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

AXIÁLNÍ GENERÁTOR PRO MALOU VODNÍ ELEKTRÁRNU
AXIAL MAGNETIC FLUX GENERATOR FOR SMALL HYDRO POWER PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Michal Tauš
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Michal Tauš ***ID:*** 172153
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Axiální generátor pro malou vodní elektrárnu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši.
2. Proveďte analytický návrh axiálního generátoru.
3. Proveďte simulace metodou konečných prvků pro ověření vlastností navrženého generátoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HUZLÍK, R. Motor- generátor pro vírovou turbínu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 100s. Doktorská práce.

[2] J. F. Gieras, M. J. Kamper, R.-J. Wang, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, 2nd Edition. Springer, 2008, p. 362

[3] 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.

Termín zadání: 5.2.2018 ***Termín odevzdání:*** 28.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Konzultant:

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.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem generátoru s axiálním magnetickým tokem. První část je věnována přehledu strojů buzených permanentními magnety a porovnání axiálních strojů. V další části se práce zabývá návrhem stroje s axiálním magnetickým tokem na základě zadaných parametrů. V poslední části jsou pomocí simulací v programu ANSYS Maxwell ověřeny jeho skutečné vlastnosti.

Klíčová slova

Axiální generátor, bezželezný generátor, stroj s permanentními magnety, účinnost, metoda konečných prvků

Abstract

This bachelor thesis deals with a design of axial permanent magnet generator. The first part is devoted to the overview of machines driven by permanent magnets and the comparison of axial machines. In the next part the thesis deals with the design of the machine with axial magnetic flux based on the specified parameters. In the last part, the real properties are verified by ANSYS Maxwell simulations.

Keywords

Axial generator, coreless generator, permanent magnet machine, efficiency, finite element method

Bibliografická citace

TAUŠ, M. *Axiální generátor pro malou vodní elektrárnu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Axiální generátor pro malou vodní elektrárnu 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 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 …… Podpis autora ……..

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Čestmírovi Ondrůškovi, CSc. a konzultantovi Ing. Rostislavovi 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

1 ÚVOD 14

2 LITERÁRNÍ ROZBOR 15

2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ STROJŮ BUZENÝCH POMOCÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ 15

2.2 POROVNÁNÍ RADIÁLNÍCH A AXIÁLNÍCH STROJŮ 16

2.3 TYPY AXIÁLNÍCH STROJŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY 16

3 VÝBĚR TYPU AXIÁLNÍHO GENERÁTORU 20

4 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY PARAMETRŮ AXIÁLNÍHO GENERÁTORU 22

4.1 DEFINOVÁNÍ PARAMETRŮ 22

4.2 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ STROJE 24

4.3 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO ULOŽENÍ CÍVKY 24

4.4 VÝPOČET ROZMĚRŮ STROJE 25

4.5 VÝPOČET VINUTÍ STROJE 26

4.6 VÝPOČET ROZMĚRŮ A JINÝCH PARAMETRŮ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ 27

4.7 VÝPOČET NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ STROJE 28

4.8 VÝPOČET HMOTNOSTÍ ČÁSTÍ STROJE 29

4.9 VÝPOČET MOMENTŮ SETRVAČNOSTI 30

4.10 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI STROJE 30

5 SIMULACE MAGNETICKÝCH A ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ GENERÁTORU 34

5.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ 34

5.2 ANSYS MAXWELL 35

5.3 STATICKÁ ANALÝZA 36

5.4 TRANSIENTNÍ ANALÝZA 38

5.4.1 TRANSIENTNÍ ANALÝZA NAPRÁZDNO 40

5.4.2 TRANSIENTNÍ ANALÝZA PŘI ZATÍŽENÍ 42

6 ZÁVĚR 46

POUŽITÁ LITERATURA 47

PŘÍLOHY 48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Typy strojů a) s radiální vzduchovou mezerou b) s axiální vzduchovou mezerou (převzato z [2] a upraveno) 15

Obr. 2: Druhy vinutí [1] a) klasické vinutí b) toroidální vinutí 17

Obr. 3: Rozdělení klasického vinutí [1] a) s překrývajícími se cívkami b) s nepřekrývajícími se cívkami c) se všemi cívkami jedné fáze u sebe 18

Obr. 4: Tvarové provedení cívek [1] a) lichoběžníkové b) kosočtvercové 19

Obr. 5: Axiální bezželezný stroj se zdvojeným rotorem [3] 19

Obr. 6: Ukázka 2D sítě u metody konečných prvků 34

Obr 7: Prostředí RMxprt 35

Obr 8: Příklad nastavení parametrů stroje 36

Obr. 9: Připravený model pro statickou analýzu 36

Obr. 10: Připravený model pro statickou analýzu- magnety 37

Obr. 11: Magnetická indukce ve vinutí při výšce magnetů 8mm 37

Obr. 12: Magnetická indukce ve vinutí při výšce magnetů 10mm 37

Obr. 13: Model vinutí pro transientní analýzu 38

Obr. 14: Zobrazení "coil terminals" 39

Obr. 15: Zobrazení celého modelu pro transientní analýzu 39

Obr. 16: Zobrazení vyššího čela vinutí fáze U 40

Obr. 17: Indukovaná fázová napětí naprázdno 41

Obr. 18: Sdružené napětí mezi fází U a V naprázdno 41

Obr. 19: Externí obvod pro analýzu při zatížení 42

Obr. 20: Indukovaná fázová napětí při zatížení 43

Obr. 21: Sdružené napětí mezi fází U a V při zatížení 43

Obr. 22: Průběhy proudů tekoucích zátěží 44

Obr. 23: Průběhy napětí na zátěži 45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Porovnání typů generátorů [1] *20*

Tab. 2: Přehled vybraných publikovaných strojů s axiálním magnetickým tokem [1] *21*

Tab. 3: Definované vstupní veličiny *23*

Tab. 4: Vypočítané hodnoty axiálního generátoru *31*

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Význam	Jednotka
U_{smax}	Sdružené napětí při maximálních provozních otáčkách	V
η	Předpokládaná účinnost stroje	-
P_2	Jmenovitý výstupní výkon	W
$\cos \phi$	Předpokládaný účiník	-
n_n	Jmenovité otáčky	1/min
x	Počet fází	-
n_{max}	Maximální provozní otáčky	1/min
M_{max}	Maximální moment	Nm
$B_{\delta str}$	Střední hodnota magnetické indukce ve vinutí	T
A_m	Lineární proudová hustota	A/m
k_d	Poměr vnějšího a vnitřního průměru	-
$k_{\Delta U}$	Koeficient poklesu napětí	-
α_{PM}	Pólové krytí	-
P	Počet pólových dvojic	-
a_w	Počet paralelních drátů	-
J_{max}	Maximální proudová hustota ve vodiči	A/mm^2
q	Počet drážek na pól a fázi	-
c	Koeficient plnění drážky	-
H_c	Intenzita magnetického pole magnetu	A/m
μ_0	Permeabilita vakua	H/m
μ_r	Relativní permeabilita	-
G_{cu}	Vodivost mědi při 75 °c	S/m
ρ_{cu}	Hustota mědi	kg/m^3
k_{sat}	Odhad saturační konstanty	-
k_{fd}	Poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové v ose d	-
k_{fq}	Poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové v ose q	-
ρ_{fe}	Hustota železa	kg/m^3
ρ_{pm}	Hustota permanentních magnetů	kg/m^3
ρ_{vz}	Hustota vzduchu	kg/m^3
η_{vz}	Dynamická viskozita vzduchu	Ns/m^2

U_{sn}	Jmenovité napětí	V
U_{ifn}	Fázové indukované napětí	V
I_{fn}	Jmenovitý proud	A
M_n	Jmenovitý moment	Nm
f_{max}	Max. frekvence výst. napětí	Hz
f_n	Jmenovitá frekvence výst. napětí	Hz
I_{fmax}	Max. proud při max. momentu	A
k_{d1}	Činitel rozložení	-
T_c	Cívková rozteč	-
T_p	Pólová rozteč	-
β	Poměr cívkové a pólové rozteče	-
k_{p1}	Pitch factor	-
k_{w1}	Činitel vinutí	-
D_0	Vnější průměr	mm
D_i	Vnitřní průměr	mm
D_s	Střední průměr	mm
Q	Počet drážek	-
T_{ds}	Šířka drážky	mm
T_{ps}	Pólová rozteč	mm
T_{pi}	Pólová rozteč	mm
T_{po}	Pólová rozteč	mm
L_m	Výška magnetu	mm
O_s	Střední obvod	mm
h_{vz}	Tloušťka vzduchové mezery	mm
h_r	Tloušťka rotorového jha	mm
D_h	Průměr hřídele	mm
l_h	Délka hřídele	mm
φ_{cu}	Tok přes cívku	Wb
n_u	Počet závitů (počítáno z napětí)	-
n_{cu}	Počet vodičů na 1 cívku	-
n_f	Počet závitů zaokrouhleno	-
S_{cu}	Průřez vodiče	mm^2
S_{cup}	Průřez vodiče při více paralelních vodičích	mm^2

D_{cu}	Průměr vodiče	mm
S_{cusk}	Plocha vodičů v cívce vč. Izolace	mm^2
S_{celk}	Celková plocha cívky vč. Plnění	mm^2
T_{di}	Šířka jedné drážky	mm
h_c	Hloubka drážky	mm
B_{pm}	Indukce magnetu	T
H_{pm}	Intenzita mg. pole magnetu	A/m
h_m	Tloušťka magnetu	mm
d_{ps}	Střední šířka magnetu	mm
d_{pi}	Minimální šířka magnetu	mm
d_{po}	Maximální šířka magnetu	mm
h_{pm}	Výška magnetu	mm
l_{cmin}	Minimální délka spodního čela	mm
l_{cmax}	Maximální délka spodního čela	mm
l_{cstr}	Střední délka spodního čela	mm
R_{cu}	Odpor vinutí	Ω
m_{cuakt}	Aktivní hmotnost vinutí	kg
λ_{1e}	Koeficient rozptylové magnetické vodivosti čel	-
λ_{1s}	Koeficient rozptylové magnetické vodivosti rad. části vodiče	-
T_{d1}	Činitel statorového diferenčního rozptylu	-
λ_{1d}	Část rozptylu způsobená diferenčním rozptylovým tokem	-
X_1	Celková rozptylová reaktance	Ω
g_{eg}	Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose d	-
g_{eqq}	Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose q	-
X_{ad}	Vlastní reaktance	Ω
X_{aq}	Vlastní reaktance	Ω
X_d	Celková reaktance v ose d	Ω
L_d	Indukčnost v ose d	H
X_q	Celková reaktance v ose q	Ω
L_q	Indukčnost v ose q	H
m_{cuakt}	Hmotnost aktivních částí vinutí	kg
m_{cuo}	Hmotnost ostatních částí vinutí	kg
m_{cu}	Celková hmotnost vinutí	kg

m_{jho}	Hmotnost rotorového jha	kg
m_{pm}	Hmotnost permanentních magnetů	kg
m_{rot}	Hmotnost rotoru	kg
m_{hr}	Hmotnost hřídele	kg
m_{celk}	Celková hmotnost	kg
J_{pm}	Moment setrvačnosti permanentních magnetů	kgm^2
J_{jho}	Moment setrvačnosti rotorového jha	kgm^2
J_{hr}	Moment setrvačnosti hřídele	kgm^2
J_{celk}	Celkový moment setrvačnosti	kgm^2
P_{jn}	Jmenovité ztráty ve vinutí	W
P_{jmax}	Maximální ztráty ve vinutí	W
P_{en}	Ztráty vířivými proudy ve vodiči	W
P_{fr}	Ztráty v ložiskách	W
R_e	Reynoldsovo číslo	-
c_f	Koeficient odporu vzduchu	-
P_{vent}	Ventilační ztráty	W
P_{celk}	Celkové ztráty	W
η_{celk}	Celková účinnost	%

1 ÚVOD

Jelikož se veškeré elektrické stroje, přístroje a zařízení posuzují, mimo jiné, také na základě efektivity přeměny energie (účinnosti), musí se při jejich výrobě tato veličina brát v potaz. Cílem práce je na základě zadaných parametrů navrhnout takový axiální generátor pro malou vodní elektrárnu, aby dosahoval co možná nejvyšší účinnosti.

Tato práce se tedy bude zabývat návrhem synchronního generátoru s axiálním magnetickým tokem s permanentními magnety. Takový typ generátoru by měl dosahovat velmi vysokých účinností. Synchronní stroje se také vyznačují tím, že mají velký měrný výkon v závislosti na hmotnosti (velkou hustotu energie).

První část práce je věnována obecnému přehledu vlastností strojů buzených permanentními magnety a jejich rozdělení. Dále pak srovnává radiální a axiální stroje na základě jejich výhod a nevýhod a popisuje jednotlivé typy axiálních strojů buzených permanentními magnety.

Ve druhé části jsou na základě zadaných parametrů vypočítány rozměry stroje, počet závitů ve vinutí, počet cívek, průřez vodičů, hmotnosti jednotlivých částí stroje, momenty setrvačnosti, účinnost a další parametry potřebné k navržení stroje a ověření jeho vlastností v programu ANSYS Maxwell.

V poslední části jsou ověřeny skutečné vlastnosti generátoru v programu ANSYS Maxwell, kde je při statické analýze zjištěna skutečná magnetická indukce ve statoru generátoru při použití navržených permanentních magnetů. Při transientní analýze je pak ověřeno indukované fázové i sdružené napětí v cívkách generátoru naprázdno a při zátěži. Dále jsou ověřeny velikosti proudů tekoucích zátěží a výkon na zátěži.

2 LITERÁRNÍ ROZBOR

2.1 Základní rozdělení strojů buzených pomocí permanentních magnetů

Mezi výhody elektrických strojů buzených pomocí permanentních magnetů patří zejména:

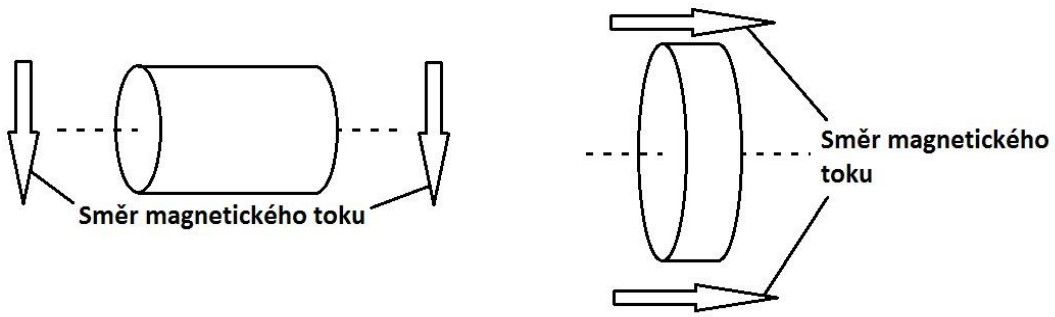
- pro zajištění buzení není potřebný další zdroj elektrické energie
- lepší účinnost díky zmenšení ztrát
- není zapotřebí kartáčů pro přívod elektrické energie k rotoru, větší spolehlivost
- pro stejný výkon je zapotřebí menší váha stroje, než u strojů buzených pomocí budícího vinutí

Mezi nevýhody těchto strojů patří:

- nemožnost regulace parametrů stroje změnou budícího proudu

Podle směru magnetického toku můžeme stroje s permanentními magnety dělit na:

- stroje s radiální vzduchovou mezerou (Obr. 1.a))
- stroje s axiální vzduchovou mezerou (Obr. 1.b))



a) b)

Obr. 1: Typy strojů a) s radiální vzduchovou mezerou b) s axiální vzduchovou mezerou (převzato z [2] a upraveno)

Podle vinutí:

- stroje s rozloženým vinutím (q>1)
- stroje s koncentrovaným vinutím (q≤1)

Podle rozmístění permanentních magnetů:

- stroje s permanentními magnety na povrchu
- stroje s vnitřními permanentními magnety [4]

2.2 Porovnání radiálních a axiálních strojů

Každý ze strojů (jak radiální, tak axiální) má své výhody i nevýhody. Volba mezi těmito stroji tedy závisí především na oblasti použití. Například pro pohony nebo trakci bude vhodnější použít radiální stroj díky kompaktnějším rozměrům. Naopak pro použití jako generátoru u malých vodních elektráren bude výhodné použít oba typy strojů. Obecně lze ale říci, že axiální stroje mají lepší účinnost než stroje radiální.

Axiální stroje jsou oproti radiálním výhodnější zejména v těchto ohledech:

- mají mnohem vetší poměr průměru ku délce než stroje radiální
- velikost vzduchové mezery lze měnit
- mají vyšší hustotu energie, tedy vyšší úsporu materiálu
- čím větší mají průměr, tím více pólů mohou nést, jsou tedy vhodné pro nízkootáčkové aplikace

Jako jednu z největších nevýhod axiálního stroje lze považovat jeho výkonovou limitaci. Čím výkonnější stroj je, tím větší moment musí přenášet spoj mezi hřídelí a rotorem. V krajním případě by se mohlo stát, že kroutící moment stroje překročí maximální moment, který je schopný tento spoj přenést, a dojde k mechanickému poškození stroje. Obvykle se tento problém řeší použitím vícestupňového axiálního stroje, kde je styčná plocha mezi rotorem a hřídelí vynásobená počtem stupňů stroje. [4]

2.3 Typy axiálních strojů s permanentními magnety

Dle [2] jsou axiální stroje z hlediska jejich principu funkce rozděleny na:

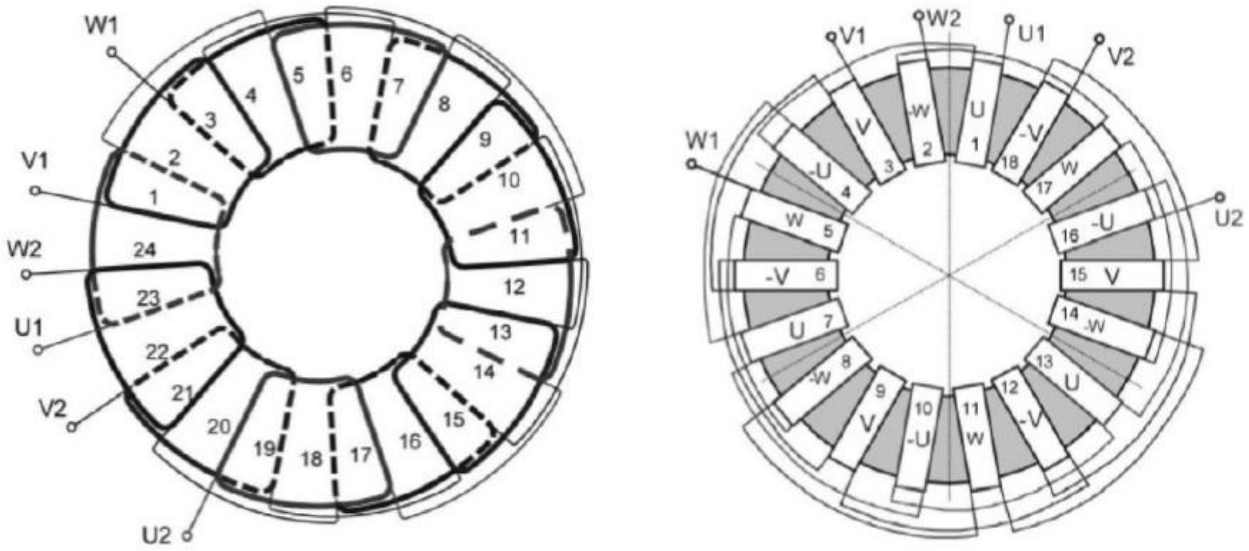
- stejnosměrné stroje s komutátorem a permanentními magnety
- stejnosměrné bezkartáčové a synchronní stroje s permanentními magnety
- indukční stroje

Z hlediska jejich konstrukce na:

- jednostranné axiální stroje
  - s drážkovaným statorem
  - s bezdrážkovým statorem
  - s vyniklými póly na statoru
- oboustranné axiální stroje
  - s vnitřním statorem
    - s drážkovým statorem
    - s bezdrážkovým statorem
    - s vyniklými póly na statoru
  - s vnitřním rotorem
    - s drážkovým statorem
    - s bezdrážkovým statorem
    - s vyniklými póly na statoru
- vícestupňové axiální stoje

Podle typu vinutí na:

- stroje s klasickým vinutím (Obr. 2.a))
- stroje s toroidálním vinutím (Obr. 2.b))

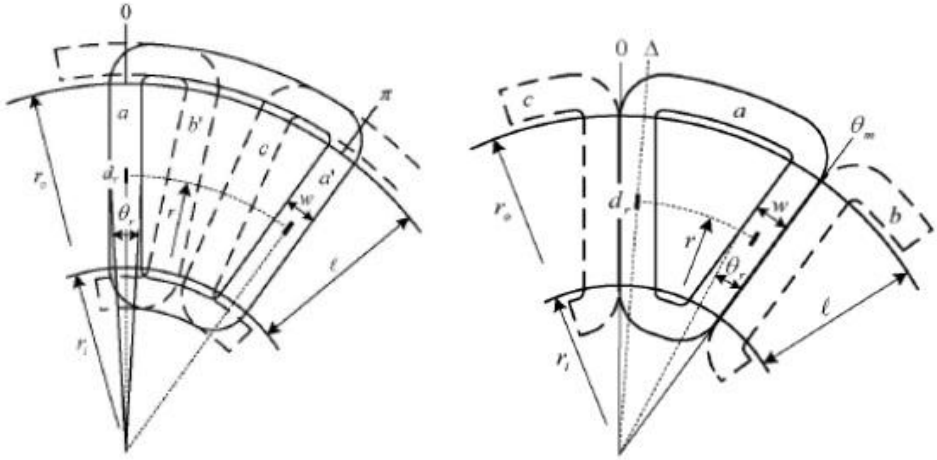


a) b)

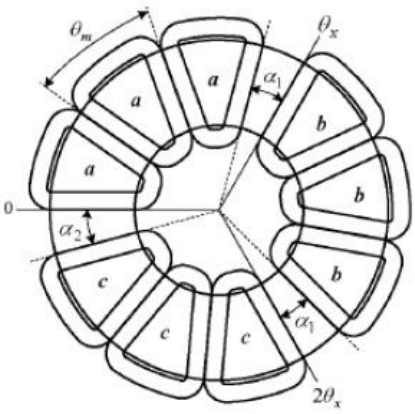
Obr. 2: Druhy vinutí [1] a) klasické vinutí b) toroidální vinutí

Klasické vinutí dále dělíme podle rozložení cívek na:

- vinutí s překrývajícími se cívkami (Obr. 3.a))
- vinutí s nepřekrývajícími se cívkami (Obr. 3.b))
- vinutí se všemi cívkami jedné fáze u sebe (Obr. 3.c))



a) b)



c)

Obr. 3: Rozdělení klasického vinutí [1] a) s překrývajícími se cívkami b) s nepřekrývajícími se cívkami c) se všemi cívkami jedné fáze u sebe

Klasické vinutí lze provézt ve dvou tvarech:

- lichoběžníkové (Obr. 4.a))
- kosočtvercové (Obr. 4. b))

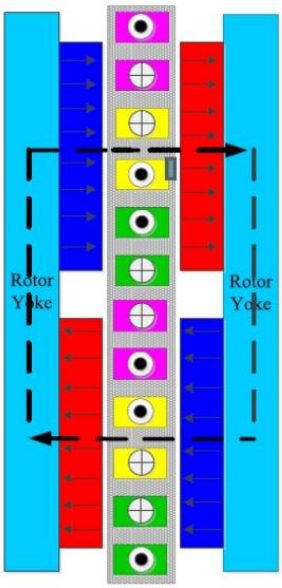
a) b)

Obr. 4: Tvarové provedení cívek [1] a) lichoběžníkové b) kosočtvercové

Každý typ vinutí musí mít jiné řazení permanentních magnetů. U klasického typu vinutí a provedení se dvěma rotory musíme magnety řadit tak, aby protilehlé magnety přitahovaly, zatímco u toroidálního typu vinutí a provedení se dvěma rotory řadíme magnety tak, aby se protilehlé magnety odpuzovaly. [1]

Bezželezné axiální stroje

Axiální stroje s bezželezným statorem mají vinutí statoru navinuté na nevodivé a nemagnetické nosné konstrukci. Díky tomuto konstrukčnímu provedení zde nevznikají hysterézní ztráty a ztráty vířivými proudy. Tyto stroje tedy nabízí vyšší účinnost a nižší hmotnost než stroje s železným statorem. Nevýhodou bezželezných axiálních strojů je však skutečnost, že se vlivem absence magneticky vodivého materiálu zvýší nemagnetická vzduchová mezera, a takový stroj tedy potřebuje permanentní magnety o větším objemu, než u ekvivalentního stroje s feromagnetickým jádrem statoru.[3]



Obr. 5: Axiální bezželezný stroj se zdvojeným rotorem [3]

3 VÝBĚR TYPU AXIÁLNÍHO GENERÁTORU

Při výběru vhodného axiálního stroje je hlavním kritériem co nejlepší účinnost, dále malé rozměry, jednoduchost výroby, nízká pořizovací cena a vysoká spolehlivost. V *Tab. 1* se nachází seznam různých typů generátorů a v *Tab. 2* seznam různých provedení axiálních strojů.

Tab. 1: Porovnání typů generátorů [1]

Typ generátoru	Otáčky	Účinnost
Axiální synchronní generátor s bezželezným statorem	Proměnné	96%
Synchronní generátor s elektromagnetickým buzením	Proměnné (při připojení přes měnič)	73,6%
Asynchronní generátor s vinutou kotvou a napájeným rotorem	Proměnné	70,8%
Asynchronní generátor s kotvou nakrátko s přímým připojením do sítě	Proměnné v malém rozsahu	61,5%

Tab. 2: Přehled vybraných publikovaných strojů s axiálním magnetickým tokem [1]

Typ	P [kW]	U [V]	N [1/min]	η [%]	m [kg]	Poznámka
Bezželezný motor	25	127	1100	93	26,8	Vyroben
Bezželezný motor	1,8	54,3	1380	97,9	5,98	Vyroben
Bezželezný generátor	2	-	500	92	13,25	Vyroben, kruhové magnety
Bezželezný generátor	1,43	100,6	1500	91,8	-	Návrh
Bezželezný motor/generátor	10	227,6	750	92,5	22,51	Návrh
Železný motor	5	230	300	89	-	Vyroben
Bezželezný generátor	0,81	19,88	200	87,8	-	Vyroben, overlapping vinutí
Bezželezný generátor	0,82	19,56	200	87,4	-	Vyroben, non-overlapping vinutí
Bezželezný generátor	0,71	18,43	200	85,5	-	Vyroben, phasegrouped vinutí
Bezželezný generátor	0,5	70	500	-	-	Vyroben

Na základě *Tab. 1* a *Tab. 2* byl pro návrh generátoru vybrán bezželezný generátor s axiální vzduchovou mezerou v dvourotorovém provedení díky své vysoké účinnosti a nízké poměrné hmotnosti.

4 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY PARAMETRŮ AXIÁLNÍHO GENERÁTORU

Výpočty jednotlivých parametrů jsou dle [1] a [4] s úpravami.

Všechny výpočty byly provedeny v programu Microsoft Office Excel tak, aby se při přepsání vstupných (požadovaných) veličin automaticky upravily výpočty, a bylo teoreticky možné jednoduše navrhnout generátor s axiálním magnetickým tokem jakýchkoliv požadovaných parametrů. Dále se v tomto souboru s výpočty nachází i tabulka normalizovaných průměrů měděných vodičů, a to bez izolace i s izolací. Při návrhu generátoru je automaticky vypočítán vhodný průměr vodiče pro vinutí a na základě tabulky s normalizovanými průměry je poté vybrán nejbližší vyšší průměr vodiče. Následně je k tomuto průměru připočítaná i tloušťka izolační vrstvy a spočítán průřez tohoto vodiče. S ohledem na počet závitů je dále určena plocha vinutí a rozměrové parametry drážky pro uložení vinutí. V příloze 1 se nachází snímek z tohoto souboru s veškerými výpočty.

4.1 Definování parametrů

Před samotným návrhem axiálního generátoru je nutné definovat základní parametry, ze kterých potom vychází další výpočty. Mezi tyto parametry patří zejména:

- Sdružené výstupní napětí při maximálních provozních otáčkách
- zapojení (do hvězdy/do trojúhelníka)
- jmenovitý výstupní výkon
- jmenovité otáčky
- počet fází
- počet pólových dvojic
- počet paralelních drátů ve vinutí

Ostatní veličiny, ze kterých vychází rovnice pro návrh axiálního generátoru je nutné odhadnout na základě parametrů již navržených strojů:

- předpokládaná účinnost stroje
- předpokládaný účiník
- maximální provozní otáčky
- maximální moment
- střední hodnota magnetické indukce ve vinutí
- lineární proudová hustota
- poměr vnějšího a vnitřního průměru stroje
- koeficient poklesu napětí
- pólové krytí
- maximální proudová hustota ve vodiči

Všechny vstupní veličiny jsou zadány v *Tab. 3*

Tab. 3: Definované vstupní veličiny

Název	Označení	Velikost	Jednotka
Sdružené napětí při maximálních provozních otáčkách	U_{smax}	50	V
Zapojení		hvězda	
Předpokládaná účinnost stroje	η	0,9	-
Jmenovitý výstupní výkon	P_2	250	W
Předpokládaný účiník	$\cos\phi$	1	-
Jmenovité otáčky	n_n	500	1/min
Počet fází	x	3	-
Maximální provozní otáčky	n_{max}	550	1/min
Maximální moment	M_{max}	6,68	Nm
Střední hodnota magnetické indukce ve vinutí	$B_{\delta str}$	0.25	T
Lineární proudová hustota	A_m	$9.5\cdot10^3$	A/m
Poměr vnějšího a vnitřního průměru	k_d	0,68	-
Koeficient poklesu napětí	$k_{\Delta U}$	1,05	-
Pólové krytí	α_{PM}	0,64	-
Počet pólových dvojic	P	6	-
Počet paralelních drátů	a_w	1	-
Maximální proudová hustota ve vodiči	J_{max}	3	A/mm^2
Počet drážek na pól a fázi	q	1	-
Koeficient plnění drážky	c	0,55	-
Intenzita magnetického pole magnetu	H_c	$87.6\cdot10^4$	A/m
Permeabilita vakua	μ_0	$1.26\cdot10^{-6}$	H/m
Relativní permeabilita	μ_r	1,16	-
Vodivost mědi při 75 °c	G_{cu}	$47\cdot10^6$	S/m
Hustota mědi	ρ_{cu}	$8.8\cdot10^3$	kg/m^3
Odhad saturační konstanty	k_{sat}	1	-
Poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové v ose d	k_{fd}	1	-
Poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové v ose q	k_{fq}	1	-
Hustota železa	ρ_{fe}	$7.85\cdot10^3$	kg/m^3
Hustota permanentních magnetů	ρ_{pm}	$7.7\cdot10^3$	kg/m^3
Hustota vzduchu	ρ_{vz}	1,20	kg/m^3
Dynamická viskozita vzduchu	η_{vz}	$0.18\cdot10^{-4}$	Ns/m^2

4.2 Výpočet elektrických parametrů stroje

Pro výpočet jmenovitého napětí platí:

$$U_{sn} = \frac{U_{smax} \cdot n_n}{n_{max}} \tag{2.1}$$

kde U_{smax} je sdružené výstupní napětí při maximálních provozních otáčkách, n_n jsou jmenovité otáčky a n_{max} jsou maximální provozní otáčky.

Dále je možné vypočítat hodnotu fázového indukovaného napětí:

$$U_{ifn} = \frac{U_{sn} \cdot k_{\Delta u}}{\sqrt{3}} \tag{2.2}$$

kde $k_{\Delta u}$ je koeficient poklesu napětí.

Pro jmenovitý proud platí:

$$I_{fn} = \frac{\eta \cdot P_2}{\sqrt{3} \cdot U_{sn} \cdot cos\varphi} \tag{2.3}$$

kde η je předpokládaná účinnost, P_2 je jmenovitý výstupní výkon a cosφ je předpokládaný účiník.

Pro jmenovitý moment platí:

$$M_n = \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_n}{60}} \tag{2.4}$$

Maximální frekvence výstupního napětí se určí dle:

$$f_{max} = \frac{n_{max} \cdot p}{60} \tag{2.5}$$

kde p je počet pólových dvojic.

Pro jmenovitou frekvenci výstupního napětí platí:

$$f_n = \frac{n_n \cdot p}{60} \tag{2.6}$$

Pro proud při maximálním momentu platí:

$$I_{fmax} = \frac{I_{fn} \cdot M_{max}}{M_n}$$

kde M_{max} je maximální moment stroje.

4.3 Výpočet parametrů pro uložení cívky

Pro hodnotu koeficientu vinutí platí:

$$k_{d1} = \frac{sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot x}\right)}{q \cdot sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot x \cdot q}\right)} \tag{2.7}$$

kde x je počet fází a q je počet drážek na pól a fázi.

Pro výpočet pitch faktoru platí:

$$k_{p1} = sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \tag{2.8}$$

kde β je poměr cívkového kroku k pólové rozteči.

Pro výpočet hodnoty činitele vinutí platí:

$$k_{w1} = k_{d1} \cdot k_{p1} \tag{2.9}$$

4.4 Výpočet rozměrů stroje

Vnější průměr stroje lze vypočítat dle:

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{P_2 \cdot \eta \cdot k_{\Delta u} \cdot 32 \cdot \frac{p}{2}}{\pi^3 \cdot f_n \cdot k_{w1} \cdot B_{\delta str} \cdot \left(1 - {k_d}^2\right) \cdot (1 + k_d) \cdot A_m}} \tag{2.10}$$

kde $B_{\delta str}$ je střední hodnota magnetické indukce ve vinutí, k_d je poměr vnějšího a vnitřního průměru a A_m je lineární proudová hustota.

Pro vnitřní průměr platí:

$$D_i = k_d \cdot D_0 \tag{2.11}$$

Střední průměr zle vypočítat dle:

$$D_s = \frac{D_0 - D_i}{2} + D_i \tag{2.12}$$

Pro počet drážek platí:

$$Q = x \cdot q \cdot p \tag{2.13}$$

Pro šířku drážky platí:

$$\mathrm{T}_{ds} = \frac{\pi \cdot D_s}{Q} \tag{2.14}$$

Pro střední pólovou rozteč platí:

$$\mathrm{T}_{ps} = \frac{\pi \cdot D_s}{p} \tag{2.15}$$

Pro minimální pólovou rozteč platí:

$$\mathrm{T}_{pi} = \frac{\pi \cdot D_i}{p} \tag{2.16}$$

Pro maximální pólovou rozteč platí:

$$\mathrm{T}_{p0} = \frac{\pi \cdot D_0}{p} \tag{2.17}$$

Výšku permanentního magnetu lze vypočítat dle:

$$L_m = \frac{D_0 \cdot D_i}{2} \tag{2.18}$$

Pro střední obvod stroje platí:

$$O_s = \pi \cdot D_s \tag{2.19}$$

4.5 **Výpočet vinutí stroje**

Pro výpočet magnetického toku tekoucího přes cívku platí:

$$\phi_{cu} = B_{\delta str} \cdot \frac{\pi}{\frac{p}{2 \cdot 8}} \cdot {D_0}^2 \cdot \left(1 - {k_d}^2\right) \tag{2.20}$$

Z velikosti fázového indukovaného napětí lze vypočítat počet závitů cívky:

$$n_u = \frac{U_{ifn}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_n \cdot k_{w1} \cdot \phi_{cu}} \tag{2.21}$$

Z počtu pólových dvojic a počtu drážek na pól a fázi lze vypočítat počet vodičů připadajících na 1 cívku:

$$n_{cu} = \frac{n_u}{q \cdot \frac{p}{2}} \tag{2.22}$$

Průřez vodiče zle vypočítat z maximální proudové hustoty ve vodiči a z maximálního proudu při maximálním momentu dle:

$$S_{cu} = \frac{I_{fmax}}{J_{max}} \tag{2.23}$$

kde J_{max} je maximální proudová hustota ve vodiči.

Pro průměr vodiče platí:

$$D_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cu}}{\pi}} \tag{2.24}$$

Z vypočítaného průměru vodiče je nutno vybrat velikost nejbližšího vyššího normalizovaného průměru vodiče s izolací. Z tohoto průměru lze vypočítat průřez vodiče s izolací dle:

$$S_{cunorm} = \pi \cdot \left(\frac{D_{cunorm}}{2}\right)^2 \tag{2.25}$$

kde D_{cunorm} je normalizovaný průměr vodiče vybraný z tabulky normalizovaných průřezu.

Dále je možné vypočítat skutečný průřez vodiče dle:

$$S_{cusk} = n_{cu} \cdot a_w \cdot S_{cunorm} \tag{2.26}$$

kde a_w je počet paralelních drátů.

Pro výpočet celkové plochy cívky včetně plnění cívky platí:

$$S_{celk} = \frac{S_{cusk}}{c \cdot 10^6} \tag{2.27}$$

kde c je koeficient plnění drážky.

Pro šířku jedné drážky platí:

$$\mathrm{T}_{di} = \pi \cdot \frac{D_i}{Q} \tag{2.28}$$

Pro hloubku jedné drážky platí:

$$h_c = \frac{S_{celk}}{\mathrm{T}_{di}} \tag{2.29}$$

4.6 Výpočet rozměrů a jiných parametrů permanentních magnetů

Ze střední hodnoty magnetické indukce ve vinutí lze vypočítat magnetickou indukci permanentního magnetu dle:

$$B_{pm} = B_{\delta str} \cdot \frac{\pi}{2} \tag{2.30}$$

Z intenzity magnetického pole permanentního magnetu, relativní permeability a permeability vakua lze vypočítat skutečnou intenzitu magnetického pole v určeném pracovním bodě magnetu dle:

$$H_{pm} = H_c - \frac{B_{pm}}{\mu_0 \cdot \mu_r} \tag{2.31}$$

kde H_c je intenzita magnetického pole magnetu, μ_0 je permeabilita vakua a μ_r je relativní permeabilita.

Pro tloušťku magnetu platí:

$$h_m = B_{\delta str} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{4 \cdot h_{vz} + 2 \cdot h_c}{4 \cdot \left(H_c - \frac{B_{pm}}{\mu_0 * \mu_r}\right) \cdot \mu_0} \tag{2.32}$$

Pro střední šířku magnetu platí:

$$d_{ps} = \alpha_{pm} \cdot \pi \cdot \frac{D_s}{p} \tag{2.33}$$

kde α_{pm} je pólové krytí magnetu.

Pro minimální šířku magnetu platí:

$$d_{pi} = \alpha_{pm} \cdot \pi \cdot \frac{D_i}{p} \tag{2.34}$$

Pro maximální šířku magnetu platí:

$$d_{ps} = \alpha_{pm} \cdot \pi \cdot \frac{D_0}{p} \tag{2.35}$$

Pro výšku magnetu platí:

$$h_{pm} = \frac{D_0 - D_i}{2} \tag{2.36}$$

4.7 Výpočet náhradních parametrů stroje

Pro minimální délku spodního čela platí:

$$l_{cmin} = \beta \cdot \pi \cdot \frac{D_i}{p} \tag{2.37}$$

Pro maximální délku spodního čela platí:

$$l_{cmax} = \beta \cdot \pi \cdot \frac{D_0}{p} \tag{2.38}$$

Pro střední délku spodního čela platí:

$$l_{cstr} = \beta \cdot \pi \cdot \frac{D_s}{p} \tag{2.39}$$

Odpor vinutí lze vypočítat dle:

$$R_{cu} = \frac{n_u \cdot l_{cstr} \cdot 4}{G_{cu} \cdot a_w \cdot \left(\frac{D_{cunorm}}{1000}\right)^2 \cdot \pi} \tag{2.40}$$

kde G_{cu} je vodivost mědi při teplotě 75 °c.

Pro aktivní hmotnost vinutí platí:

$$m_{cuakt} = \rho_{cu} \cdot x \cdot a_w \cdot n_u \cdot \left(\frac{D_{cunorm}}{1000}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2 \cdot L_m \tag{2.41}$$

kde ρ_{cu} je hustota mědi.

Pro činitele statorového diferenčního rozptylu platí:

$$\mathrm{T}_{d1} = \pi^2 \cdot \frac{10 \cdot q^2 + 2}{27} \cdot \left(sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot q}\right)\right)^2 - 1 \tag{2.42}$$

Část rozptylu způsobenou diferenčním rozptylovým tokem lze vypočítat dle:

$$\lambda_{1d} = \frac{x \cdot q \cdot \mathrm{T}_{ps} \cdot {k_{w1}}^2 \cdot \mathrm{T}_{d1}}{\pi^2 \cdot (2 \cdot h_{vz} + h_c) \cdot k_{sat}} \tag{2.43}$$

kde k_{sat} je velikost saturační konstanty.

Pro celkovou rozptylovou reaktanci platí:

$$X_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \mu_0 \cdot L_m \cdot {n_u}^2}{\frac{p}{2} \cdot q} \cdot \left(\lambda_{1s} + \frac{l_{cmin}}{L_m} \cdot \frac{\lambda_{1e}}{2} + \frac{l_{cmax}}{L_m} \cdot \frac{\lambda_{1e}}{2} + \lambda_{1d}\right) \tag{2.44}$$

Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose d lze vypočítat dle:

$$g_{eg} = 2 \cdot \left(\left(h_{vz} + \frac{h_c}{2} \right) \cdot k_{sat} + \frac{h_m}{\mu_r} \right) \tag{2.45}$$

Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose q lze vypočítat dle:

$$g_{eqq} = 2 \cdot \left(h_{vz} + \frac{h_c}{2} + h_m \right) \tag{2.46}$$

Pro vlastní reaktanci v ose d platí:

$$X_{ad} = 2 \cdot x \cdot \mu_0 \cdot f_n \cdot \left(\frac{n_u \cdot k_{w1} \cdot 2}{p} \right)^2 \cdot \frac{\left(\left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right)^2}{g_{eg}} \cdot k_{fd} \tag{2.47}$$

kde k_{fd} je poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové indukci v ose d.

Pro vlastní reaktanci v ose q platí:

$$X_{ad} = 2 \cdot x \cdot \mu_0 \cdot f_n \cdot \left(\frac{n_u \cdot k_{w1} \cdot 2}{p} \right)^2 \cdot \frac{\left(\left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right)^2}{g_{eqq}} \cdot k_{fq} \tag{2.48}$$

kde k_{fq} je poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové indukci v ose q.

Pro celkovou reaktanci v ose q platí:

$$X_d = X_{ad} + X_1 \tag{2.49}$$

Pro indukčnost v ose d platí:

$$L_d = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \tag{2.50}$$

Pro celkovou reaktanci v ose q platí:

$$X_q = X_{aq} + X_1 \tag{2.51}$$

Pro indukčnost v ose q platí:

$$L_q = \frac{X_q}{2 \cdot \pi \cdot f_n} \tag{2.52}$$

4.8 Výpočet hmotností částí stroje

Hmotnost neaktivních částí vinutí zle vypočítat dle:

$$m_{cuo} = \rho_{cu} \cdot x \cdot a_w \cdot n_u \cdot \left(\frac{D_{cunorm}}{1000} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(l_{cmin} + l_{cmax} + \frac{1}{200} \right) \tag{2.53}$$

Celkovou hmotnost vinutí vypočítáme dle:

$$m_{cu} = m_{cuakt} + m_{cuo} \tag{2.54}$$

Pro hmotnost rotorového jha platí:

$$m_{jho} = \pi \cdot \frac{\left({D_0}^2 - {D_h}^2\right)}{4} \cdot h_r \cdot \rho_{fe} \tag{2.55}$$

kde ρ_{fe} je hustota železa.

Pro hmotnost permanentních magnetů platí:

$$m_{pm} = \alpha_{pm} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left({D_0}^2 - {D_i}^2\right) \cdot h_m \cdot \rho_{pm} \tag{2.56}$$

kde ρ_{pm} je hustota permanentních magnetů.

Pro celkovou hmotnost rotoru platí:

$$m_{rot} = m_{jho} + m_{pm} \tag{2.57}$$

Pro hmotnost hřídele platí:

$$m_{hr} = \pi \cdot \frac{{D_h}^2}{4} \cdot l_h \cdot \rho_{fe} \tag{2.58}$$

Celkovou hmotnost lze vypočítat jako součet všech dílčích hmotností dle:

$$m_{celk} = m_{cu} + 2 \cdot m_{rot} + m_{hr} \tag{2.59}$$

4.9 Výpočet momentů setrvačnosti

Pro moment setrvačnosti permanentních magnetů platí:

$$J_{pm} = m_{pm} \cdot \frac{{D_0}^2 + {D_i}^2}{8} \tag{2.60}$$

Moment setrvačnosti rotorového jha lze vypočítat dle:

$$J_{jho} = m_{jho} \cdot \frac{{D_0}^2 + {D_h}^2}{8} \tag{2.61}$$

Pro moment setrvačnosti hřídele platí:

$$J_{hr} = m_{hr} \cdot \frac{{D_h}^2}{8} \tag{2.62}$$

Celkový moment setrvačnosti se vypočítá dle:

$$J_{celk} = 2 \cdot J_{pm} + 2 \cdot J_{jho} + J_{hr} \tag{2.63}$$

4.10 Výpočet ztrát a účinnosti stroje

Pro jmenovité ztráty vzniklé ve vinutí stroje platí:

$$P_{jn} = x \cdot R_{cu} \cdot {I_{fn}}^2 \tag{2.64}$$

Pro maximální ztráty ve vinutí platí:

$$P_{jn} = x \cdot R_{cu} \cdot {I_{fmax}}^2 \tag{2.65}$$

Pro ztráty způsobené vířivými proudy ve vodiči platí:

$$P_{en} = x \cdot a_w \cdot n_u \cdot 2 \cdot \left(\frac{D_{cunorm}}{1000}\right)^4 \cdot L_m \cdot \pi^3 \cdot G_{cu} \cdot {f_n}^2 \cdot \left(\frac{B_{\delta str} \cdot \pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{32} \quad \textbf{(2.66)}$$

Pro ztráty způsobené třením v ložiskách platí:

$$P_{fr} = 0{,}06 \cdot (2 \cdot m_{rot} + m_{hr}) \cdot \frac{n_n}{60} \quad \textbf{(2.67)}$$

Pro ztráty způsobené ventilací platí:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot c_f \cdot \rho_{vz} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}\right)^3 \cdot \left(\left(\frac{D_0}{2}\right)^5 - \left(\frac{D_h}{2}\right)^5\right) \quad \textbf{(2.68)}$$

kde c_f je koeficient odporu vzduchu a ρ_{vz} je hustota vzduchu.

Celkové ztráty stroje lze vypočítat dle:

$$P_{celk} = P_{jn} + P_{en} + P_{fr} + P_{vent} \quad \textbf{(2.69)}$$

Pro celkovou účinnost stroje platí:

$$\eta = \frac{P_2 - P_{celk}}{P_2} \cdot 100 \quad \textbf{(2.70)}$$

Všechny vypočítané hodnoty generátoru se nacházejí v *Tab. 4*.

Tab. 4: Vypočítané hodnoty axiálního generátoru

Název	Označení	Velikost	Jednotka
Jmenovité napětí	U_{sn}	45.45	V
Fázové indukované napětí	U_{ifn}	27.55	V
Jmenovitý proud	I_{fn}	2.86	A
Jmenovitý moment	M_n	4.77	Nm
Max. frekvence výst. napětí	f_{max}	55	Hz
Jmenovitá frekvence výst. napětí	f_n	50	Hz
Max. proud při max. momentu	I_{fmax}	4.00	A
Činitel rozložení	k_{d1}	1.00	-
Cívková rozteč	T_c	3.00	-
Pólová rozteč	T_p	3.00	-
Poměr cívkové a pólové rozteče	β	1.00	-
Pitch factor	k_{p1}	1.00	-
Činitel vinutí	k_{w1}	1.00	-
Vnější průměr	D_0	190	mm
Vnitřní průměr	D_i	130	mm
Střední průměr	D_s	160	mm

Počet drážek	Q	18.00	-
Šířka drážky	T_{ds}	27.9	mm
Pólová rozteč	T_{ps}	83.8	mm
Pólová rozteč	T_{pi}	68.1	mm
Pólová rozteč	T_{po}	99.6	mm
Výška magnetu	L_m	30	mm
Střední obvod	O_s	503.1	mm
Tloušťka vzduchové mezery	h_{vz}	4.0	mm
Tloušťka rotorového jha	h_r	9.0	mm
Průměr hřídele	D_h	25.0	mm
Délka hřídele	l_h	200.0	mm
Tok přes cívku	φ_{cu}	$62.94 \cdot 10^{-5}$	Wb
Počet závitů (počítáno z napětí)	n_u	197.08	-
Počet vodičů na 1 cívku	n_{cu}	66	-
Počet závitů zaokrouhleno	n_f	198	-
Průřez vodiče	S_{cu}	1.33	mm^2
Průřez vodiče při více paralelních vodičích	S_{cup}	1.33	mm^2
Průměr vodiče	D_{cu}	1.30	mm
Plocha vodičů v cívce vč. izolace	S_{cusk}	122.14	mm^2
Celková plocha cívky vč. plnění	S_{celk}	$0.22 \cdot 10^{-3}$	mm^2
Šířka jedné drážky	T_{di}	22.7	mm
Hloubka drážky	h_c	9.8	mm
Indukce magnetu	B_{pm}	0.3927	T
Intenzita mg. pole magnetu	H_{pm}	$60.73 \cdot 10^4$	A/m
Tloušťka magnetu	h_m	8	mm
Střední šířka magnetu	d_{ps}	53.4	mm
Minimální šířka magnetu	d_{pi}	43.4	mm
Maximální šířka magnetu	d_{po}	63.4	mm
Výška magnetu	h_{pm}	30	mm
Minimální délka spodního čela	l_{cmin}	68.1	mm
Maximální délka spodního čela	l_{cmax}	99.6	mm
Střední délka spodního čela	l_{cstr}	247.7	mm
Odpor vinutí	R_{cu}	0.68	Ω
Aktivní hmotnost vinutí	m_{cuakt}	0.48	kg
Koeficient rozptylové magnetické vodivosti čel	λ_{1e}	0.30	-
Koeficient rozptylové magnetické vodivosti rad. části vodiče	λ_{1s}	0.30	-
Činitel statorového diferenčního rozptylu	T_{d1}	0.097	-

Část rozptylu způsobená diferenčním rozptylovým tokem	λ_{1d}	0.14	-
Celková rozptylová reaktance	X_1	0.40	Ω
Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose d	g_{eg}	0.03	-
Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose q	g_{eqq}	0.03	-
Vlastní reaktance	X_{ad}	0.31	Ω
Vlastní reaktance	X_{aq}	0.29	Ω
Celková reaktance v ose d	X_d	0.70	Ω
Indukčnost v ose d	L_d	$22\cdot10^{-4}$	H
Celková reaktance v ose q	X_q	0.69	Ω
Indukčnost v ose q	L_q	$22\cdot10^{-4}$	H
Hmotnost aktivních částí vinutí	m_{cuakt}	0.48	kg
Hmotnost ostatních částí vinutí	m_{cuo}	1.51	kg
Celková hmotnost vinutí	m_{cu}	1.99	kg
Hmotnost rotorového jha	m_{jho}	1.97	kg
Hmotnost permanentních magnetů	m_{pm}	0.34	kg
Hmotnost rotoru	m_{rot}	2.31	kg
Hmotnost hřídele	m_{hr}	0.77	kg
Celková hmotnost	m_{celk}	7.39	kg
Moment setrvačnosti permanentních magnetů	J_{pm}	$22\cdot10^{-4}$	kgm^2
Moment setrvačnosti rotorového jha	J_{jho}	$91\cdot10^{-4}$	kgm^2
Moment setrvačnosti hřídele	J_{hr}	$10\cdot10^{-5}$	kgm^2
Celkový moment setrvačnosti	J_{celk}	$22.7\cdot10^{-3}$	kgm^2
Jmenovité ztráty ve vinutí	P_{jn}	16.61	W
Maximální ztráty ve vinutí	P_{jmax}	32.65	W
Ztráty vířivými proudy ve vodiči	P_{en}	2.41	W
Ztráty v ložiskách	P_{fr}	2.70	W
Reynoldsovo číslo	R_e	$31.56\cdot10^{3}$	-
Koeficient odporu vzduchu	c_f	$21.8\cdot10^{-3}$	-
Ventilační ztráty	P_{vent}	$14.6\cdot10^{-3}$	W
Celkové ztráty	P_{celk}	21.73	W
Celková účinnost	η_{celk}	91.31	%

5 SIMULACE MAGNETICKÝCH A ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ GENERÁTORU

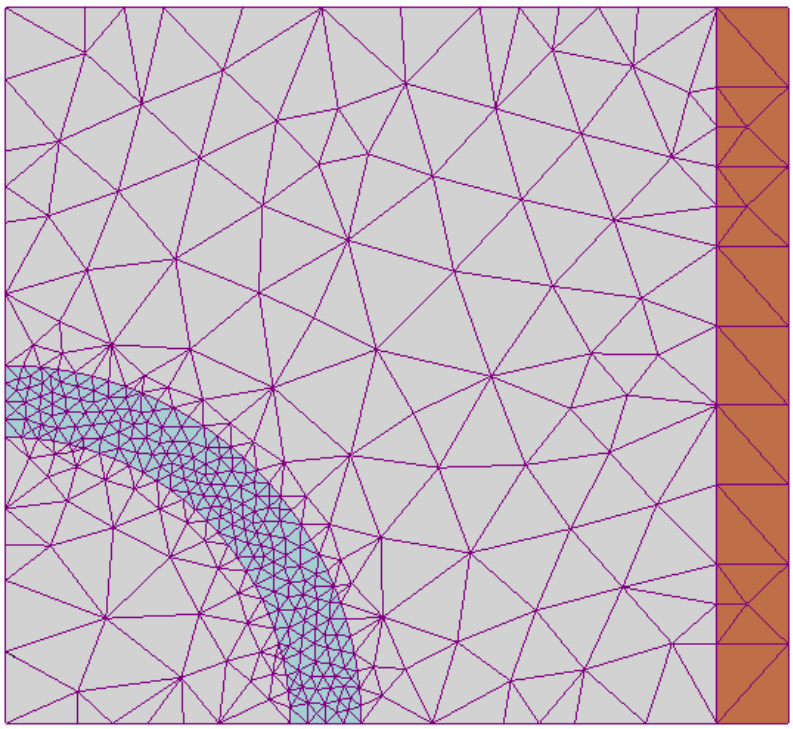
5.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků umožňuje výpočet deformací, napětí, polí, či jiných veličin u tvarově složitých součástí, kde by klasický numerický výpočet byl buď velmi složitý, nebo by vyžadoval značné zjednodušení, které by mohlo výrazně ovlivnit přesnost výsledku.

Principem metody konečných prvků (dále jen MKP) je rozložení součásti na více menších elementů (prvků), pro které již lze snadno požadované veličiny vypočítat. Spojením výsledků jednotlivých elementů v jeden celek pak dostáváme požadovaný výsledek. Tyto jednotlivé elementy by měly pro co největší přesnost výsledku splňovat následující:

- Jejich počet by měl být co největší
- Jejich tvar by měl být co nejvíce pravidelný (pro prostorové výpočty např. pravidelný čtyřstěn, krychle)
- Prvky na sebe musí navazovat

Jelikož rozdělení materiálu na mnoho menších prvků znamená také mnoho rovnic pro výpočet, využívají se pro tuto metodu především počítačové programy. Jedním z mnoha programů využívajících MKP je ANSYS Maxwell. [6]



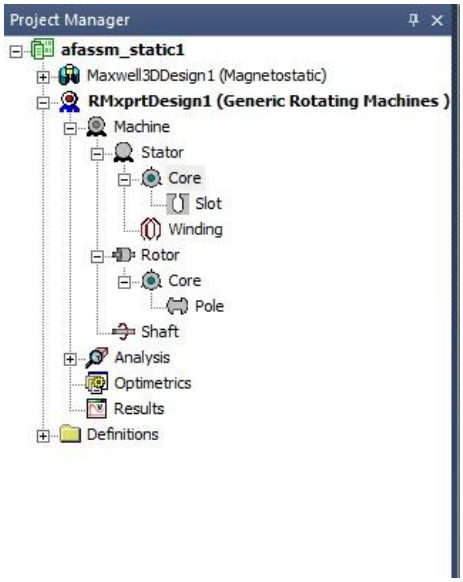
Obr. 6: Ukázka 2D sítě u metody konečných prvků

5.2 **ANSYS Maxwell**

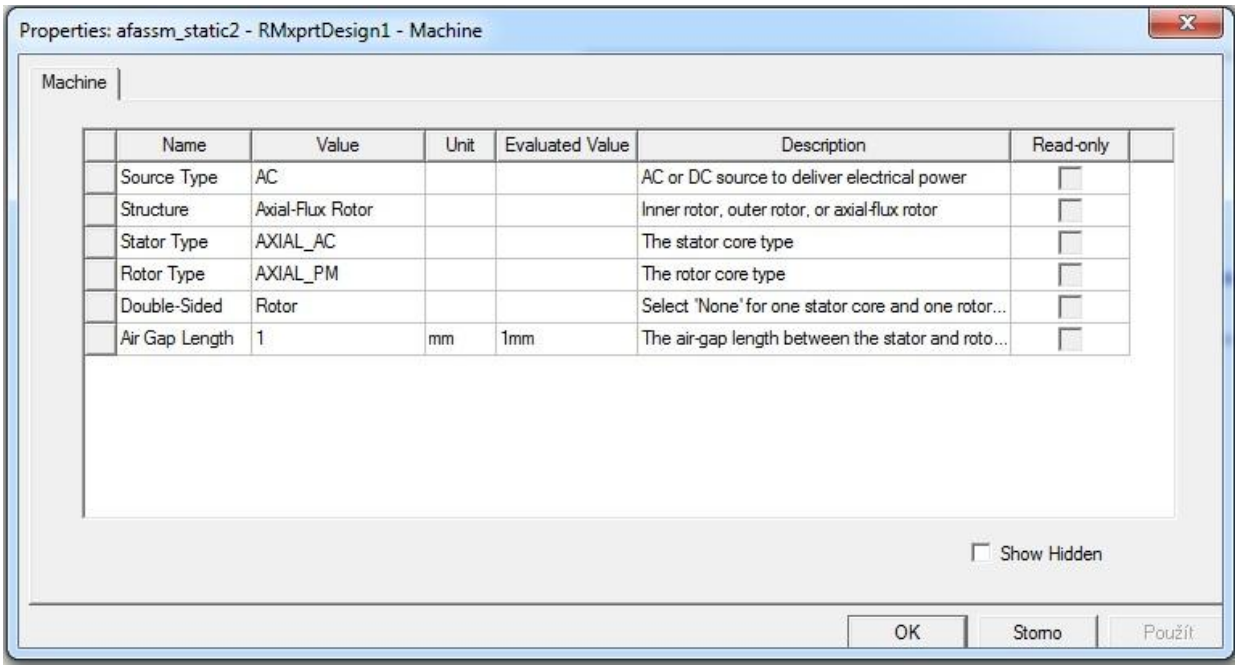
ANSYS Maxwell je program pro simulaci nízkofrekvenčních elektromagnetických polí. Využívá metodu konečných prvků, jejichž síť vytváří automaticky. Využívá se při návrhu a analýze elektromotorů, generátorů, solenoidů, transformátorů a senzorů. [7]

RMxprt je nadstavbou programu ANSYS Maxwell, která umožňuje jednoduchý návrh točivých elektrických strojů. Vyznačuje se tím, že má 13 přednastavených typů točivých strojů, u kterých lze pouze přepsáním hodnot upravovat veškeré zásadní parametry (velikost, otáčky, výkon, počet fází, typ buzení, použité vinutí, atd.).

Axiální generátor navrhnutý v této práci byl vytvořen právě pomocí nadstavby RMxprt programu ANSYS Maxwell, aby mohly být výpočtem ověřeny jeho teoretické vlastnosti. Zadané hodnoty pro vytvoření modelu byly použity z kapitoly 4. Prostředí programu je rozčleněno do několika sekcí (viz *Obr. 7*). V sekci "machine" se nastavuje o jaký typ elektrického stroje se jedná. Další sekcí je "stator", kde se nastavuje počet pólů, počet drážek pro vinutí a tvar drážky. Sekce "stator-core" obsahuje nastavení rozměrů stroje. V sekci "stator-slot" jsou definovány rozměry drážky (v tomto případě bylo ponecháno původní nastavení, protože vinutí bylo vytvořeno zvlášť v programu Autodesk Inventor). Sekce "stator-winding" obsahuje nastavení počtu závitů vinutí, průměru vodiče a typu vinutí. Ostatní sekce se týkají nastavení parametrů rotoru (rozměry rotoru, rozměry a materiál permanentních magnetů, předpokládané ztráty stroje a jmenovité otáčky). V *Obr. 8* je zobrazen příklad nastavení parametrů v sekci "machine".



Obr 7: Prostředí RMxprt

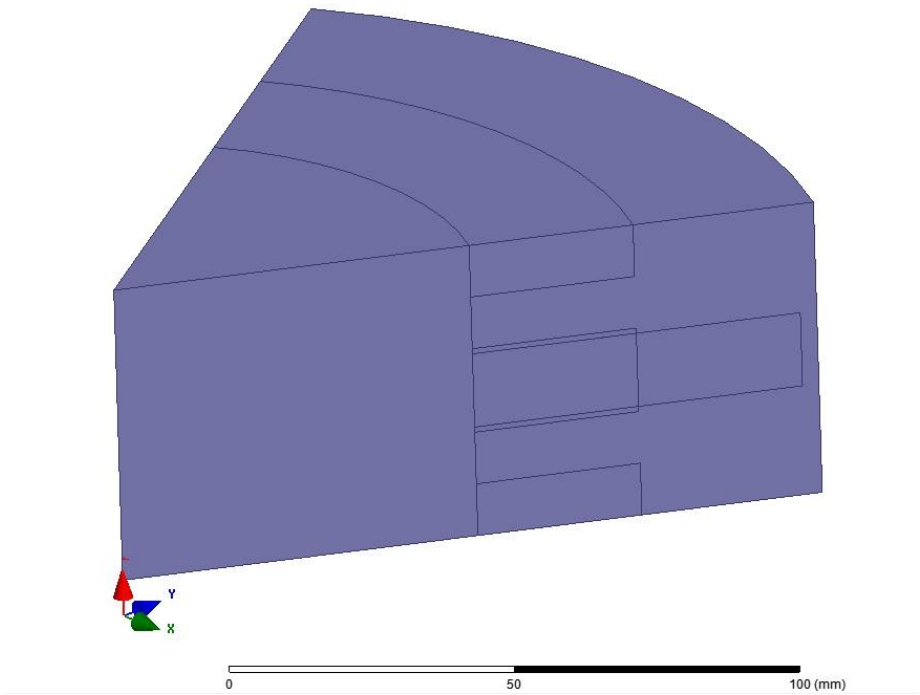


Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Source Type	AC			AC or DC source to deliver electrical power	
Structure	Axial-Flux Rotor			Inner rotor, outer rotor, or axial-flux rotor	
Stator Type	AXIAL_AC			The stator core type	
Rotor Type	AXIAL_PM			The rotor core type	
Double-Sided	Rotor			Select 'None' for one stator core and one rotor...	
Air Gap Length	1	mm	1mm	The air-gap length between the stator and roto...	

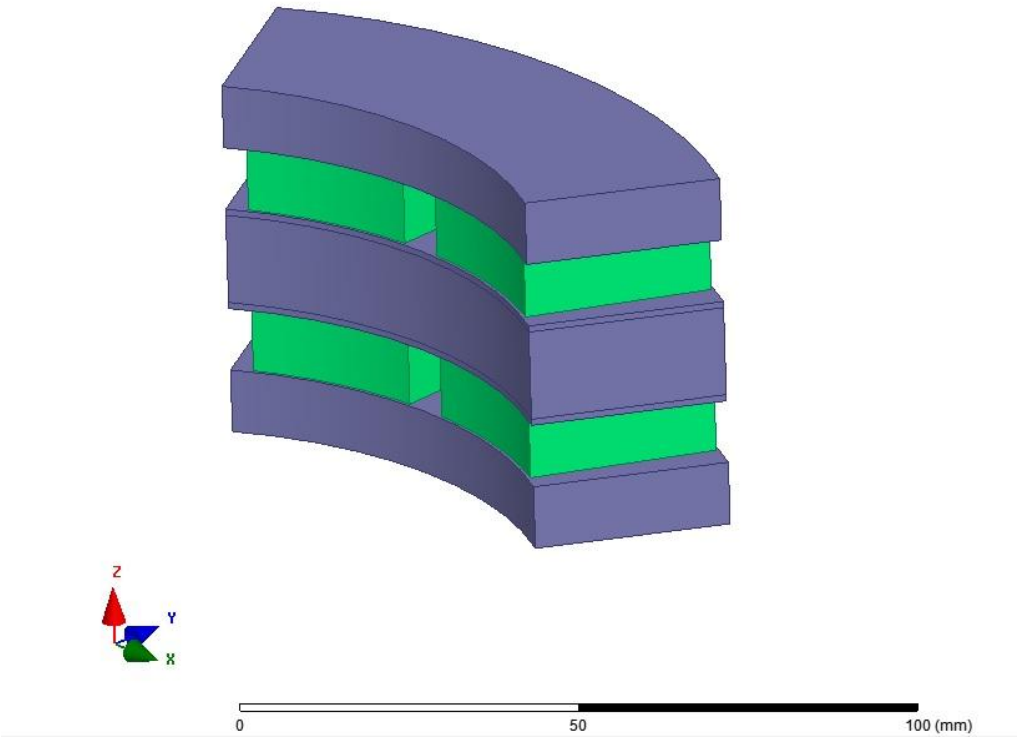
Obr 8: Příklad nastavení parametrů stroje

5.3 **Statická analýza**

Pro určení magnetické indukce ve vinutí bylo nutné nahradit v programu ANSYS Maxwell vinutí včetně uložení, vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem a okolní prostředí vakuem. Materiál permanentních magnetů byl zvolen s ohledem na jeho zadané vlastnosti (H_c=876000A/m, μ_r=1,1628). Pro analýzu byl vytvořen model pouze 1/6 generátoru, protože generátor lze rozdělit na 6 totožných částí, a použití jen jedné z nich podstatně sníží nároky na výkon počítače při výpočtech.



Obr. 9: Připravený model pro statickou analýzu



Obr. 10: Připravený model pro statickou analýzu- magnety

Následně byla vytvořena síť elementů a vypočítána magnetická indukce ve vinutí. Požadovaná hodnota je $B_{\delta str}$=0.375T. Vypočítaná magnetická indukce byla $B_{\delta str}$=0,349T (viz. *Obr. 11*). Tento rozdíl je způsoben magnetickým rozptylem, kdy magnetické siločáry vstupují do okolního prostředí, a vznikají tím ztráty. S těmito ztrátami původní výpočet rozměrů magnetů nepočítal, ale program ANSYS Maxwell již ano.

Obr. 11: Magnetická indukce ve vinutí při výšce magnetů 8mm

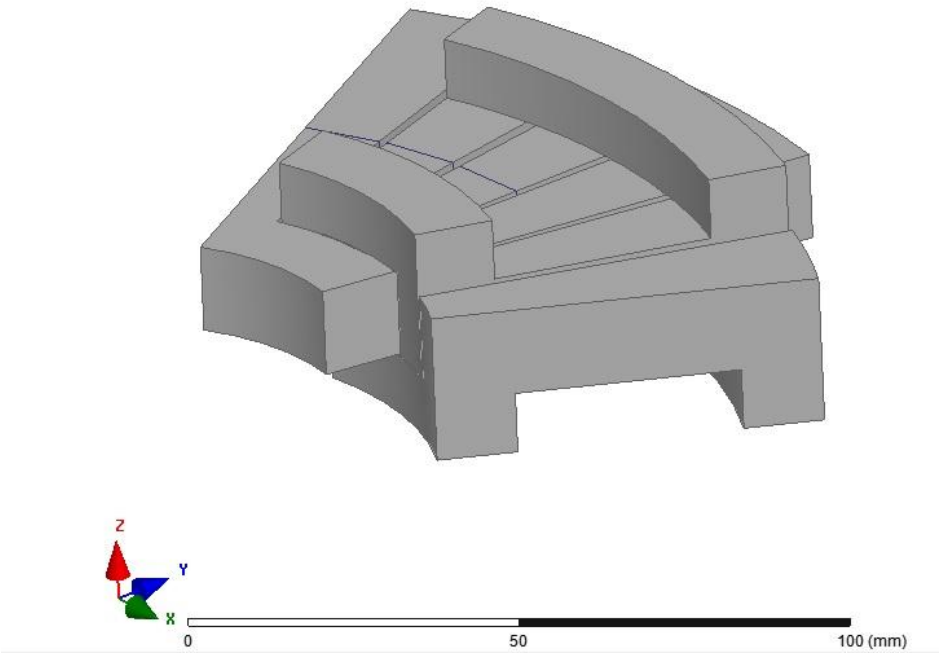
Aby bylo dosaženo požadované magnetické indukce, byla výška magnetů upravena z 8mm na 10mm. Po dalším přepočítání se její hodnota již téměř rovnala zadané hodnotě (viz. *Obr. 12*).

Obr. 12: Magnetická indukce ve vinutí při výšce magnetů 10mm

Po úpravě rozměrů permanentních magnetů lze tvrdit, že návrh generátoru byl s ohledem na magnetickou indukci ve statoru úspěšný.

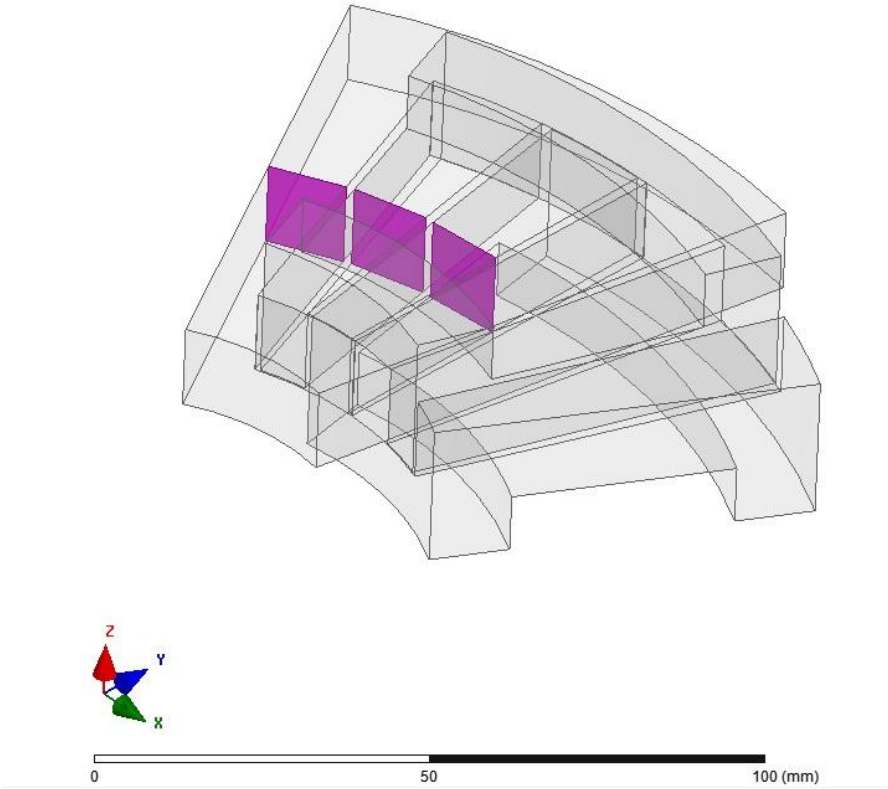
5.4 **Transientní analýza**

Pro transientní analýzu (v překladu analýzu přechodných dějů) byl nejprve vytvořen model vinutí v programu Autodesk Inventor. Tento program byl zvolen s ohledem na jednoduchost obsluhy. Vinutí by se dalo vytvořit i přímo v programu ANSYS Maxwell, ale bylo by to o poznání složitější. Jednotlivé závity cívky byly nahrazeny vinutím obdélníkového průřezu o jednom závitu tak, aby tento průřez představoval součet ploch jednotlivých závitů v řezu (viz. *Obr. 13*).

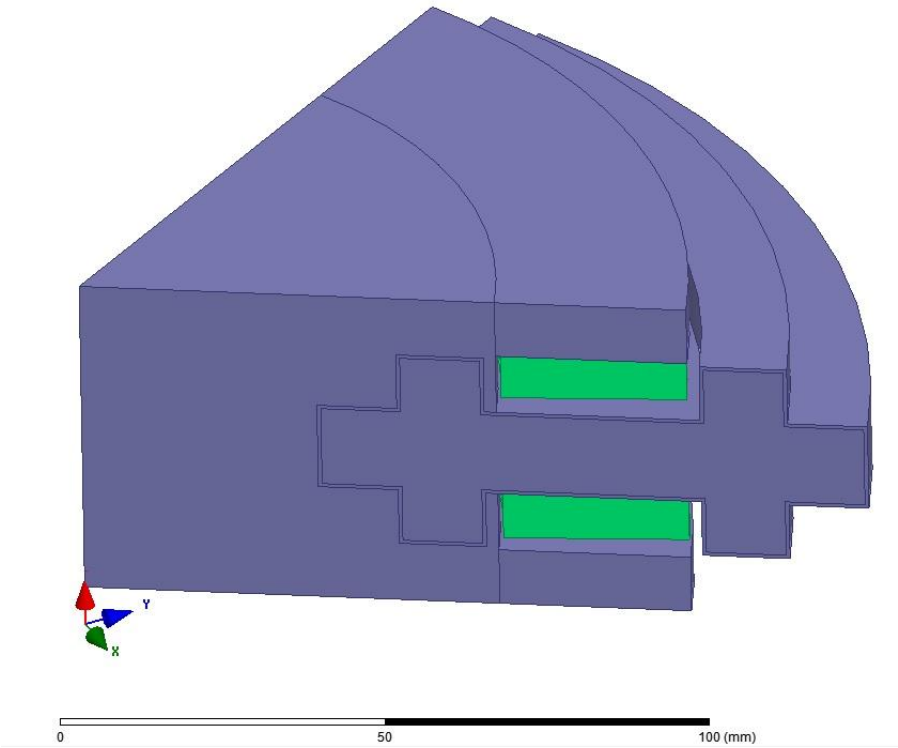


Obr. 13: Model vinutí pro transientní analýzu

Počet závitů a průřez vodiče se potom již nastavil přímo v programu ANSYS Maxwell. Pro jednotlivé cívky bylo potřeba vytvořit tzv. "coil terminals", které definují, která část objektu představuje jednotlivé cívky (viz. *Obr. 14*).



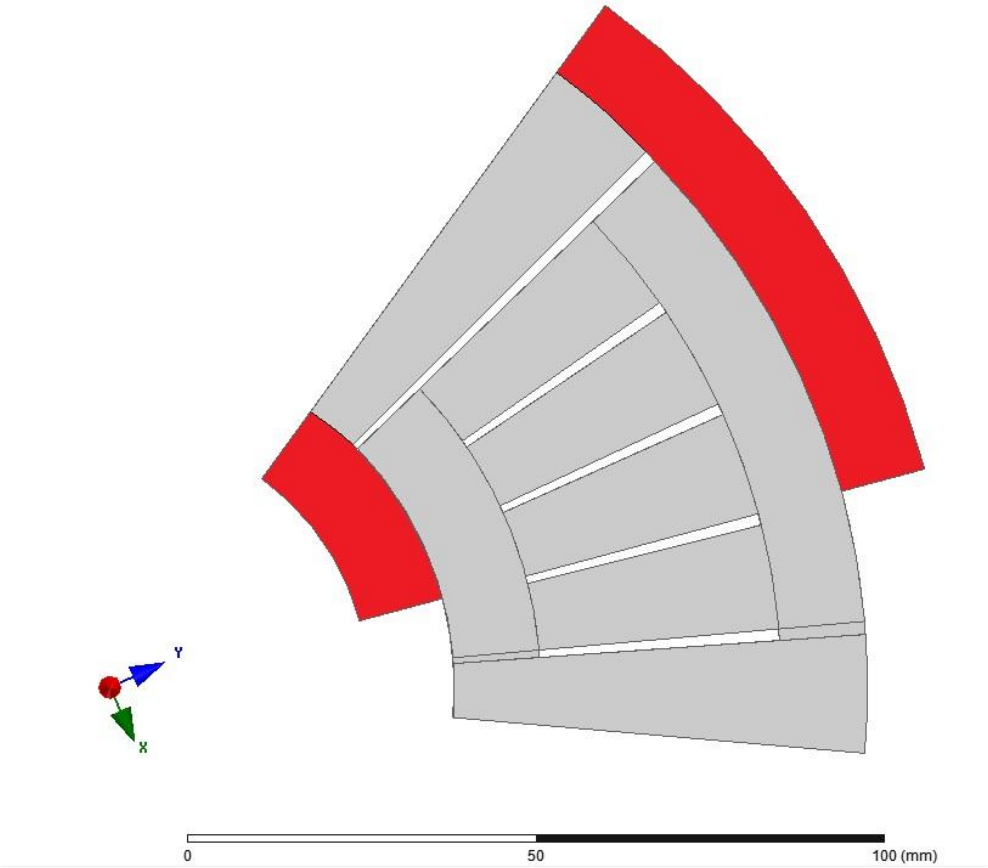
Obr. 14: Zobrazení "coil terminals"



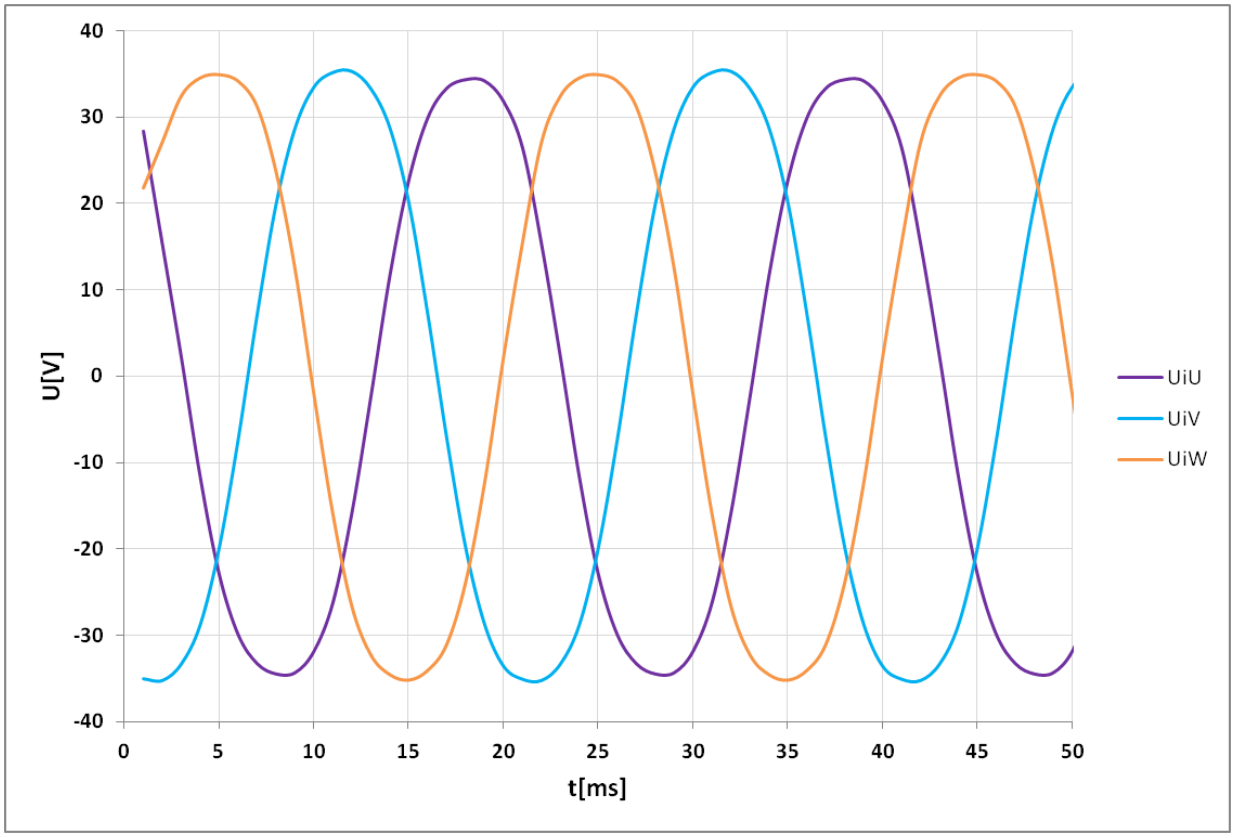
Obr. 15: Zobrazení celého modelu pro transientní analýzu

5.4.1 Transientní analýza naprázdno

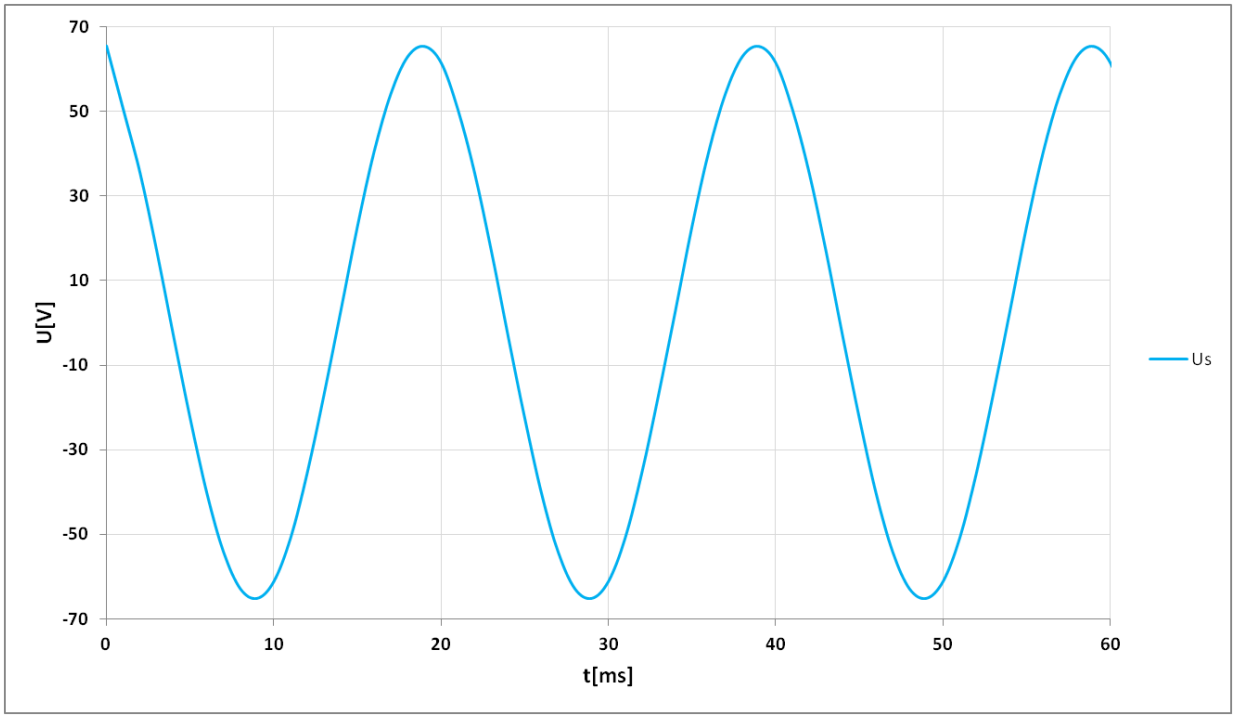
Analýza naprázdno určuje fázové indukované napětí naprázdno a sdružené napětí naprázdno. Čas simulace byl nastaven na 0.3614s, což odpovídá při jmenovitých otáčkách n_n=500/min 3.012 otáčkám. Délka kroku simulace byla nastavena na 1ms, což je dostatečně krátký čas na to, aby vykreslené výsledné časové průběhy byly hladké. Výsledné efektivní hodnoty fázových napětí jsou 26.03V pro fázi U, 27.17V pro fázi V a 27.12V pro fázi W. Pro fázi U je toto napětí nižší z důvodu vyššího čela vinutí této fáze (viz. *Obr. 16*). Efektivní hodnota indukovaného fázového napětí vypočítaného v kapitole 4 je 27.55V. Napětí vypočítaná v transientní analýze jsou nepatrně menší z důvodu magnetického rozptylu do okolního prostředí. Výsledné časové průběhy indukovaných fázových napětí jsou zobrazeny v *Obr. 17*. Efektivní hodnota sdruženého napětí mezi fází U a V vypočítaného v ANSYS Maxwell je 46.34V. Efektivní hodnota sdruženého napětí vypočítaného v kapitole 4 je 45.45V. Časový průběh sdruženého napětí je zobrazen v *Obr. 18*.



Obr. 16: Zobrazení vyššího čela vinutí fáze U



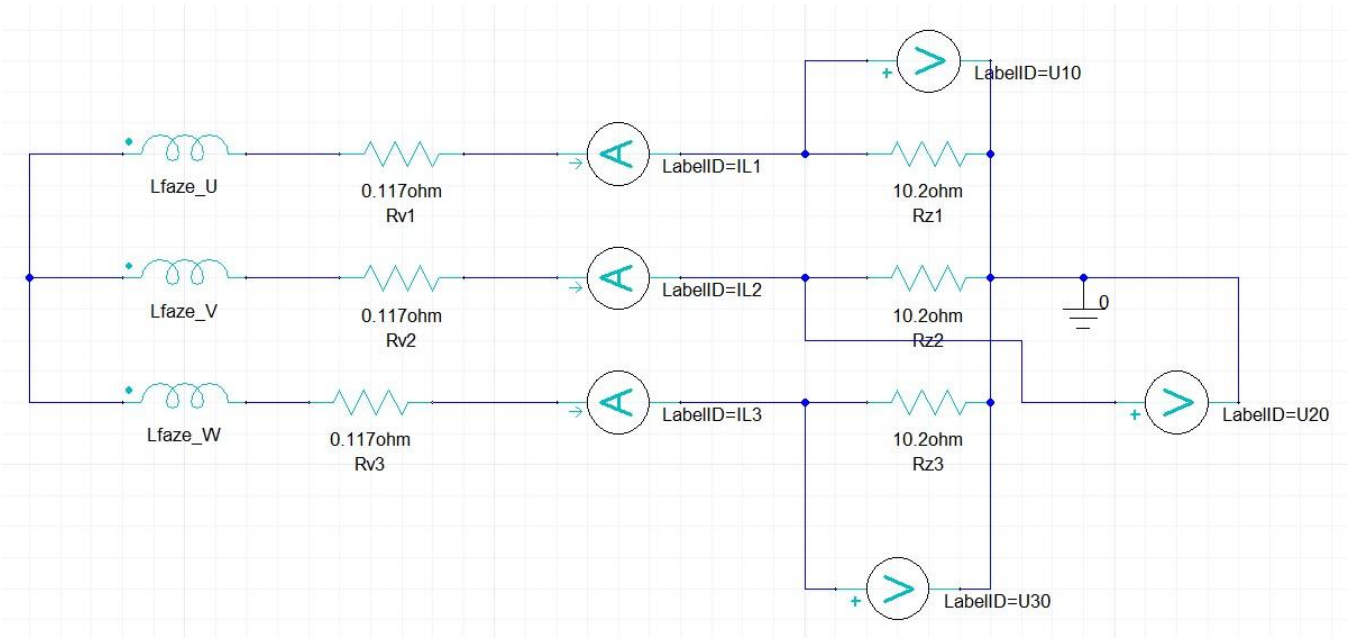
Obr. 17: Indukovaná fázová napětí naprázdno



Obr. 18: Sdružené napětí mezi fází U a V naprázdno

5.4.2 Transientní analýza při zatížení

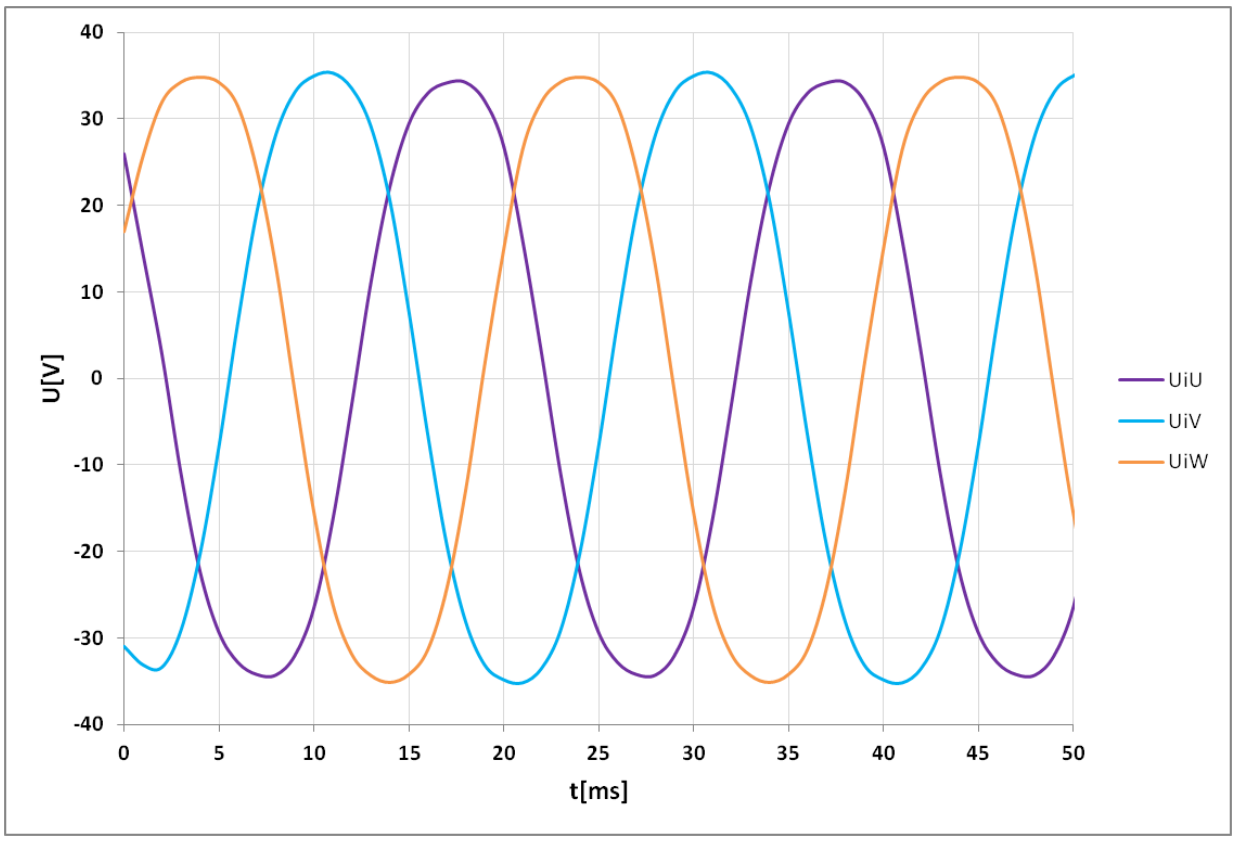
Pro analýzu při zatížení bylo potřeba v nadstavbě Circuit Editor programu ANSYS Maxwell vytvořit externí obvod (viz. *Obr. 19*), který si pak program přiřadí na výstup generátoru a výpočty dále provádí s ohledem na tento připojený obvod.



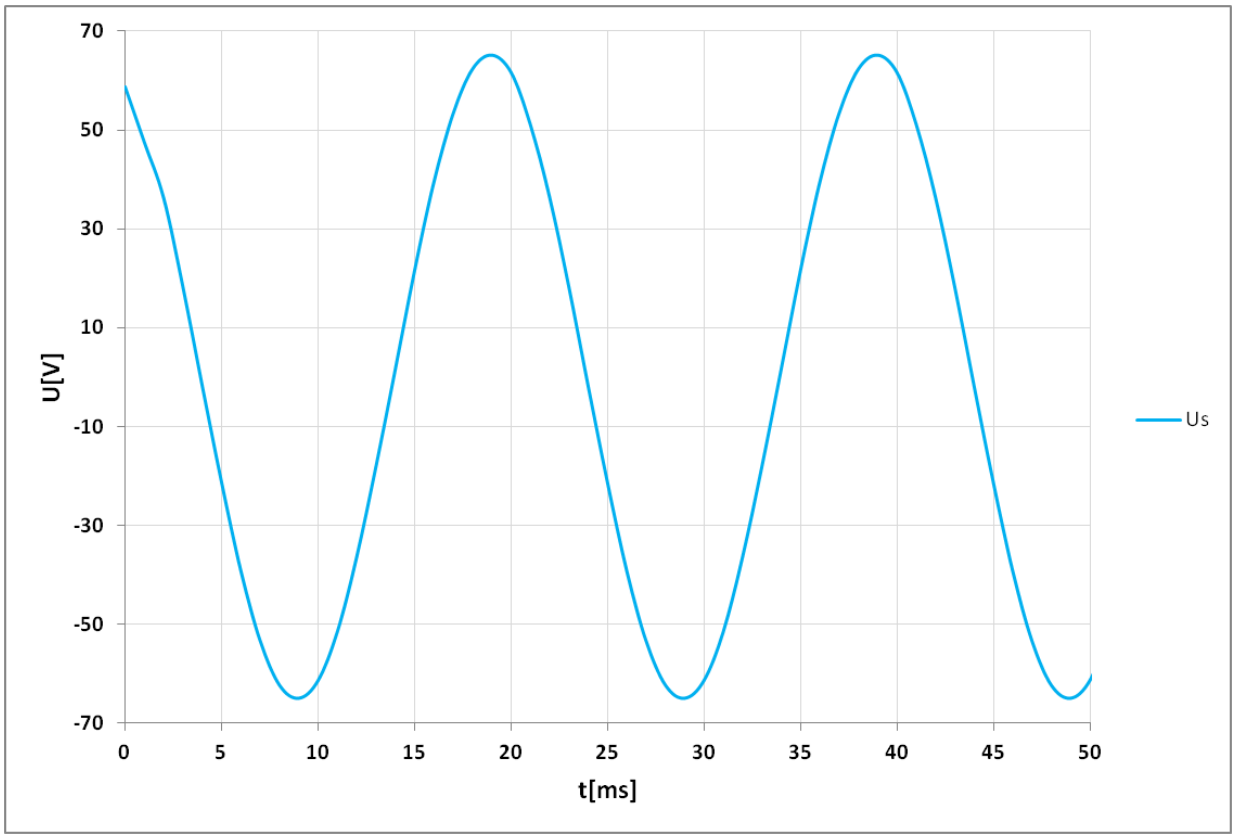
Obr. 19: Externí obvod pro analýzu při zatížení

Cívky Lfaze_U, Lfaze_V a Lfaze_W představují indukčnosti cívek jednotlivých fází generátoru. Rezistory Rv1, Rv2 a Rv3 představují odpory vinutí jednotlivých fází vinutí. Rezistory Rz1, Rz2 a Rz3 představují odpory na výstupu generátoru. Jejich hodnota byla zvolena tak, aby bylo při jmenovitém napětí generátoru dosaženo jmenovitého výkonu. Dále se v obvodu nacházejí voltmetry a ampérmetry pro měření proudů a napětí v obvodu.

Čas simulace a otáčky zůstaly stejné jako při analýze naprázdno. Výsledné efektivní hodnoty fázových napětí jsou 25.80V pro fázi U, 27.41V pro fázi V a 26,84V pro fázi W. Výsledná napětí se opět velmi blíží požadovanému fázovému napětí z kapitoly 4. Efektivní hodnota sdruženého napětí mezi fází U a V při zatížení je 46.82V. Průběhy těchto napětí jsou vyobrazeny níže v *Obr. 20* a *Obr. 21*.

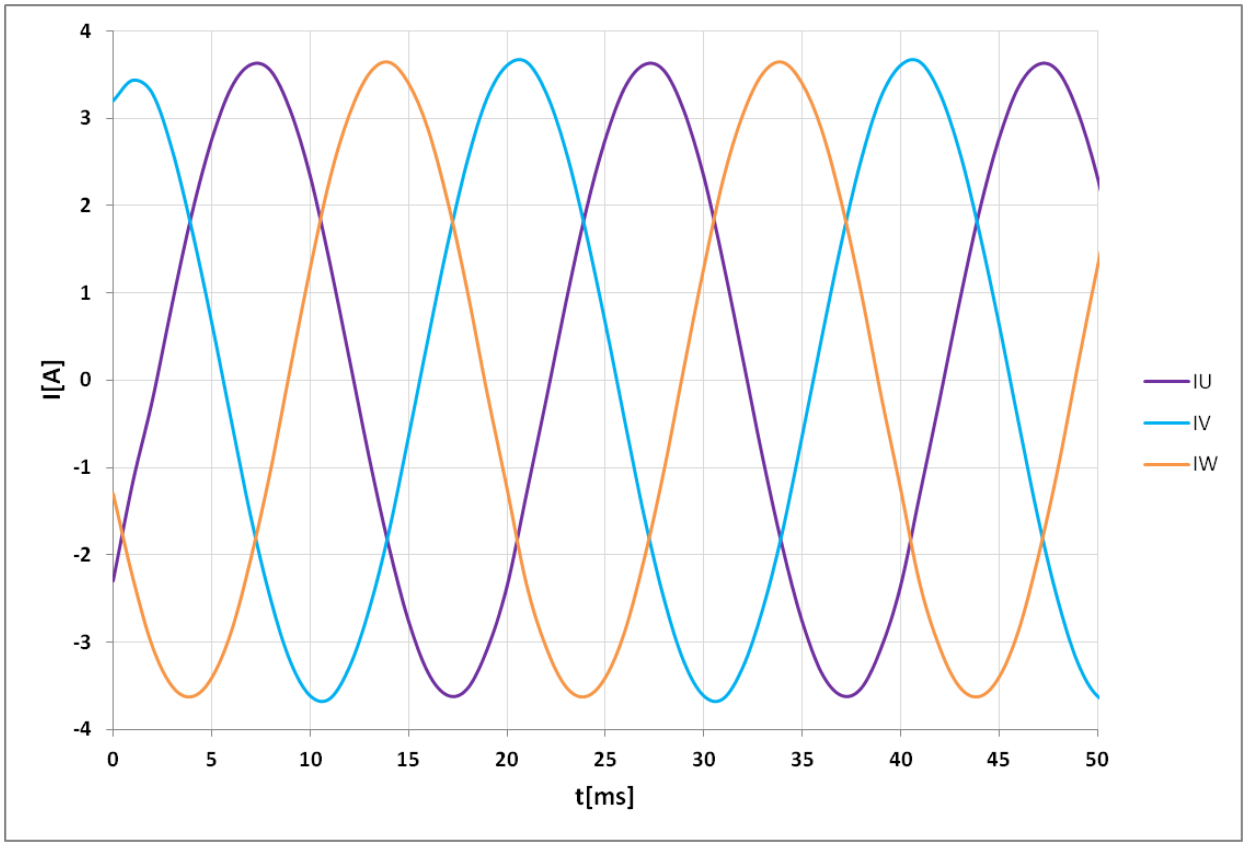


Obr. 20: Indukovaná fázová napětí při zatížení



Obr. 21: Sdružené napětí mezi fází U a V při zatížení

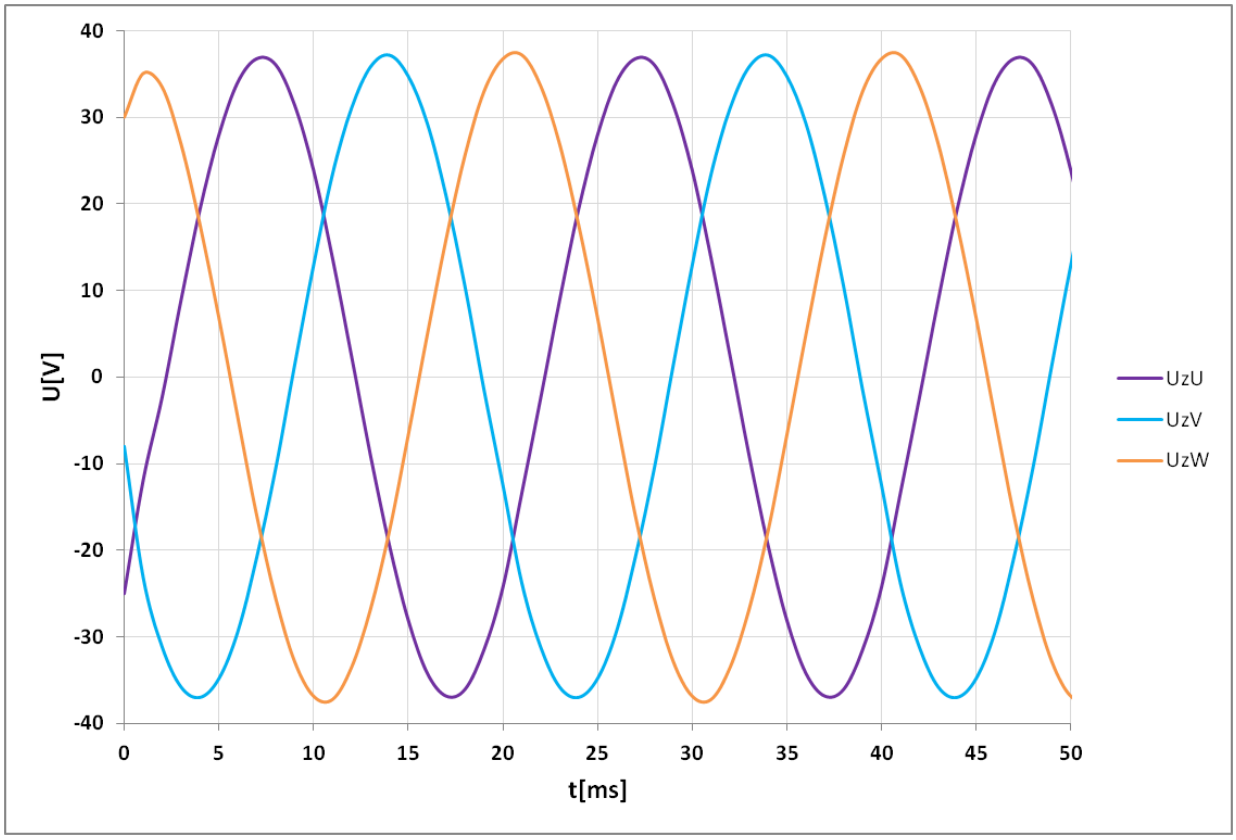
Dále byly analýzou zjištěny efektivní hodnoty proudů tekoucích zátěží. Pro zátěž Rz1 je hodnota proudu 2.55A, pro Rz2 2.58A a zátěží Rz3 teče taktéž 2.58A. Efektivní hodnota proudu při výkonu 250W vypočítaná v kapitole 4 je 2.86A. Pokles proudů při simulaci mohla způsobit nevhodně zvolená hodnota rezistorů Rz1, Rz2 a Rz3. Průběhy těchto proudů jsou zobrazeny níže v *Obr. 22*.



Obr. 22: Průběhy proudů tekoucích zátěží

Dále byly simulací zjištěny efektivní hodnoty napětí přímo na rezistorech zátěže. Jejich hodnoty jsou 26.02V na rezistoru Rz1, 26.3V na rezistoru Rz2 a 26.30V na rezistoru Rz3. Časové průběhy těchto napětí jsou zobrazeny v *Obr. 23*.

V další části simulace byl ověřen výkon na zátěži při použití čistě odporové zátěže Rz1, Rz2 a Rz3. Střední hodnota výkonu je 203.46W. Zde je opět zřejmé, že byla nevhodně zvolena velikost rezistorů zátěže. Požadovaný výkon je 250W.



Obr. 23: Průběhy napětí na zátěži

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout axiální generátor pro malou vodní elektrárnu na základě zadaných parametrů. V první části práce byla provedena literární rešerše, která porovnává výhody a nevýhody radiálních a axiálních strojů, popisuje možné typy axiálních strojů, různé typy jejich vinutí a různá provedení. Dále pak v tabulce porovnává možné typy axiálních strojů z hlediska jejich účinností. Na základě této rešerše byl vybrán vhodný typ axiálního stroje. Jako nejvhodnější z hlediska účinnosti a jednoduchosti se jeví bezželezný axiální generátor.

V další části práce byly definovány parametry potřebné pro návrh generátoru. Některé z nich byly přímo zadané, jiné (zejména materiálové konstanty) byly určeny z tabulek, ostatní byly odhadnuty. Dále byl proveden teoretický výpočet rozměrů generátoru, počtu závitů ve vinutí, počtu cívek, velikosti a počtu permanentních magnetů, hmotností jednotlivých částí, jejich momentů setrvačností, celkové účinnosti a ostatních parametrů nezbytných pro vytvoření modelu v programu ANSYS Maxwell.

V poslední části byl navržený generátor vymodelován v nadstavbě RMxprt programu ANSYS Maxwell. Pro vytvoření modelu byly použity vypočítané rozměry a jiné parametry z druhé části práce. Vinutí bylo zvlášť vymodelováno v programu Autodesk Inventor. Metodou konečných prvků byly ověřeny skutečné vlastnosti generátoru. Byla provedena statická analýza, která dokazuje, že ve vinutí generátoru bude po úpravě rozměrů permanentních magnetů požadovaná magnetická indukce B=0.375T. Následná transientní analýza zase určuje elektrické vlastnosti navrženého generátoru. Všechna napětí zjištěna pomocí metody konečných prvků jsou téměř shodná s požadovanými vypočítanými napětími. Proud zátěže a výkon na zátěži vykazují drobné odchylky od požadovaných hodnot. Chyba nenastala při návrhu generátoru, ale při samotné simulaci v programu ANSYS Maxwell zvolením nevhodných velikostí rezistorů zátěže. Lze tedy tvrdit, že navržený generátor bude mít požadované vlastnosti. Všechny body zadání byly splněny.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] 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.

[2] Eletricbike: Motor tech: Learn the Terms-Part 1 [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://www.electricbike.com/motor-tech-learn-the-terms-part1/

[3] 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.

[4] J. F. Gieras, M. J. Kamper, R.-J. Wang, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, 2nd Edition*. Springer, 2008, p. 362.

[5] SKURKA, T. *Návrh synchronního generátoru s permanentním magnetem pro malou vodní elektrárnu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

[6] BÍREŠ, P. Numerické metody výpočtu elektromagnetického pole. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 54 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

[7] Ansys Maxwell. *Svsfem* [online]. Brno [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: https://www.svsfem.cz/produkty/elektronika/ansys-maxwell

PŘÍLOHY

Příloha 1: Snímek obrazovky s výpočty parametrů generátoru v MS Excel

Název	Označení	Velikost	Jednotka
Sdružené napětí při maximálních provozních otáčkách	U_{zmax}	50	V
Zapojení		hvězda	
Předpokládaná účinnost stroje	η	0.9	-
Jmenovitý výstupní výkon	P_2	250	W
Předpokládaný účiník	cos φ	1	-
Jmenovité otáčky	n_n	500	1/min
Počet fází	x	3	-
Maximální provozní otáčky	n_{max}	550	1/min
Maximální moment	M_{max}	6.68	Nm
Střední hodnota magnetické indukce ve vinutí	$B_{ŠSF}$	0.25	T
Lineární proudová hustota	A_m	9500	A/m
Poměr vnějšího a vnitřního průměru	k_d	0.6842	-
Koeficient poklesu napětí	$k_{ΔU}$	1.05	-
Pólové krytí	α_{PKV}	0.637	-
Počet pólových dvojic	p	6	-
Počet paralelních drátů	a_w	1	-
Maximální proudová hustota ve vodiči	J_{max}	3	A/mm^2
Počet drážek na pól a fázi	q	1	-
Koeficient plnění drážky	c	0.55	-
Intenzita magnetického pole magnetu	H_c	876000	A/m
Permeabilita vakua	μ_0	1.25664E-06	H/m
Relativní permeabilita	μ_r	1.1628	-
Vodivost mědi při 75 °c	G_{Cu}	47000000	S/m
Hustota mědi	ρ_{Cu}	8800	kg/m^3
Odhad saturační konstanty	k_{sat}	1	-
Poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové v ose d	k_{fd}	1	-
Poměr amplitudy 1. harmonické složky indukce k celkové v ose q	k_{fq}	1	-
Hustota železa	ρ_{Fe}	7850	kg/m^3
Hustota permanentních magnetů	ρ_{pm}	7700	kg/m^3
Hustota vzduchu	ρ_{vz}	1.2	kg/m^3
Dynamická viskozita vzduchu	η_{vz}	0.000018	Ns/m^2

Název	Označení	Velikost	Jednotka
Jmenovité napětí	U_{zn}	45.4545	V
Fázové indukované napětí	U_{fn}	27.5554	V
Jmenovitý proud	I_{fn}	2.8579	A
Jmenovitý moment	M_n	4.7747	Nm
Max. frekvence výst. napětí	f_{max}	55.0000	Hz
Jmenovitá frekvence výst. napětí	f_n	50.0000	Hz
Max. proud při max. momentu	I_{fmax}	4.0010	A
Činitel rozložení	k_{p1}	1.0000	-
Cívková rozteč	T_c	3.0000	-
Pólová rozteč	T_p	3.0000	-
Poměr cívkové a pólové rozteče	β	1.0000	-
Pitch factor	k_{p1}	1.0000	-
Činitel vinutí	k_{w1}	1.0000	-
Vnější průměr	D_0	0.1902	m
Vnitřní průměr	D_i	0.1301	m
Střední průměr	D_s	0.1601	m
Počet drážek	Q	18.0000	-
Šířka drážky	T_{ds}	0.0279	m
Pólová rozteč	T_{ps}	0.0838	m
Pólová rozteč	T_{pi}	0.0681	m
Pólová rozteč	T_{po}	0.0996	m
Výška magnetu	L_m	0.0300	m
Střední obvod	O_s	0.5031	m
Tloušťka vzduchové mezery	h_{vz}	0.0040	m
Tloušťka rotorového jha	h_r	0.0090	m
Průměr hřídele	D_h	0.0250	m
Délka hřídele	l_h	0.2000	m
Tok přes cívku	ϕ_{Cu}	0.0006	Wb
Počet závitů (počítáno z napětí)	n_u	197.0818	-
Počet vodičů na 1 cívku	n_{cu}	66.0000	-
Počet závitů zaokrouhleno	n_f	198.0000	-

S_{cunorm}	D_{cunorm}
1.850573	1.400