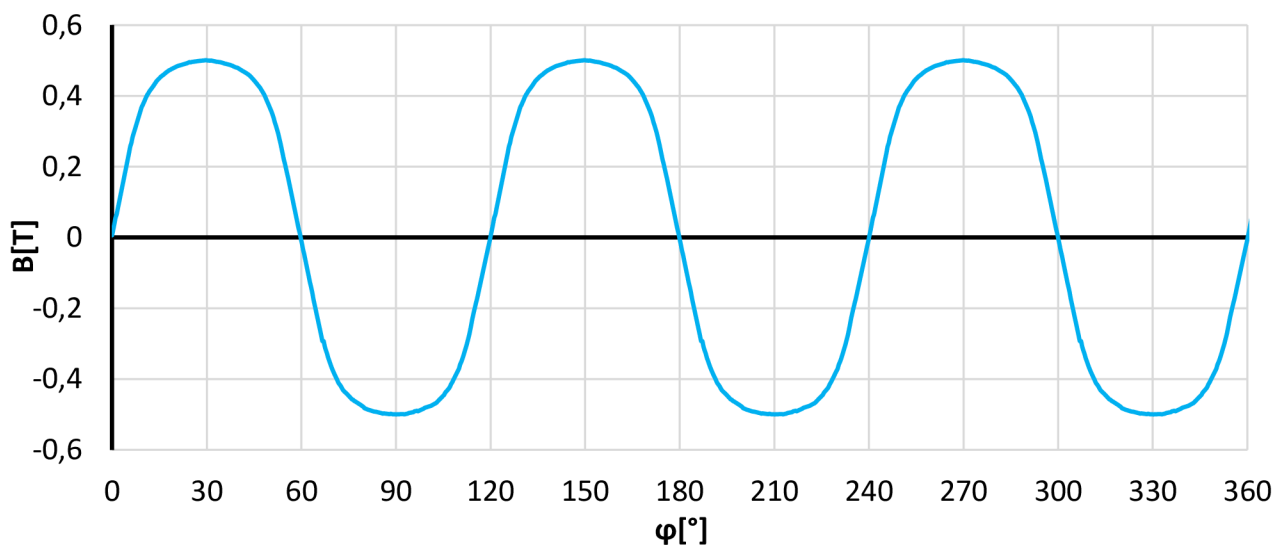
Obr. 3.7 zobrazení rozložení magnetické indukce v rovině B procházející středem vzduchové mezery

Pro lepší představu rozložení magnetické indukce jsou na Obr. 3.8 znázorněny jednotlivé roviny s rozložením magnetického pole tak, jak jsou navzájem vůči sobě umístěny v modelu stroje.



Obr. 3.8 Celkové rozložení magnetické indukce ve všech třech rovinách

Jako další bylo třeba zjistit průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře (ve vinutí). Pro tento účel byla vytvořena kružnice umístěná uprostřed vzduchové mezery ve výšce poloviny permanentních magnetů. Na této křivce byl nasimulován průběh magnetické indukce, který je zobrazen na Obr. 3.9.

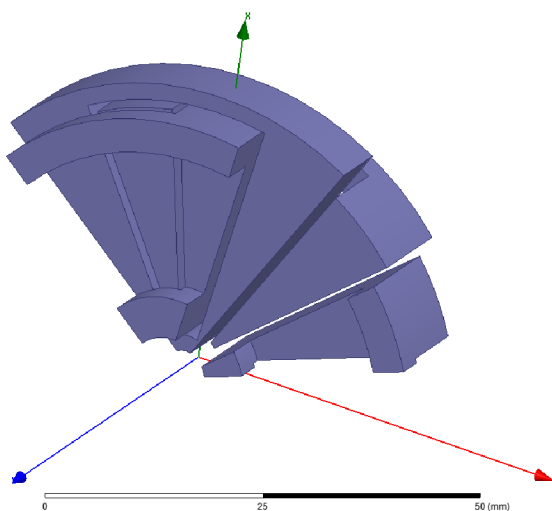


Obr. 3.9 Nasimulovaný průběh magnetické indukce ve vinutí stroje

Z Obr. 3.9 je zřejmé, že nevyšších hodnot magnetická indukce nabývá v úrovni středu magnetu. Nevyšší naměřená hodnota magnetické indukce je 0,5 T.

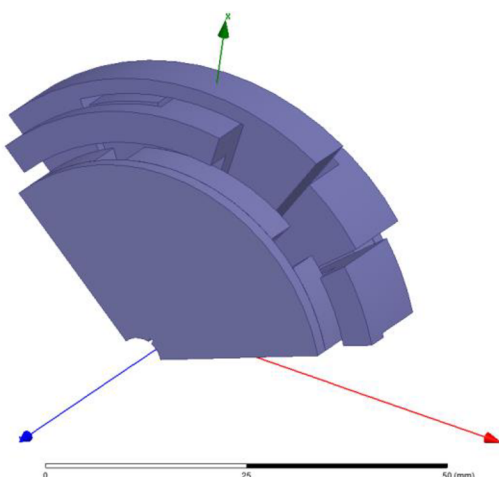
3.2 Výpočet indukovaného napětí

Protože se se strojem pracuje jako s generátorem, bylo dále třeba přikročit k simulaci indukovaného napětí pomocí transientní analýzy v programu Maxwell. Protože je stroj symetrický, byl proto rozdělen na tři symetrické části, přičemž dále bude pracováno pouze s jednou třetinou stroje. K tomuto kroku bylo přistoupeno kvůli urychlení výpočtů simulací. Do modelu stroje bylo dále umístěno vinutí statoru, které je znázorněno na Obr. 3.10. Statorové vinutí se skládá ze tří cívek, které byly označeny jako U, V a W, přičemž dvě cívky mají stejnou konstrukci (fáze U a W) s ohnutými čely vinutí a jedna cívka (fáze V) má čelo rovné a vysunutě nad zbývající cívky. Tato konstrukce byla zvolena, aby bylo možné propojit obě cívkové strany stejné fáze a zároveň nedošlo ke kolizi cívek navzájem.



Obr. 3.10 Model statorového vinutí

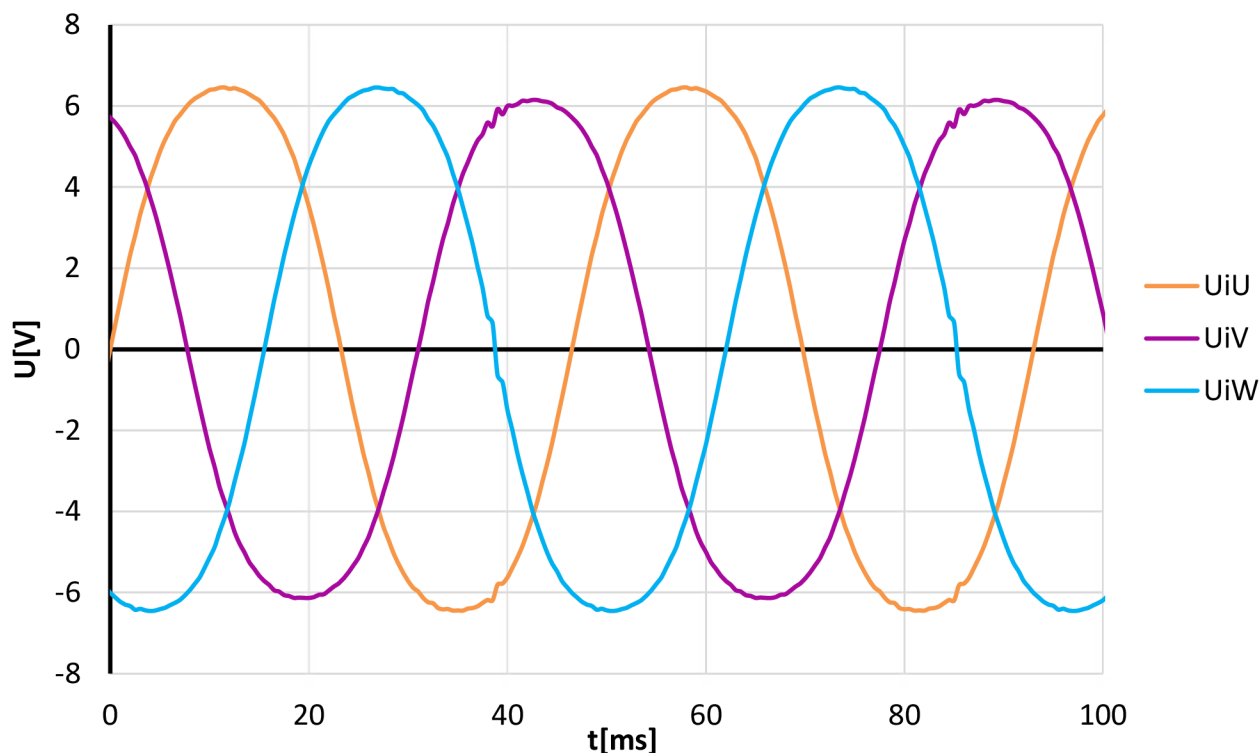
Na Obr. 3.11 je znázorněna konstrukce modelu pro transientní analýzu. V modelu je znázorněna vzájemná poloha cívek (statoru) a rotoru, přičemž mezi magnety rotoru a cívkami je v každém směru dostatečná mezera. Vzduchová mezera mezi vnitřní stranou magnetu a cívkou má na obou stranách stroje vzdálenost 0,75mm.



Obr. 3.11 Zobrazení celkové konstrukce modelu pro transientní analýzu

Hodnoty indukovaného sdruženého napětí byly simulovány pro tři různé hodnoty otáček a to pro otáčky 430 ot.min^{-1} , 586 ot.min^{-1} a 730 ot.min^{-1} , tedy pro otáčky pro které bylo počítáno indukované napětí již v analytickém výpočtu, aby bylo výsledky možné porovnat.

Průběh indukovaného sdruženého napětí pro otáčky 430 ot.min^{-1} vypočítaný Maxwellem je zobrazen na Obr. 3.12.



Obr. 3.12 průběh indukovaného napětí pro 430 ot.min^{-1}

Z grafu je zřejmé, že amplituda fáze V má nižší hodnotu indukovaného napětí oproti zbylým fázím. To je způsobeno tvarem cívky fáze V, z důvodu vyššího čela, než u fáze U a W.

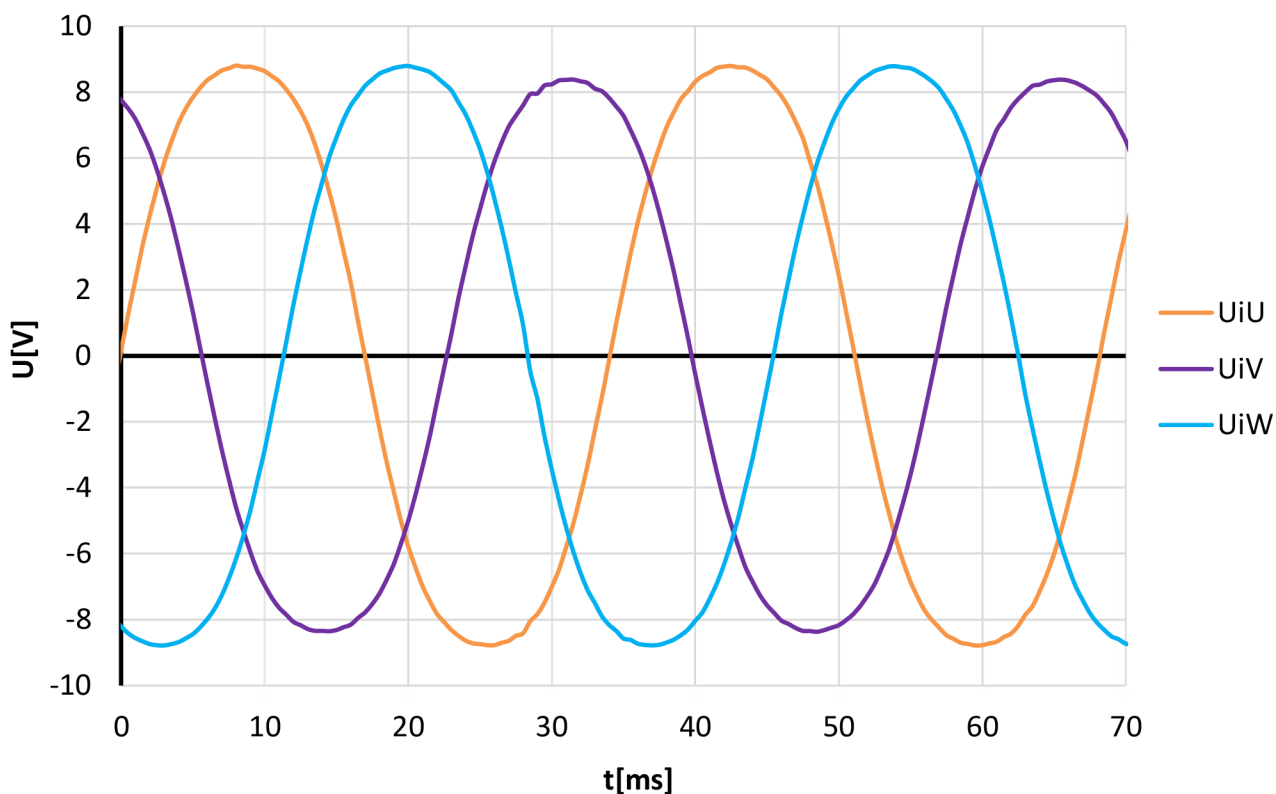
Na grafu je také možné si povšimnout, že v čase okolo 40ms a okolo 90ms dochází na všech třech fázích k určitému „narušení“ průběhu. Tato porucha může mít několik příčin, ale pravděpodobně byla způsobena meshováním při analýze.

Z nasimulovaných hodnot byly odečteny maximální hodnoty napětí a také vypočítány jejich efektivní hodnoty. Tyto naměřené a vypočtené údaje byly zaneseny do Tab. 3.1.

fáze	Maximální hodnota napětí	Efektivní hodnota napětí
U	6,46 V	4,93 V
V	6,14 V	4,71 V
W	6,45 V	4,95 V

Tab. 3.1 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 430 ot.min^{-1}

Jako druhé bylo nasimulováno indukované napětí při 586 ot.min^{-1} . Průběh tohoto nasimulovaného napětí je zobrazen na Obr. 3.13.



Obr. 3.13 průběh indukovaného napětí pro 586 ot.min^{-1}

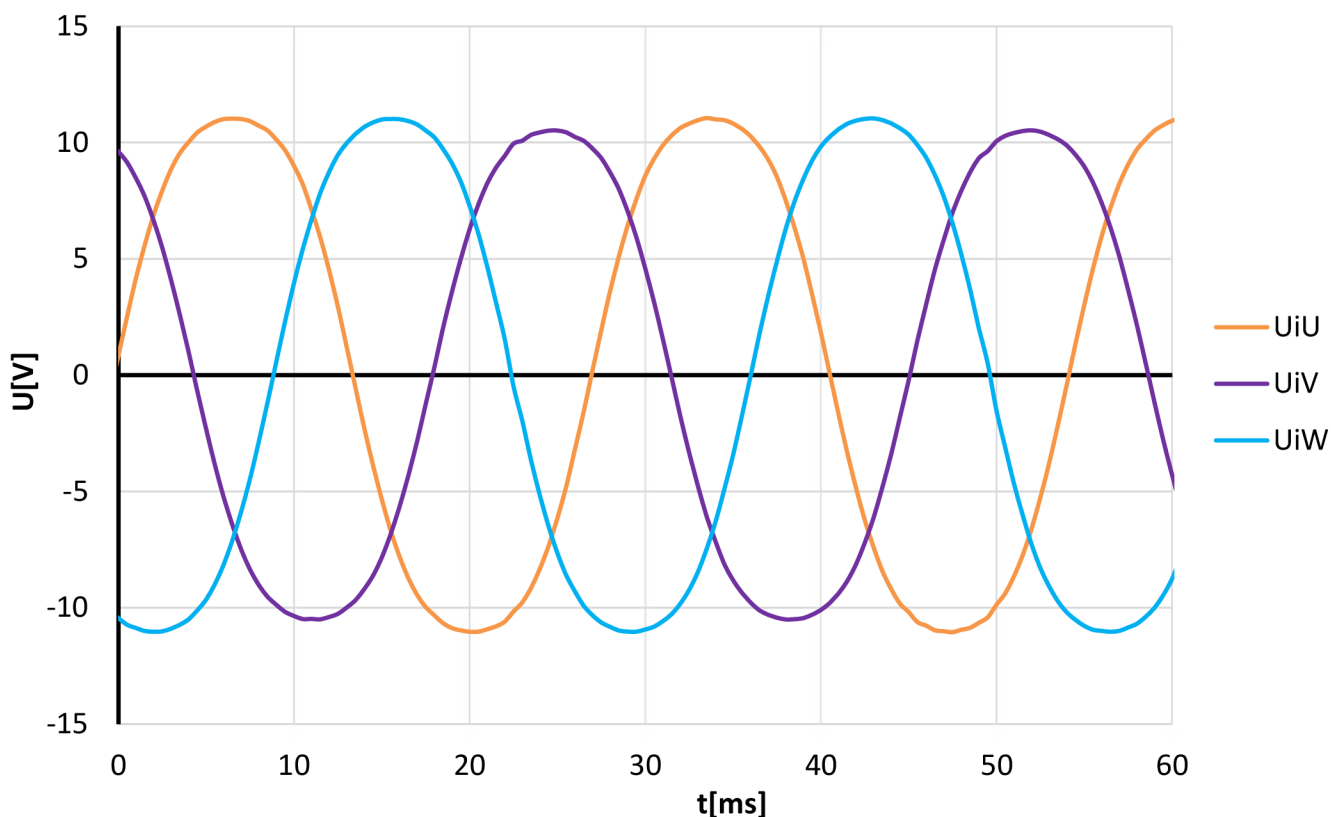
I na tomto průběhu je patrné na fázi V je kvůli jinému tvaru cívky nižší indukované napětí.

Z nasimulovaných hodnot byly opět odečteny maximální hodnoty napětí a také vypočítány jejich efektivní hodnoty. Tyto naměřené a vypočtené údaje byly zaneseny do Tab. 3.2.

fáze	Maximální hodnota napětí	Efektivní hodnota napětí
U	8,80 V	6,70 V
V	8,83 V	6,41 V
W	8,79 V	6,74 V

Tab. 3.2 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min^{-1}

Jako poslední byl nasimulován průběh indukovaného napětí při 730 ot.min^{-1} . průběh nasimulovaného napětí je zobrazen na Obr. 3.14.



Obr. 3.14 průběh indukovaného napětí pro 730 ot.min^{-1}

Hodnoty maximálního napětí jednotlivých fází a jejich efektivní hodnoty byly zapsány do Tab. 3.3.

fáze	Maximální hodnota napětí	Efektivní hodnota napětí
U	11,05 V	8,45 V
V	10,53 V	8,05 V
W	11,04 V	8,46 V

Tab. 3.3 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min^{-1}

4 MĚŘENÍ

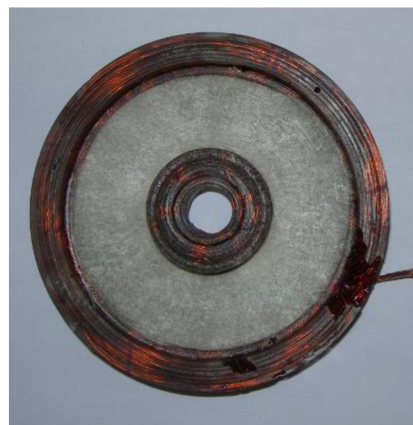
4.1 měření indukovaného napětí

Poslední částí práce bylo ověření vypočítaných a nasimulovaných hodnot měřením.

Pro toto měření byl použit axiální stroj stejných fyzických rozměrů, které byly uvažovány v předešlých částech práce. Stroj se skládal ze dvou rotorových disků osazených permanentními magnety a ze dvou statorových částí skládajících se z cívkových vinutí zalitých v epoxidové pryskyřici. Části použitého stroje jsou zobrazeny na obrázku Obr. 4.1 a Obr. 4.2.

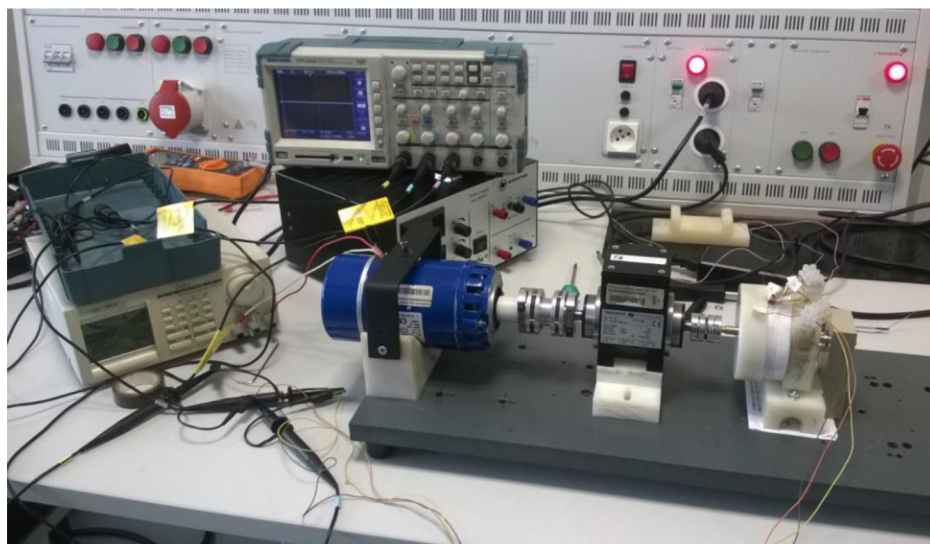


Obr. 4.1 vnitřní strana statorového vinutí stroje



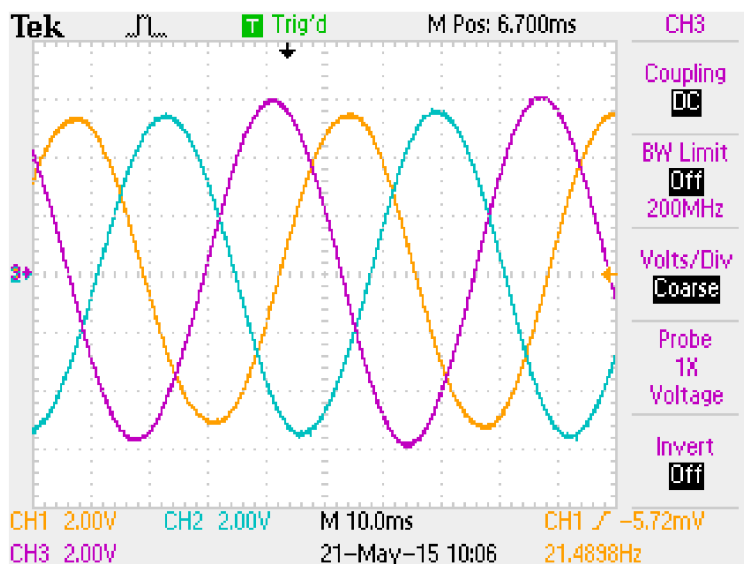
Obr. 4.2 vnější strana statorového vinutí stroje

Celý stroj byl sestaven a umístěn do držáku, který umožnil jeho uchycení na pracovní desku. Na desce byl také umístěn stejnosměrný cize buzený motor, který přes hřídel roztáčí měřený generátor. Jedny konce vinutí generátoru byly spojeny do hvězdy a druhé konce byly vyvedeny na sondy osciloskopu, pomocí kterého bylo měřeno sružené indukované napětí na generátoru. Celková sestava měřicího pracoviště je zobrazena na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 měřicí pracoviště

Jako první bylo měřeno indukované napětí při rychlosti otáčení 430 ot.min⁻¹. Průběh indukovaného napětí naměřeného při těchto otáčkách je zobrazen na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Naměřené průběhy indukovaného napětí při 430 ot.min⁻¹.

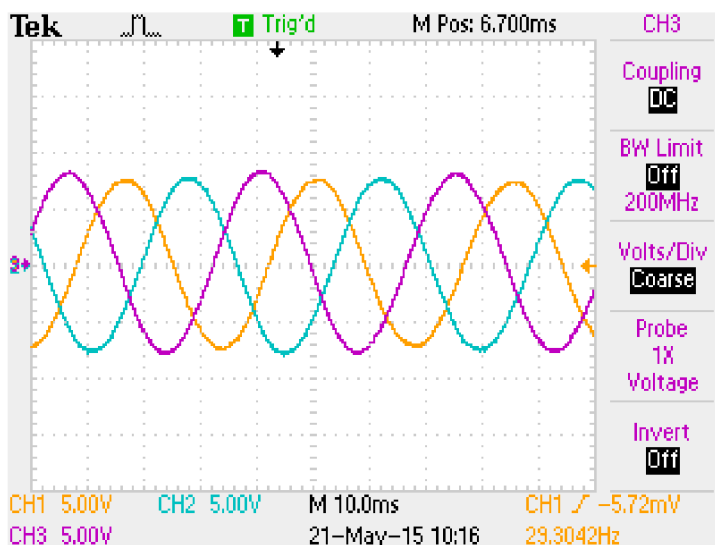
Z nasimulovaných hodnot byly odečteny maximální hodnoty napětí a také vypočítány efektivní hodnoty jednotlivých napětí. Tyto naměřené a vypočtené údaje byly zaneseny do Tab. 4.1.

fáze	Maximální hodnota napětí	Efektivní hodnota napětí
U	5,52 V	3,77 V
V	5,68 V	3,87 V
W	6,00 V	4,12 V

Tab. 4.1 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 430 ot.min⁻¹

Z naměřených hodnot je zřejmé, že na fázi W se indukuje vyšší napětí, než na ostatních dvou fázích. To je pravděpodobně způsobeno špatnou konstrukcí stroje, kdy fáze W má více závitů, než zbylé dvě fáze, které vykazují přibližně stejně vysoké napětí.

Dále bylo stejné měření provedeno při 586 otáčkách za minutu. Naměřené průběhy napětí jsou zobrazeny na obrázku Obr. 4.5.



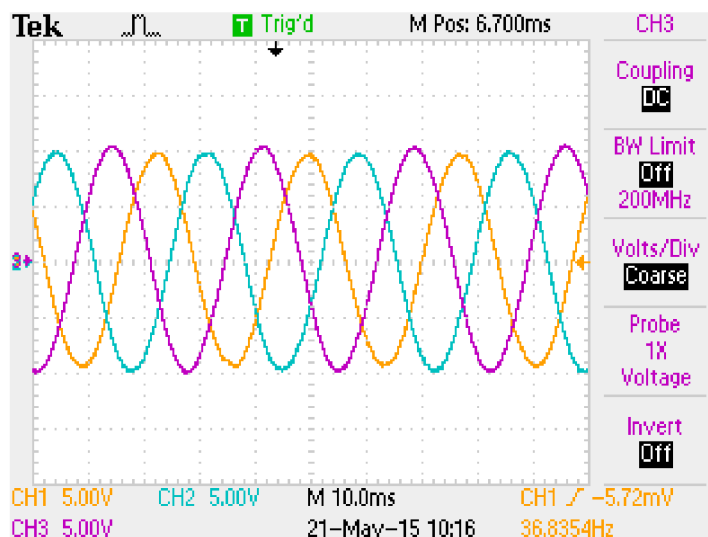
Obr. 4.5 Naměřené průběhy indukovaného napětí při 586 ot.min⁻¹.

I z tohoto průběhu je zřejmé, že na fázi W se indukuje oproti zbývajícím fázím mírně vyšší napětí. Z naměřených hodnot byly opět odečteny maximální hodnoty napětí a také vypočítány jejich efektivní hodnoty jednotlivých napětí. Všechny tyto hodnoty byly přehledně uspořádány do Tab. 4.2.

fáze	Maximální hodnota napětí	Efektivní hodnota napětí
U	7,60 V	5,32 V
V	7,81 V	5,45 V
W	8,22 V	5,64 V

Tab. 4.2 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min⁻¹

Jako poslední se měřily průběhy napětí při 730 otáčkách. Tyto naměřené průběhy jsou zobrazeny na Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Naměřené průběhy indukovaného napětí při 730 ot.min⁻¹.

Hodnoty odečtené z průběhů napětí a vypočítané hodnoty byly vypsány do Tab. 4.3.

fáze	Maximální hodnota napětí	Efektivní hodnota napětí
U	10,00 V	6,76 V
V	10,00 V	6,97 V
W	10,13 V	7,10 V

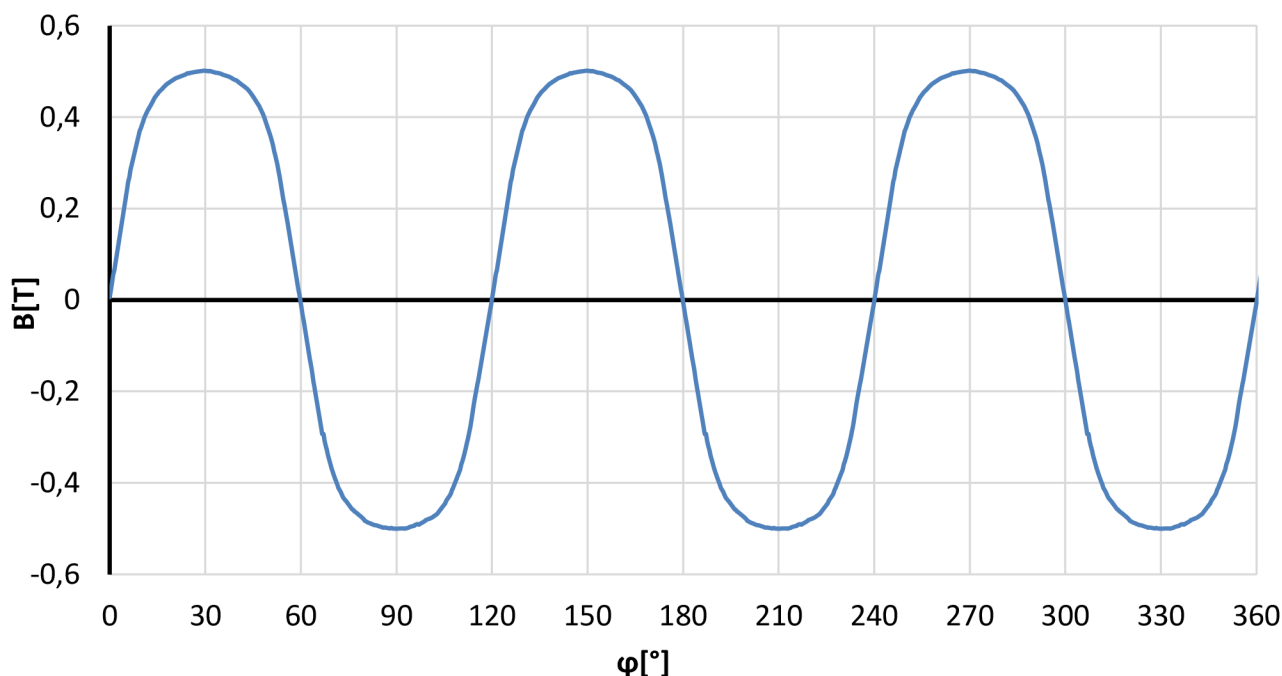
Tab. 4.3 Odečtené a vypočítané hodnoty sdružených napětí na výstupu generátoru při 586 ot.min⁻¹

4.2 měření magnetické indukce

V druhé části měření byla měřením ověřována velikost magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery ve výšce poloviny permanentních magnetů.

Toto měření bylo prováděno pomocí teslametru a 3-osé sondy. Přičemž v potaz byly brány pouze hodnoty naměřené v ose Y, tedy po obvodu stroje. Měření bylo prováděno ve výšce poloviny permanentního magnetu uprostřed vzduchové mezery.

Naměřené průběhy magnetické indukce jsou zobrazeny v Obr. 4.7. V grafu je vynesena závislost magnetické indukce na úhlu natočení stroje, přičemž v grafu je zaznamenán průběh magnetické indukce během jedné otáčky stroje.



Obr. 4.7 průběh magnetické indukce ve vinutí stroje

Nejvyšší naměřená hodnota magnetické indukce ve vinutí stroje byla 0,5 T. Této hodnoty magnetická indukce dosahuje na úrovni středu permanentních magnetů.

5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V následujících tabulkách jsou přehledně uvedeny hodnoty velikosti indukovaného napětí v jednotlivých fázích pro různé otáčky. V tabulkách jsou vedle sebe uspořádány hodnoty vypočítané, nasimulované a naměřené tak, aby mohly být snadno porovnány.

Ve všech tabulkách jsou zapsány výsledky naměřených a vypočítaných hodnot sdruženého efektivního napětí.

fáze	výpočet	simulace	měření
U	4,83 V	4,93 V	3,77 V
V	4,83 V	4,71 V	3,87 V
W	4,83 V	4,95 V	4,12 V

Tab. 5.1 Tabulka s výsledky pro 430 ot.min⁻¹

fáze	výpočet	simulace	měření
U	6,59 V	6,70 V	5,32 V
V	6,59 V	6,41 V	5,45 V
W	6,59 V	6,74 V	5,64 V

Tab. 5.2 Tabulka s výsledky pro 586 ot.min⁻¹

fáze	výpočet	simulace	měření
U	8,20 V	8,45 V	6,76 V
V	8,20 V	8,45 V	6,97 V
W	8,20 V	8,45 V	7,10 V

Tab. 5.3 Tabulka s výsledky pro 730 ot.min⁻¹

Jestliže budou jednotlivé hodnoty porovnány, je zřejmé, že vypočtené a nasimulované hodnoty vycházejí téměř shodně a jsou mezi nimi jenom drobné odchylky, které vznikly především kvůli zvolené konstrukci cívek na modelu stroje, používaného pro simulace v programu Maxwell. Ovšem budou-li porovnány vypočítané hodnoty s naměřenými, vzniká zde mezi hodnotami poměrně velký rozdíl. Ten je způsoben tím, že počet závitů u každé fáze ve fyzickém modelu stroje nebyl přesně znám, a pro potřeby výpočtů byl odhadován. Z velikosti indukovaného napětí lze odhadnout, že vzhledem k tomu, že indukované napětí bylo nižší, než bylo předpokládáno, je ve fyzickém modelu stroje na každé fázi méně závitů, než bylo předpokládáno.

Při zpětném přepočítání z naměřených hodnot, lze dojít k závěru, že zatímco odhadovaný počet závitů na fázi byl 300 závitů, reálně má ve stroji každá fáze přibližně 250 závitů.

Dále je možné porovnat naměřenou a nasimulovanou velikost magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery ve výšce poloviny permanentního magnetu. Jak je z Tab. 5.4 zřejmé, vycházejí nasimulované hodnota v Maxwellu, i naměřená hodnota naprosto shodně.

simulace	měření
0,5 T	0,5 T

Tab. 5.4 Porovnání magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery

6 ZÁVĚR

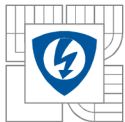
Cílem bakalářské práce bylo navrhnout elektrický stroj s axiálním magnetickým tokem, přičemž práce byla rozdělena do několika částí.

První část se zabývá literární rešerší problematiky axiálních strojů. Kdy byly nejprve vyhledány a nashromážděny podklady pro práci a poté bylo v práci popsáno základní rozdělení axiálních strojů podle různých druhů konstrukce. V rešerši byly popsány všechny nejčastěji používané druhy konstrukcí axiálních strojů. Jednotlivé části rešerše se zabývají základním popisem konstrukčního provedení strojů a výhodami a nevýhodami takové konstrukce. Výhodou těchto strojů je především vysoký poměr výkonu na hmotnost v porovnání s radiálními stroji. Jako nejlepší ohledně účinnosti vycházejí bezželezné stroje, kdy ve stroji nevznikají žádné ztráty v železe a proto stroj dosahuje vysokých účinností. Tyto stroje jsou ovšem nákladné na výrobu a proto se v mnoha aplikacích, kde není potřeba dosahovat vysoké účinnosti, používají radiální stroje, které jsou konstrukčně jednodušší a levnější.

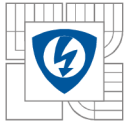
Ve druhé části práce byl proveden analytický výpočet zadaného stroje. Pro výpočet byly vedoucím práce předložen již vyrobený axiální stroj, ze kterého bylo možné odečítat potřebné rozměrové hodnoty. Dále byly vedoucím práce zadány základní parametry stroje potřebné pro správný výpočet. Analytický výpočet byl proveden podle příkladu v literatuře [1]. Zadané hodnoty a následně vypočítané hodnoty byly pro přehlednost zpracovány do tabulek. Protože se jedná o třífázový synchronní stroj s permanentními magnety, který může pracovat v motorickém i generátorovém režimu, byl proveden výpočet parametrů stroje pro případ, že bude stroj použit jako motor, i pro případ že bude použit jako generátor. Dále bylo rozhodnuto, že se se strojem bude v práci dále pracovat jako s generátorem a budou se u něj ověřovat vlastnosti pro generátorový režim. Z tohoto důvodu byly pro další práci důležité výpočty indukovaného napětí ve stroji pracujícím jako generátor.

V další části práce byly vlastnosti generátoru ověřovány v programu Ansys Maxwell pomocí metody konečných prvků. Pro tento účel musel být vytvořen 3D model generátoru. Pro vytvoření modelu byl zvolen program Autodesk Inventor. Na vytvořeném modelu bylo v Maxwelle provedena elektrostatičká a transienční analýza. V rámci elektrostatičké analýzy bylo v modelu nasimulováno rozložení magnetické indukce. Z takto nasimulovaného modelu byl odečten průběh velikosti magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery ve výšce poloviny permanentních magnetů. V rámci transienční analýzy byl na modelu nasimulován průběh indukovaného napětí pro různé druhy otáček. Tyto nasimulované hodnoty velikosti indukovaného napětí se shodovaly s vypočtenými hodnotami analytickým výpočtem ve druhé části práce. Jak se tedy ukázalo, je program Maxwell vhodným pomocníkem pro rychlé ověřování vypočítaných vlastností navrhovaného stroje.

V poslední části práce bylo přistoupeno k praktickému ověření vlastností generátoru. Jak již bylo zmíněno, v této práci se se strojem pracovalo jako s generátorem a ověřovaly se u něj vlastnosti pro generátorové zapojení. Byla změřena velikost indukovaného napětí, pro tři různé otáčky generátoru. Při porovnání výsledků vypočítaných a nasimulovaných s výsledky naměřenými, došlo ke zjištění, že naměřené napětí je přibližně o 20% nižší, než napětí vypočítané. Tato chyba vznikla především kvůli špatné konstrukci stroje. Měřený stroj byl na začátku práce předložen již jako hotový, přičemž počet závitů na fázi nebyl přesně znám a byl



pouze odhadován. Tento počet byl odhadnut jako 300 závitů na fázi a s touto hodnotou bylo také dále počítáno v analytickém výpočtu a při transientní analýze v programu Maxwell. Z naměřených výsledků lze ale zpětně dopočítat, že reálně má každá fáze ve stroji přibližně 250 závitů. Jak je dále z naměřených průběhů na generátoru na Obr. 4.4, Obr. 4.5 a Obr. 4.6 zřejmé, fáze W indukuje vyšší napětí a pravděpodobně má tedy více závitů než ostatní fáze. Kvůli špatné konstrukci stroje tedy nebylo možné vypočítané a nasimulované hodnoty správně ověřit. Dále byla měřením ověřena velikost magnetické indukce ve středu vzduchové mezery (vinutí) ve výšce poloviny permanentních magnetů, přičemž naměřené hodnoty se shodovaly s hodnotami nasimulovanými v programu Maxwell. I zde se tedy program maxwell potvrdil jako spolehlivý nástroj pro rychlý výpočet vlastností navrhovaného stroje.



LITERATURA

- [1] J. F. Gieras, M. J. Kamper, R.-J. Wang, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Springer, 2004, p. 344. ISBN 1-4020-2720-6
- [2] S. Kahourzade, A. Mahmoudi, H. W. Ping, M. N. Uddin, "A Comprehensive Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Machines," *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 19–33, Jan. 2014.
- [3] F. Giullii Capponi, G. De Donato, F. Caricchi, "Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 6, pp. 2190–2205, Nov. 2012.
- [4] M. Aydin, S. Huang, T. A. Lipo, "Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review," in *Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation, and Motion (SPEEDAM) 2004*, 2004.
- [5] D. Mayer, B. Ulrych, "Halbachova soustava magnetů a její modifikace", FEL ZČU Plzeň, pp 1-4
- [6] M. J. Kamper, R.-J. Wang, F. G. Rossouw, "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils," in *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, pp. 13–20.
- [7] Guo-Jih Yan; Liang-Yi Hsu; Jing-Hui Wang; Mi-Ching Tsai; Xin-Yi Wu, "Axial-Flux Permanent Magnet Brushless Motor for Slim Vortex Pumps," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.45, no.10, pp.4732,4735, Oct. 2009.
- [8] HUZLÍK, R. Motor-generátor pro vírovou turbínu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 100 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [10] Maxwell. [Http://www.svsfem.cz](http://www.svsfem.cz) [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/maxwell>