

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Generátor pro malou vodní elektrárnu

Bakalářská práce

Jaromír Šejnoha

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Zadání bakalářské / diplomové práce

Příjmení a jméno studenta (osobní číslo - nepovinné)	Jaromír Šejnoha
Zkratka pracoviště	MTI
Datum zadání BP/DP	8. 10. 2010
Plánované datum odevzdání	20. 5. 2010
Rozsah grafických prací	dle potřeby dokumentace
Rozsah průvodní zprávy	35 stran
Název BP/DP (česky)	Generátor pro malou vodní elektrárnu
Název BP/DP (anglicky)	Generator of small hydroelectric power plant
Zásady pro vypracování BP/DP (text nijak neformátujte, pouze očísľujte jednotlivé body .. 1) ... 2) ... atd. a každý bod uveďte jako nový odstavec):	
<ol style="list-style-type: none"> 1) Proveďte teoretický rozbor pomaluběžného generátoru dle zadaných parametrů. 2) Vyberte vhodný generátor ze sériově vyráběných výrobků bez úprav, případně s malými úpravami (převinutí, výměna ložisek a těsnění) – proveďte rešerši trhu. 3) V případě potřeby upravte sériově vyrobený generátor. 4) Zakoupený/upravený generátor vyzkoušejte v laboratorních podmínkách dle zadaných parametrů. 5) Výsledky přehledně zdokumentujte a připojte odborný komentář. 	
Seznam odborné literatury (text nijak neformátujte, pouze každou položku uveďte jako nový odstavec):	
<ul style="list-style-type: none"> • BARTOŠ Václav [et al.]. Elektrické stroje. Plzeň : ZČU, 2006. 139 s. • CIGÁNEK Ladislav. Elektrické stroje : (Působení, provedení a navrhování). Praha : Vědecko - technické nakladatelství, 1950. 801 s. Sg. A 43896 • MRAVEC, Rudolf. Elektrické stroje a přístroje : Navrhování elektrických strojů točivých. Praha : SNTL, 1986. 235 s. • MRAVEC, Rudolf. Elektrické stroje a přístroje : Elektrické přístroje. 2. Praha : SNTL, 1987. 259s. • POKORNÝ Karel. Stavba elektrických strojů. 1 Praha : SNTL, 1981. 185 s. Sg. B 27773/1 • VOREL, Pavel. Výkonové elektromechanické systémy v silničních vozidlech. Brno, 2005. 137 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně. 	
Vedoucí BP/DP	Ing. Leoš Beran, Ph.D. MTI
Konzultant BP/DP (u externích pracovníků uveďte plný název pracoviště – firmy)	Ing. Miroslav Štěrba, MIRIS, Taussigova 1172 / 223, Praha 8, 182 00.

Abstrakt

Cílem této práce je nalézt na trhu vhodný typ generátoru pro turbínu Setur, který má nahradit již stávající generátor s převodem. Zařízení bude provozováno v ostrovním režimu, tedy bez připojení do komerční elektrické sítě. V první části je popsán princip činnosti a konstrukce turbíny Setur. Další část je věnována rešerši sériově vyráběných generátorů. V závěru práce je proveden výpočet synchronního generátoru s permanentními magnety.

Abstract

The aim of this thesis is to find a suitable type of generator for the turbine Setur which can replace the current generator with a gear. The device will be used in the insular mode, it doesn't need to be connected with electric network. There is a process of function and construction of the turbine Setur described in the first part. The next one is dedicated to the research of serial manufactured generators. Finally there is a calculation of synchronic type of generator with permanent magnets.

Klíčová slova

Synchronní pomaluběžný generátor; malá vodní elektrárna; bezlopatková turbína

Keywords

Low speed synchronous generator; small hydraulic power plant; turbine without blades

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „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 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 následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Liberci dne

Podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mě svými radami přispěli k vypracování této práce. Především však mému vedoucímu bakalářské práce ing. Leoši Beranovi, Ph.D., za jeho cenné rady a připomínky, pod jehož dohledem práce vznikla.

Obsah

Zadání	2
Abstrakt (Abstract)	4
Klíčová slova (Keywords)	5
Prohlášení	6
Poděkování	6
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam symbolů a zkratek	11
1. Úvod	15
2. Turbína Setur	16
2.1 Princip činnosti	16
2.2 Konstrukce	17
2.2.1 Rotor	17
2.2.2 Stator	17
2.2.3 Hřídel	17
2.2.3 Přivaděč vody	18
2.3 Výhody a použití	18
2.4 Mechanický potenciál turbíny DVE 120 a nevýhody současného řešení	18
3. Požadované parametry generátoru pro MVE s BT	19
3.1 Výkon při daných otáčkách a výstupním napětí	19
3.2 Konstrukční parametry	19
3.3 Použití	19
4. Rešerše trhu	20
4.1 GENERÁTOR 1.....	20
4.1.1 Technické údaje a cena	21
4.1.2 Zhodnocení pro využití na turbínu DVE 120	21
4.2 GENERÁTOR 2	22
4.2.1 Technické údaje a cena	22
4.2.2 Zhodnocení pro využití na turbínu DVE 120	23
4.3 GENERÁTOR 3	23
4.3.1 Technické údaje a cena	24
4.3.2 Zhodnocení pro využití na turbínu DVE 120	24
4.4 Rozbor energetického zisku při použití GENERÁTORU 1	24
4.4.1 Generátor Agroplast Olešnice	25
4.4.2 Generátor GENERÁTOR 1	25
4.4.3 Rozdíl ve výrobě elektrické energie	25
5. Synchronní generátor	27
5.1 Konstrukce	27
5.2 Princip činnosti	27
5.3 Použití permanentních magnetů místo budícího vinut	28
5.3.1 Permanentní magnety	29
5.3.2 Demagnetizační křivka	30
6. Návrh synchronního generátoru s permanentními magnety na rotoru	31
6.1 Vstupní parametry	34
6.2 Návrh	34
6.3 Přehled vypočtených hodnot generátoru s PM	50
7. Závěr	53
Použitá literatura	54

Seznam příloh	56
---------------------	----

Seznam obrázků

Obr. 2-1. Pohyby rotoru [5]	16
Obr. 2-2. Turbína SETUR [5]	17
Obr. 4-1. Generátor 1 [6]	20
Obr. 4-2. Provedení statoru a rotoru generátoru 2 [7]	22
Obr. 4-3. Generátor 3 [8]	23
Obr. 5-1. a) princip činnosti generátoru, b) průběh ind. napětí v cívkách kotvy [9]	28
Obr. 5-2. Provedení s a) vnějším rotorem, b) vnitřním rotorem [10]	29
Obr. 6-1. Magnetizační křivka materiálu M800-50A [4]	35
Obr. 6-2. Závislost c na B_y materiálu M800-50A [4]	35
Obr. 6-3. Rozměry drážky [4]	39
Obr. 6-4. Rozměry závitů [4]	46

Seznam tabulek

Tab. 2-1. Rozsah použití turbíny DVE 120	18
Tab. 4-1. Seznam generátorů	20
Tab. 4-2. Údaje od výrobce DVE [6]	21
Tab. 4-3. Zhodnocení generátoru 1	21
Tab. 4-4. Údaje od výrobce Alxion [7]	22
Tab. 4-5. Zhodnocení generátoru 2	23
Tab. 4-6. Údaje od výrobce Ginlong [8]	24
Tab. 4-7. Zhodnocení generátoru 3	24
Tab. 6-1. Vstupní parametry generátoru	34
Tab. 6-2. Vypočtené hodnoty generátoru	50

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Název veličiny	Jednotka
a	Počet paralelních větví vinutí	-
b_1	Rozměr drážky	m
b_4	Rozměr drážky	m
b_{4c}	Rozměr drážky	m
b_5	Rozměr drážky	m
b_{5c}	Rozměr drážky	m
b_d	Šířka zubu statoru	m
B_0	Koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
B_{jr}	Magnetická indukce v rotorovém jhu	T
B_{js}	Magnetická indukce ve statorovém jhu	T
B_{max}	Maximální hodnota indukce ve vzduchové mezeře	T
B_r	Remanentní magnetická indukce PM	T
B_z	Magnetická indukce zubu statoru zdánlivá	T
B_{zs}	Magnetická indukce zubu skutečná	T
B_{PM}	Magnetická indukce PM	T
BT	Bezlopatková turbína	-
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T
c_{jr}	Koeficient rozptylu v rotorovém jhu	-
c_{js}	Koeficient rozptylu ve statorovém jhu	-
$\cos\varphi$	Účinník	-
D_{jr}	Střední průměr rotorového jha	m
D_{js}	Střední průměr statorového jha	m
D_r	Vnější průměr rotoru	m
D_s	Vnitřní průměr statoru	m
D_{se}	Vnější průměr statorového jha	m
E_{PM}	Napětí indukované PM(fázové efektivní)	V
f	Frekvence výstupního napětí	Hz
F_m	Magnetomotorické napětí	A
g	Tíhové zrychlení	m/s ²
G	Generátor	-
h_1	Rozměr drážky	mm
h_2	Rozměr drážky	mm
h_3	Rozměr drážky	mm
h_4	Rozměr drážky	mm
h_5	Rozměr drážky	mm
h_6	Rozměr drážky	mm
h_g	Účinnost generátoru	%
h_m	Mechanická účinnost turbíny	%
h_{jr}	Výška rotorového jha	m
h_{js}	Výška statorového jha	m
h_p	Účinnost ozubeného převodu	%
h_{PM}	Výška permanentního magnetu	m
h_r	Celková ztrátová výška	m
H	Spád	m
H_c	Koercitivní síla PM	A/m
H_{h2o}	Spád vody	m
H_{jr}	Intenzita magnetického pole rotorového jha	A/m

H_{js}	Intenzita magnetického pole statorového jha	A/m
H_v	Užitný spád	m
H_z	Intenzita magnetického pole zubu zdánlivá	A/m
H_{zs}	Intenzita magnetického pole zubu skutečná	A/m
I_s	Proud statoru	A
J_s	Proudová hustota pro vinutí statoru	A/m ²
k_c	Carterův koeficient	-
k_{Cus}	Činitel plnění vinutí	-
k_{Fe}	Činitel plnění železa	-
k_{Fejs}	Korekční koef. pro ztráty v Fe pro statorové jho	-
k_{Fez}	Korekční koef. pro ztráty v Fe pro statorové zuby	-
k_{hz}	Hydraulické ztráty přívodního potrubí	%
k_v	Koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
k_w	Činitel vinutí	-
k_{δ_1}	Koeficient rozptylové indukčnosti ve vzduchové mezeře	-
k_{δ_2}	Koeficient rozptylové indukčnosti ve vzduchové mezeře	-
k_{δ}	Koeficient rozptylové indukčnosti ve vzduchové mezeře	-
k_p	Koeficient pro výpočet mechanických ztrát	-
l	Délka jádra generátoru	m
l'	Ekvivalentní délka vzduchové mezery	m
l_{av}	Střední délka závitu cívky	m
L_d	Synchronní indukčnost	H
L_{md}	Magnetizační indukčnost	H
$L_{s\sigma}$	Rozptylová indukčnost statoru	H
L_u	Rozptylová indukčnost v drážce	H
L_w	Rozptylová indukčnost na čele vinutí	H
L_z	Rozptylová indukčnost v zubu	H
L_{δ}	Rozptylová indukčnost ve vzduchové mezeře	H
m	Počet fází	-
m_{js}	Hmotnost statorového jha	kg
m_z	Hmotnost zubů	kg
n	Otáčky generátoru	ot./min.
n_s	Synchronní otáčky	ot./min
N	Počet závitů na fázi	-
MVE	Malá vodní elektrárna	-
p	Počet pólových dvojic	-
P	Výkon generátoru	W
P_{15}	Ztráta v železe pro materiál M800-50 při 50Hz	W/kg
P_{Cu}	Ztráty v mědi	W
P_{celk}	Celkové ztráty generátoru	W
P_{el}	Elektrický výkon generátoru	W
P_{ex}	Přídavné ztráty	W
P_{Fe}	Ztráty v železe	W
P_{Fejs}	Ztráty ve statorovém jhu	W
P_{Fez}	Ztráty v zubu	W
P_h	Výkon generátoru na hřídeli	W
P_{mech}	Mechanické ztráty	W
P_R	Práce generátoru za rok	kWh
P_t	Mechanický výkon turbíny	W
P_{tel}	Elektrický výkon turbíny	W

P_V	Rozdíl ve výrobě kWh za rok	kWh
P_δ	Ztráty ve vzduchové mezeře	W
PM	Permanentní magnet	-
q	Počet drážek na pól a fázi	-
Q	Celkový počet drážek	-
Q_{h2o}	Průtok vody	l/s
R	Činný odpor vinutí statoru	Ω
S_c	Průřez vodiče vinutí	m^2
S_{celk}	Celkový průřez statorové drážky	m^2
S_{Cus}	Průřez otvoru drážky nový	m^2
S_o	Průřez otvoru drážky předběžný	m^2
T	Moment na hřídeli generátoru	Nm
u	Koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
U	Výstupní sdružené napětí generátoru	V
U_{mcelk}	Celkové magnetické napětí	A
U_{mjr}	Magnetické napětí v rotorovém jhu	A
U_{mjs}	Magnetické napětí ve statorovém jhu	A
U_{mPM}	Magnetické napětí permanentního magnetu	A
U_{mz}	Magnetické napětí v zubu	A
$U_{m\delta e}$	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	A
v_r	Rychlost na povrchu rotoru	m/s
V_{js}	Objem statorového jha	m^3
V_r	Objem rotoru	m^3
W_{tp}	Krok vinutí (jednovrstvého)	-
$X_{s\sigma}$	Rozptylová reaktance statoru	Ω
X_u	Rozptylová reaktance drážky	Ω
X_w	Rozptylová reaktance čela vinutí	Ω
X_z	Rozptylová reaktance zubů	Ω
X_δ	Rozptylová reaktance ve vzduchové mezeře	Ω
Z_Q	Počet cívek v drážce	-
Z_{10}	Přírůstek finančního zisku za 10 roků	Kč
α_{Cu}	Teplotní odporový koeficient Cu	1/K
α_{PM}	Relativní šířka magnetu	-
α_{Rv}	Koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
α_u	Drážkový úhel	rad
β	Zatěžovací úhel	rad
β_v	Koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
δ	Vzduchová mezera	m
δ_e	Ekvivalentní vzduchová mezera	m
δ_{ef}	Efektivní vzduchová mezera	m
δ_{fikt}	Fiktivní vzduchová mezera	m
η	Předpokládaná účinnost generátoru	%
η_g	Účinnost generátoru	%
κ	Koeficient pro stanovení Carterova koeficientu	-
λ_{lew}	měrná magnetická vodivost čela vinutí axiální	H/m
λ_w	měrná magnetická vodivost čela vinutí radiální	H/m
λ_u	Měrná magnetická vodivost drážky	H/m
λ_z	Měrná magnetická vodivost zubu	H/m
μ_0	Permeabilita vakua	H/m
μ_{PM}	Permeabilita materiálu PM	H/m

ρ_{Cu}	Hustota mědi	kg/m^3
ρ_{Fe}	Hustota železa	kg/m^3
ρ_{H2O}	Hustota vody	kg/m^3
ρ_{PM}	Hustota PM	kg/m^3
σ_{Cu}	Vodivost mědi při oteplení o 80°C	S/m
σ_{Cu20C}	Měrná vodivost Cu při 20°C	S/m
σ_{Tan}	Tangenciální napětí	Pa
σ_{PM}	Měrná magnetická vodivost PM	H/m
τ_{jr}	Pólová rozteč pro střední průměr rotorového jha	m
τ_{js}	Pólová rozteč pro střední průměr statorového jha	m
τ_p	Pólová rozteč	m
τ_u	Drážková rozteč	m
χ	Poměr mezi ekv. délkou rotoru a průměrem vzduch. mezery	-
ω	Úhlová rychlost magnetického pole	rad/s
ω_h	Úhlová rychlost hřídele generátoru	rad/s
Θ	Oteplení vinutí	K
Φ	Magnetický tok procházející vzduchovou mezerou	Wb
Φ_σ	Fiktivní rozptylový tok	Wb

1. Úvod

Vodní energie, která je nejdéle využívanou formou energie v historii lidstva, je jedním z nevyčerpatelných zdrojů energie v přírodě. Vodní energie se vyskytuje v mechanické, tepelné a chemické formě. Z hlediska technického využití má největší význam mechanická energie vodních toků, která je odvozena od energie sluneční.

Mechanická energie vodních toků se nejčastěji využívá pomocí vodních elektráren, které se staví na přehradách, jezích či hrázích. Zde se vodní energie akumuluje a následně postupně přeměňuje na energii elektrickou.

Na menších tocích, kde nelze postavit klasickou vodní elektrárnu, vzniká prostor pro použití bezlopatkové turbíny Setur. Tato turbína dokáže využít vodní energii již při nízkém spádu a průtoku. Využití nalézá už od průtoku 4 litrů za sekundu a to při minimálním spádu 0,6 metrů. Instalace turbíny vyžaduje minimální stavební úpravy. Koryto toku zůstává nezměněno, což má příznivý vliv na zachování charakteru krajiny a přírody. Je možné říct, že turbína Setur je ekologicky šetrná a minimálně ovlivňuje životnímu prostředí.

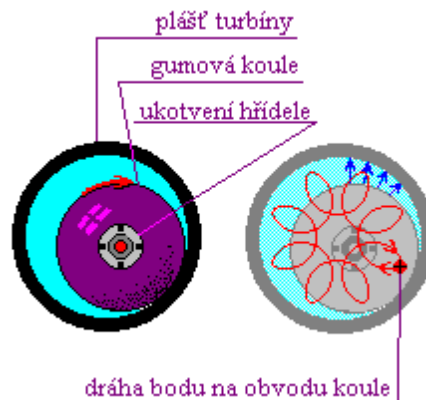
Pro zvýšení účinnosti a spolehlivosti turbíny je vhodné zvážit možnost napojení osy turbíny přímo na osu generátoru. Tímto řešením by se vyloučil převod, který je používán doposud a který představuje další mechanický prvek turbíny. Převod vyžaduje údržbu a snižuje celkovou účinnost zařízení. Řešením uvedené záležitosti je použití pomaluběžného generátoru, jehož jmenovité otáčky odpovídají otáčkám turbíny. Jako nejvhodnější se jeví synchronní generátor s permanentními magnety (PM) na rotoru (rotor může být vnitřní nebo vnější) a to pro svoji jednoduchost, vysokou účinnost a spolehlivost. Na uvedené téma byl proveden průzkum trhu a to pro sériově vyráběné generátory a dále vlastní návrh generátoru. Ve vlastním návrhu jsme zvolili synchronní generátor s PM a vnitřním rotorem.

2 Turbína Setur

2.1 Princip činnosti

Princip činnosti turbíny vychází z hydrodynamického paradoxu, který je vyjádřen Bernoulliho rovnicí kontinuity. Ta nám říká, že pokud tekutina proudí zúženou částí trubice, roste její rychlost a tím i její kinetická energie. Ze zákona zachování energie musí platit, že energie na počátku a na konci potrubí musí být stejná. Proto například u vodorovného potrubí kde se potenciální energie měnit nemůže, se nám mění pouze energie tlaková. Tudíž v místě s největší rychlostí kapaliny je nejnižší tlak. Stejný efekt nastane, zavěsíme-li několik centimetrů od sebe rovnoběžně dva listy papíru. Při fouknutí mezi ně, se neoddálí, ale přitisknou k sobě.

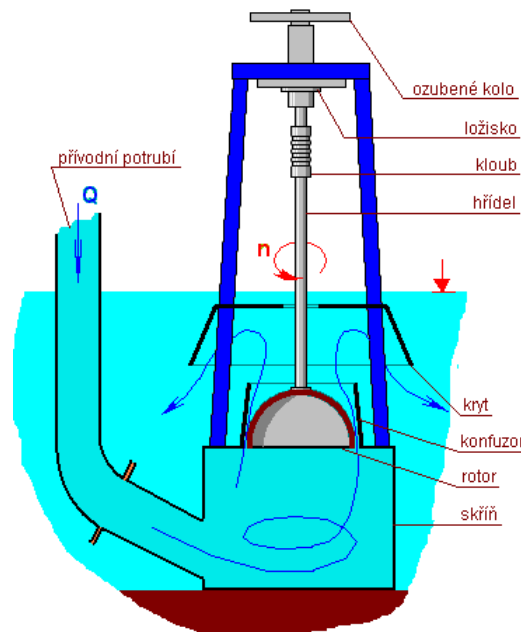
Obdobně se tak děje i u turbíny Setur, když je voda vpuštěna do turbíny, nejvyšší rychlost proudící kapaliny je mezi dutou polokoulí (rotorem) a odvalovací stěnou (státorem), což je v turbíně zúžené místo. Jelikož je rotor zavěšen nevystředěně vůči statoru, tak na straně s menší mezerou proudí voda rychleji než na straně druhé. V tomto místě má tedy voda nižší tlak a na rotor působí síla, která ho přitlačí ke stěně statoru. Mezi rotorem a státorem vzniká srpovitá štěrbiná. Ve směru otáčení se štěrbiná zmenšuje, roste tedy rychlost vody a klesá tlak, což má za následek další přitlačení rotoru ke stěně statoru. Síla, která přitahuje rotor, je tím větší, čím vyšší je rychlost proudění kapaliny. Směr otáčení rotoru turbíny je dán nesouměrným umístěním přívodu vody. Ten turbíně vnutí směr otáčení a nemůže se tedy stát, že by se turbína roztočila na opačnou stranu.



Obr. 2-1. Pohyby rotoru [5]

2.2 Konstrukce

Celkové provedení je vidět na obr. 2-2. Spodní část turbíny je tvořena dutou, kovovou skříní, ve které proudí voda přiváděná nesouměrným přivaděčem. Na vrchní straně skříně je přišroubované tělo turbíny, které tvoří kryt, v němž je umístěn výtokový konfuzor, rotor a odvalovací stěna. Na rotoru je upevněna hřídel, která přes kardanový kloub přenáší moment na hřídel generátoru. Turbína se přidělává na betonový podstavec, který jí zajišťuje stabilizovanou polohu.



Obr. 2-2. Turbína SETUR [5]

2.2.1 Rotor

Dříve rotor tvořila gumová koule. Nyní gumovou kouli nahradila dutá polokoule, na kterou byl nalisován kovový ozubený prstenec s jemným modulem. Tímto řešením se částečně využívá i zbytková energie vody za rotorem, což u původního uspořádání s koulí bylo problematické.

2.2.2 Stator

Původně hladká odvalovací stěna, byla opatřena ozubeným plastovým protikusem k rotoru. Tímto vylepšením byl odstraněn prokluz, ke kterému docházelo mezi rotorem a stěnou. Kombinace materiálů kov-plast umožňuje tichý chod a provoz bez nutnosti mazání. Zároveň použití kombinace kovu a plastu zajišťuje těsnost mezi jednotlivými díly turbíny.

2.2.3 Hřídel

V předešlé variantě musela hřídel přenést (vypružit) nesoucí odvalovací pohyb rotoru. Nyní tuto úlohu přebírá kardanový kloub, jenž dělí hřídel na dvě části. Kardanový kloub tlumí excentrický pohyb rotoru a na hřídel generátoru se přenáší pouze pohyb rotační. Řešení má příznivý vliv na chod a spolehlivost elektrického generátoru.

2.2.3 Přivaděč vody

První varianta turbíny měla přívod vody umístěný v horní části a voda tekla kolem rotoru směrem dolů. Toto řešení bylo podmíněno utěsněním hřídele. Druhé uspořádání bylo navrženo s ohledem na využití vyšších spádů. Přívod vody je umístěn ve spodní části skříně turbíny, odkud je voda tlačena k rotoru směrem vzhůru. Odpadá těsnění hřídele a zvyšuje se přitlačná síla rotoru k odvalovací stěně.

2.3 Výhody a použití

K výhodám turbíny patří jednoduchost, spolehlivost, necitlivost na organické nečistoty.

Turbína je v zásadě neregulovatelná, určená pro pohon stálé zátěže např. pro pohon čerpadel, elektrických generátorů a nabíjení akumulátoru.

V miniaturním provedení jí lze také použít pro vrtací nebo čistící nástroje.

2.4 Mechanický potenciál turbíny DVE 120 a nevýhody současného řešení

Každý vodní motor má charakteristické parametry předurčující k takovému použití, při kterém budou jeho přednosti využity a nedostatky potlačeny. Mikroturbína DVE 120 je určena na využití mikropotenciálu vodní energie. Jak je naznačeno v tab. 2-1, potenciál vodní energie je představován spádem od 2 do 20 metrů a průtokem od 3 do 21 litrů vody za sekundu. Otáčky rotoru turbíny se pohybují v rozmezí 120 až 180 za minutu.

Spád [m]	2	2,5	5	7,5	10	15	20
Průtok [l/s]	3-4	4-5	6-7	9-12	13-15	16-18	19-21

Tab. 2-1. Rozsah použití turbíny DVE 120 [13]

Z měření a výpočtů bylo stanoveno [13]:

Spád: $H = 3,55$ [m]
Průtok turbínou: $Q_{h2o} = 5,9$ [l/s]
Celková ztrátová výška: $h_r = 0,1948$ [m], 15,48 % H
Užitný spád: $H_v = 3,335$ [m]

$$P_t = g \cdot H_v \cdot Q_{h2o} = 9,81 \cdot 3,335 \cdot 5,9 = 194,2$$
 [W]

kde g je gravitační zrychlení.

Tento mechanický výkon máme k dispozici pro přeměnu na výkon elektrický.

Pro co nejvyšší využití mechanické energie turbíny je nutné minimalizovat ztráty způsobené převodem. Nynější provedení typu DVE 120 je s převodem, který snižuje účinnost a spolehlivost. Generátor, který se používá v současné době pro tento typ, má účinnost pouze 50 %.

Úkolem bude nalézt na tuto turbínu vhodnější generátor použitelný pro nízké otáčky bez nutnosti převodu, s co nejvyšší účinností.

3 Požadované parametry generátoru pro MVE s BT

Parametry generátoru jsou voleny pro použití mikroturbíny DVE 120 při minimálních hodnotách spádu a průtoku vody. Z výše uvedeného výpočtu lze tedy určit přibližný požadovaný výkon generátoru, který bude něco přes 100 W, v závislosti na jeho účinnosti.

Přesné zadání parametrů generátoru bylo určeno výrobcem turbíny a zní takto:

3.1 Výkon při daných otáčkách a výstupním napětí

a) Maximální výkon při zátěži, **120 W** při cca **180 ot/min**.

Výstupní napětí přibližně 25V až 28V stejnosměrných, možno i vyšší.

b) Minimální výkon při zátěži, **30 W** až **40 W** při **120 ot/min**.

Výstupní napětí minimálně 16,5V až 18V stejnosměrných (uvažuje se napěťová ztráta na regulátoru).

- Závislost otáček na výstupním napětí, by měla být lineární.

3.2 Konstrukční parametry

a) Generátor by měl být bez použití převodu, tedy přímo připojen na hřídel turbíny.

b) Rozměry a váha generátoru jsou v zásadě neomezené s ohledem na velikost turbíny.

c) Krytí generátoru by mělo splňovat IP 66 nebo alespoň IP 64.

3.3 Použití

Určený pro dobíjení 12V Pb akumulátoru. Vyrobená elektrická energie se využije v místě výroby (ostrovní provoz).

4 Rešerše trhu

První krok, který jsme provedli pro nalezení vhodného generátoru, byl průzkum trhu. Hledání bylo zaměřeno na pomaluběžné generátory. Výrobci je poměrně velká škála, většina se však specializuje na vyšší výkony (řádově kW). Pomaluběžných generátorů na takto malý výkon je na trhu velmi malé množství a odráží se to i na jejich cenách.

Z většího počtu generátorů byly vybrány tři generátory (Tab. 4-1), které více či méně vyhovují našim požadavkům.

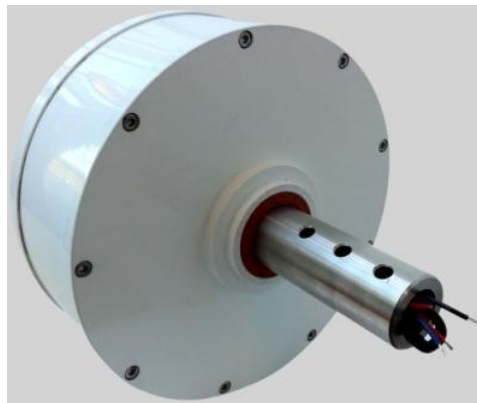
GENERÁTOR 1	DVE Technologies ApS - PMGO-0.2K-200
GENERÁTOR 2	Alxion – 145ATK4M
GENERÁTOR 3	Ginlong - GL-PMG-1000

Tab. 4-1. Seznam generátorů

4.1 GENERÁTOR 1

Firma DVE Technologies ApS, která má své sídlo v Dánsku se zabývá prodejem generátorů a příslušenstvím k malým větrným elektrárnám. K buzení generátoru jsou použity permanentní magnety. Generátory vyrábí o výkonech od 200W do 10kW, v provedení s vnitřním nebo vnějším rotorem. Splňují třídu krytí IP 65.

Pro nás je zajímavý typ PMGO-0.2K-200, který je konstruován na výstupní výkon 200W při jmenovitých otáčkách 200 ot/min.



Obr. 4-1. Generátor 1 [6]

4.1.1 Technické údaje a cena

Výstupní výkon [kW]	0,2
Jmenovité otáčky [ot/min]	200
Počet fází	3
Výstupní střídavé napětí (efektivní fázové) [V]	17
Výstupní stejnosměrné napětí (s usměrňovačem) [V]	24
Maximální účinnost [%]	84
Počet pólů	16
Speed constant [VDC/krpm]	190
Odpor fáze při 20°C [Ω]	0,8
Indukčnost fáze [mH]	7,4
Setrvačnost rotoru [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0,06
Rozběhový moment [Nm]	<0,02
Váha [kg]	11

Tab. 4-2. Údaje od výrobce DVE [6]

Vyrábí se v provedení s vnějším rotorem (obr. 4-1), netočí se hřídel, ale celý rám (kostra) generátoru. Hřídel z turbíny se musí připojit na plochou stranu generátoru, kde jsou připraveny šrouby na uchycení.

Cena tohoto generátoru pro firemní účely je 750 EUR (18 tis.Kč/ks) Pro soukromé účely musíme připočítat ještě 25 % ze základní ceny, tedy 937,5 EUR. Což je po přepočtu přibližně 23 tis. Kč/ks.

4.1.2 Zhodnocení pro využití na turbínu DVE 120

Pokud si určíme minimální a maximální body pro zkoumání ve výkonové charakteristice, vyjdou nám tyto hodnoty. Při 180 ot/min a odporové zátěži 3,5 Ω , generátor dodává do spotřebiče výkon 150 W [Příloha A, obr. A-1]. Při 120 ot/min a stejné odporové zátěži, generátor dodává do spotřebiče výkon 75 W. Tyto hodnoty jsou téměř shodné s požadovanými parametry generátoru.

Problémem je provedení s vnějším rotorem, které nám znesnadní uchycení generátoru k turbíně. Otázkou je také cena, která je z pohledu zadavatele vysoká, ta však může být vyvážena vyšší účinností generátoru (až 84%).

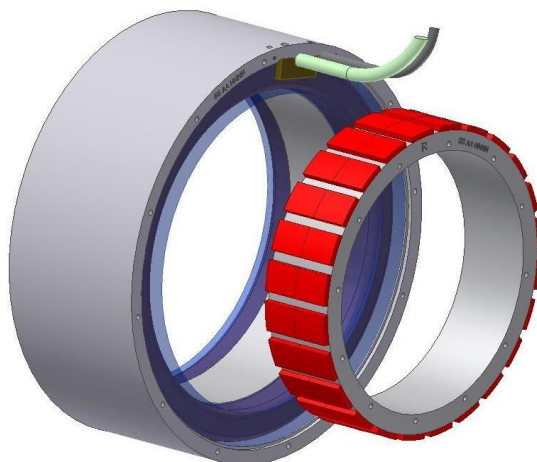
Kritéria	Zhodnocení
Cena	-
Návratnost	+
Otáčky	+
Výkon	+
Napětí	+
Účinnost	+

Tab. 4-3. Zhodnocení generátoru 1

4.2 GENERÁTOR 2

Další firmou zabývající se prodejem či výrobou generátorů s permanentními magnety je francouzská firma Alxion. Z jejich nabídky generátorů by pro naše účely přicházel v úvahu typ 145ATK4M. Tento typ je konstruován až do výstupního výkonu 3,5 kW. Podle výkonové charakteristiky [Příloha B, obr. B-1], by měl tento generátor při 180 ot/min poskytovat výstupní výkon okolo 200 W.

Zobrazení konstrukce generátoru Alxion typ 145ATK4M (obr. 4-2).



Obr. 4-2. Provedení statoru a rotoru generátoru 2 [7]

4.2.1 Technické údaje a cena

Při 650 ot/min	
Výstupní výkon [W]	1307
Vstupní moment [Nm]	25,4
Účinnost [%]	76
Výstupní proud [A]	3,2
Výstupní střídavé napětí [V]	243
Počet pólů	12
Počet fází	3
Rozběhový moment [Nm]	0,4
Odpor fáze (20°C) [Ω]	8,6
Indukčnost fáze [mH]	60
Výst. napětí bez zátěže (20°C) [V]	390
Setrvačnost rotoru [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	$2,24\cdot 10^3$
Váha [kg]	10,4
Při 150 ot/min (odečteno z char.)	
Výstupní výkon [W]	180
Vstupní moment [Nm]	14
Účinnost [%]	54
Výstupní střídavé napětí [V]	45

Tab. 4-4. Údaje od výrobce Alxion [7]

Cena typu 145STK6M je 1948 EUR (47,8 tis.Kč/ks) při odběru jednoho kusu. Při nákupu deseti kusů je cena za jeden snížena na 1345 EUR (33 tis.Kč/ks) a při odběru sto kusů se cena pohybuje okolo 1129 EUR (27,7 tis.Kč/ks).

Pro prezentovaný typ 145ATK4M, je cena o 15 % nižší.

4.2.2 Zhodnocení pro využití na turbínu DVE 120

Tento generátor je možné, po převedení výstupního napětí na nižší (pomocí regulátoru napětí), též použít v zadané aplikaci. Nevýhodou je vysoká cena a malá účinnosti při nízkých otáčkách (např. při 150 ot./min. je účinnost 53 % [Příloha B, obr. B-4]), při kterých je potenciál generátoru téměř nevyužit. Jeho využití vychází jako nejméně vhodné z uvedených výrobků.

Kritéria	Zhodnocení
Cena	-
Návratnost	-
Otáčky	-
Výkon	+
Napětí	-
Účinnost	-

Tab. 4-5. Zhodnocení generátoru 2

4.3 GENERÁTOR 3

Firma Ginlong je čínský výrobce, který ve své nabídce nabízí typ GL-PMG-1000. Konstruován je s vnitřním rotorem s permanentními magnety.



Obr. 4-3. Generátor 3 [8]

4.3.1 Technické údaje a cena

Při 450 ot/min	
Výstupní výkon [W]	1000
Vstupní moment [Nm]	31,5
Výst. napětí bez zátěže [V]	280
Počet fází (zapojení do hvězdy)	3
Rozběhový moment [Nm]	<0,5
Odpor fáze [Ω]	6
Setrvačnost rotoru [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0,010
Váha [kg]	16,7
Při 150 ot/min (odečteno z char.)	
Výstupní výkon [W]	150
Vstupní moment [Nm]	13,5
Výst. napětí bez zátěže [V]	80

Tab. 4-6. Údaje od výrobce Ginlong [8]

Cena generátoru GL-PMG-500A je 490USD, což je přibližně 8,5 tis.Kč/ks. Cena typu GL-PMG-1000 je 620 USD (10,5 tis.Kč/ks).

4.3.2 Zhodnocení pro využití na turbínu DVE 120

Ačkoliv je konstruován pro vyšší výkon a to 1 kW, jeho cena je velice příznivá a může ovlivnit rozhodnutí při nákupu. Cena se pohybuje okolo 10 tis. Kč/ks, což je polovina ceny dánského generátoru PMGO-0.2K-200. Výstupní charakteristiky toho generátoru jsou v příloze C.

Kritéria	Zhodnocení
Cena	+
Návratnost	+
Otáčky	-
Výkon	-
Napětí	-

Tab. 4-7. Zhodnocení generátoru 3

4.4 Rozbor energetického zisku při použití GENERÁTORU 1 (pro malou vodní elektrárnu SETUR DVE-120)

V této části je proveden rozbor energetické výhodnosti pro případ, kdy použijeme k výrobě elektrické energie dánský generátor PMGO-0.2K-200 o výkonu 200W s přímým připojením (bez převodu) k vodní turbíně SETUR. Porovnání je provedeno vůči sestavě malé vodní elektrárny DVE ,která je prezentována na webových stránkách setur.cz s generátorem od firmy Agroplast Olešnice.

Generátor PMGO-0,2K-200 byl vybrán, protože nejvíce vyhovuje výstupním parametrům turbíny DVE 120.

4.4.1 Generátor Agroplast Olešnice

Z Tab.2-1 byli přibližně určeny hodnoty spádu a průtoku. Účinnosti a hydraulické ztráty byly určeny z [13].

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gravitační zrychlení
 $Q_{h2o} = 8 \text{ l/s}$ průtok vody turbinou (hltnost)
 $H_{h2o} = 6 \text{ m}$ spád vody
 $h_m = 0,55$ (55%) účinnost turbíny mechanická
 $h_g = 0,5$ (50%) účinnost generátoru
 $h_p = 0,95$ (95%) účinnost ozubeného převodu
 $k_{hz} = 0,9$ (90%) hydraulické ztráty v přívodním potrubí

Elektrický výkon turbíny

$$P_{tel} = g \cdot Q_{h2o} \cdot H_{h2o} \cdot h_m \cdot h_g \cdot h_p \cdot k_{hz} = 9,81 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 0,55 \cdot 0,5 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = \mathbf{110,7 \text{ [W]}} \quad (1)$$

Výroba elektrické energie při 80% využití výkonu vodní turbíny (tzn. turbína je v provozu něco přes 19 hodin denně).

$$P_R = 0,117 \cdot 0,8 \cdot 24(\text{hodin}) \cdot 365(\text{dní}) = \mathbf{776 \text{ [kWh/rok]}} \quad (2)$$

4.4.2 GENERÁTOR 1

Celková účinnost celého zařízení bude vyšší o ztráty způsobené převodem (5 %) a o vyšší účinnost generátoru. Účinnost generátoru budeme uvažovat 80 %.

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gravitační zrychlení
 $Q_{h2o} = 8 \text{ l/s}$ průtok vody turbinou (hltnost)
 $H_{h2o} = 6 \text{ m}$ spád vody
 $h_m = 0,55$ (55%) účinnost turbíny mechanická
 $h_g = 0,8$ (80%) účinnost generátoru
 $k_{hz} = 0,9$ (90%) hydraulické ztráty v přívodním potrubí

Elektrický výkon turbíny

$$P_{tel} = 9,81 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 0,55 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = \mathbf{187 \text{ [W]}}$$

Výroba elektrické energie při 80% využití výkonu vodní turbíny.

$$P_R = 0,187 \cdot 0,8 \cdot 24 \cdot 365 = \mathbf{1310 \text{ [kWh/rok]}}$$

4.4.3 Rozdíl ve výrobě elektrické energie:

$$P_V = 1310 - 776 = \mathbf{534 \text{ [kWh/rok]}} \quad (3)$$

Zvýšení výroby elektrické energie při stejném příkonu o **69 %**.

$$Z_{10} = 10(\text{let}) \cdot 534 \cdot 4 = \mathbf{21360 \text{ [Kč]}} \quad (4)$$

Finanční zisk za 10 let při ceně elektrické energie 4 Kč/kWh je přibližně **21tis.Kč**.

Z uvedených výpočtů vyplývá, že při změně konstrukce a využití generátoru PMGO-0,2K-200 je možné podstatně zvýšit výrobu elektřiny z daného vodního zdroje. Zvýšení energetického zisku o bezmála 70 % je dáno větší účinností dánského generátoru a absencí ztrát vznikajících na převodu.

Nicméně ani toto řešení pro zadavatele vhodné není. Pořizovací cena je pro jeho účely příliš vysoká. Proto jsme se rozhodli, v kapitole 6., navrhnout synchronní generátor, který by odpovídal svými parametry turbíně DVE 120. Předpokladem je, že návrh bude nejoptimálnějším řešením zadaného úkolu.

5 Synchronní generátor

Před samotným návrhem je zde pro představu uvedena konstrukce a princip činnosti synchronního generátoru. Následně pak využití permanentních magnetů místo budících cívek, za účelem co nejvyšší účinnosti generátoru.

5.1 Konstrukce

Stator synchronního generátoru se v podstatě neliší od statoru asynchronního motoru. Plechy statorového svazku jsou buď vcelku, nebo (u strojů s velkým průměrem) jsou rozděleny na několik segmentů. Na vnitřním průměru těchto plechů jsou drážky, do nichž je uloženo (nejčastěji trojfázové) vinutí, které se neliší od vinutí asynchronních motorů. Konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici.

Z hlediska konstrukce rotoru rozlišujeme dva typy synchronních generátorů, a to s vyjádřenými (vyniklými) póly a s hladkým rotorem.

Zmíníme pouze generátor s vyjádřenými póly, který je vhodný pro náš případ. Generátory s vyjádřenými póly se používají při nižších otáčkách, než generátory s hladkým rotorem jejich otáčky se pohybují v řádech tisíců.

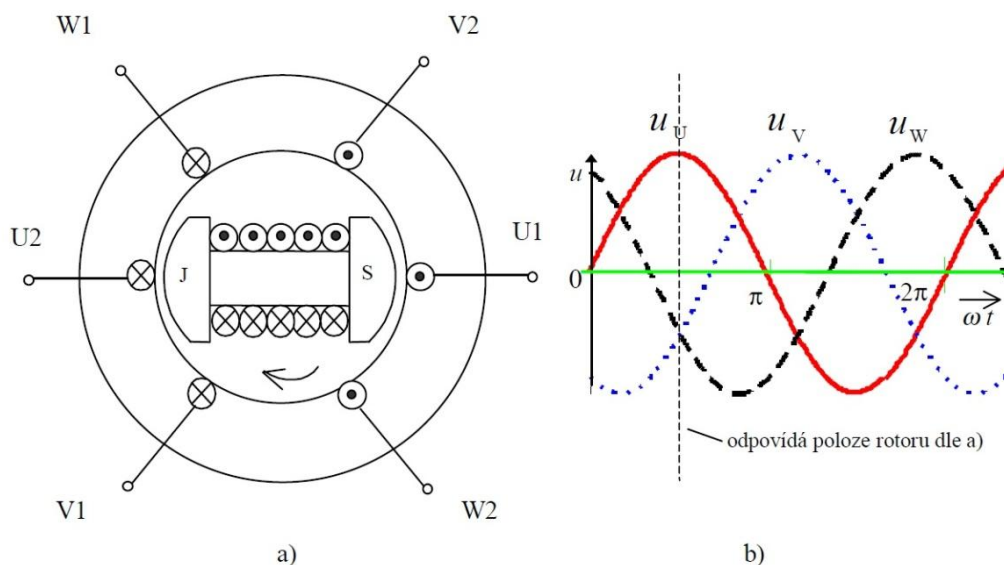
Generátory s vyjádřenými póly mají rotor tvořený hřídelem, na který je nasazeno magnetové kolo s příslušným počtem pólů (čtyři a více). Každý pól má budící cívkou. Budící cívkou jsou vhodně spojeny (obvykle za sebou) a jejich konce jsou připojeny ke dvěma kroužkům umístěným na hřídeli. Na kroužky dosedají kartáče, jimiž se do budícího vinutí přivádí stejnosměrný budící proud z budiče. Při použití generátorů s PM je budící vinutí nahrazeno permanentními magnety, čímž se konstrukce stroje podstatně zjednoduší [3].

5.2 Princip činnosti

Princip činnosti je pro jednoduchost vysvětlen na dvojpólovém generátoru. Jeho statorové vinutí tvoří tři cívkou (fáze U,V,W) vzájemně prostorově natočené o 120°. Rotorovým vinutím prochází stejnosměrný proud, ten nám vybudí stejnosměrné magnetické pole uzavírající se přes stator. Vzniknou stálé magnetické póly, které jsou střídavě uspořádány a to jako severní a jižní pól. Otáčí-li poháněcí stroj, (např. turbína) takto buzeným rotorem se indukují v jednotlivých cívkách statoru střídavá napětí, sinusového průběhu, která jsou v jednotlivých cívkách vzájemně časově posunutá o elektrický úhel 120°. Při poloze rotoru podle obr. 5-1a se do cívkou U bude indukovat maximální napětí. V cívkách V a W se indukují napětí o poloviční hodnotě a s opačným znaménkem. Při natočení rotoru o úhel 120° bude maximální hodnota indukovaného napětí v cívkou V, při natočení o dalších 120° v cívkou W. Časové průběhy indukovaných napětí v jednotlivých cívkách (fázích) statoru jsou znázorněny na obr. 5-1b. Jedna perioda střídavého indukovaného napětí odpovídá v případě dvojpólového generátoru jedné otáčky rotoru o 360°.

Jelikož se magnetické pole vytvořené proudy statoru otáčí stejnou rychlostí jako rotor, říkáme, že generátor pracuje se synchronními otáčkami, odtud *synchronní* generátor [1, 3].

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (5)$$



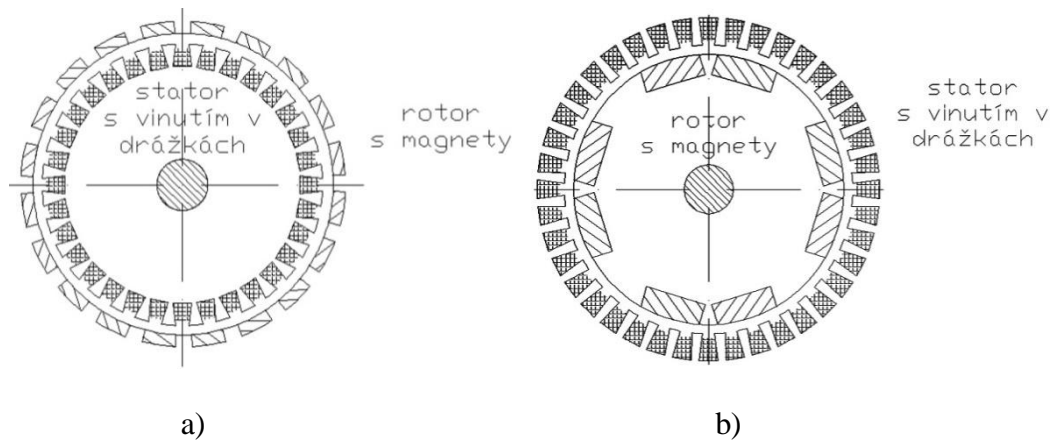
Obr. 5-1. a) princip činnosti generátoru, b) průběh indukovaných napětí v cívkách kotvy [6]

5.3 Použití permanentních magnetů místo budícího vinutí

V případě použití konstrukce generátoru s PM na rotoru odpadá problém s řešením budícího vinutí. Nahrazením budícího vinutí permanentními magnety se stane generátor podstatně jednodušší. Není potřeba sběracích kroužků a přitlačných kartáčů, protože není potřeba přivádět budící proud do vinutí rotoru. Odpadají ztráty buzením rotoru, které jinak představují 20 % až 30 % celkového množství ztrát v generátoru, zároveň se zvýší účinnost a spolehlivost celého stroje.

Nevýhodou tohoto uspořádání je vyšší cena, která je určena cenou permanentních magnetů. Není zde možné regulovat indukované napětí a tím pádem ani svorkové napětí. Toto omezení se projeví v případě změny zatížení stroje, kdy se v závislosti na zátěži mění i svorkové napětí. Z toho plyne, že tento typ generátoru lze použít pouze tam, kde se zatížení příliš nemění, nebo pro aplikace, kde nám tolik nezáleží na výstupních parametrech, kterými jsou např. velikost napětí, proudu případně frekvence. Pro naše účely nám toto omezení nevadí, jelikož budeme nabíjet akumulátor nikoliv dodávat elektrickou energii do distribuční sítě.

Používají se dvě možná konstrukční řešení a to s vnějším rotorem (rotor vně statoru), které se využívá v případě mnoha pólových dvojic, nebo s vnitřním rotorem (rotor uvnitř statoru) jak je vidět na obr. 5-2.



Obr. 5-2. Provedení s a) vnějším rotorem, b) vnitřním rotorem [10]

5.3.1 Permanentní magnety

V současnosti se nejvíce používají tyto typy permanentních magnetů:

1) Feritové magnety (keramické)

Jedná se o klasické, černé magnety, které jsou nejlevnější z permanentních magnetů na trhu. Podle postupu výroby se feritové magnety dělí na izotropní, které mají ve všech směrech stejné magnetické vlastnosti a anizotropní, které mají dobré magnetické vlastnosti pouze v jednom směru. Izotropní magnety jsou vyráběny tzv. suchou cestou - lisováním. Následně se magnety magnetují v magnetickém poli. Výhodou u tohoto výrobního postupu je možnost magnetovat magnety v různých směrech dle požadavků zákazníka. Anizotropní magnety jsou vyráběny tzv. mokrou cestou - vstřikováním do výrobní formy pod působením magnetického pole. Následné magnetování je možné pouze ve směru, který byl předurčen při výrobě.

Feritové magnety nejsou náchylné na korozi, a proto je není třeba povrchově upravovat. Na základě svého keramického charakteru jsou ferity křehké a citlivé na náraz a ohyb.

- remanence - 0,1 T až 0,4 T
- koercitivita – 50 kA/m až 280 kA/m
- pracovní teplota – 40 °C až +250 °C

2) Magnety ze vzácných zemin

a) Samarium kobaltové magnety (SmCo - samarium, kobalt)

Byly prvními ze skupiny moderních magnetů na bázi prvků skupiny vzácných zemin a kovu, které byly zavedeny do masové výroby. Vyrábějí se metodami práškové metalurgie, obvykle jako magnety anizotropní. V současnosti se tyto magnety vyrábějí na bázi dvou intermetalických sloučenin SmCo_5 nebo $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, přičemž magnety typu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ se vyznačují vyšší hodnotou remanence B_r , a o něco vyšší teplotní stabilitou.

- remanence - 0,85 T - 1,1 T
- koercitivita – 650 kA/m až 790 kA/m
- teplotní odolnost do 350 °C

b) Neodym železo borové magnety (NdFeB - neodym, železo, bor)

Vyrábějí se sintrováním z práškových kovů se vzácným prvkem neodymem. Neodymové magnety NdFeB jsou křehké, ne však více než typy SmCo nebo feritové. Jakékoliv mechanické obrábění se musí provádět před magnetizací, za použití diamantových nástrojů. Neodymové magnety jsou pokrývány tenkou vrstvou niklu, stříbra, zlata a epoxidu jelikož jsou náchylné na korozi. Neodymové magnety jsou o 13 % lehčí než SmCo nebo feritové magnety. Tyto magnety je možno magnetovat na mnoho způsobů, záleží k jakému účelu budou sloužit. Jedná se o doposud nejsilnější vyráběné permanentní magnety.

- remanence - 1,1 T - 1,3 T
- koercitivita – 790 kA/m až 1 MA/m
- teplotní odolnost do 220 °C

5.3.2 Demagnetizační křivka

Magnetické vlastnosti trvalého magnetu lze stanovit z demagnetizační křivky [Příloha D] feromagnetického materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Základní hodnoty demagnetizační křivky B_r (remanentní magnetická indukce neboli remanence) a H_c (koercitivní intenzita magnetického pole neboli koercitivita) charakterizují nejdůležitější magnetické vlastnosti trvalého magnetu. Tyto vlastnosti jsou závislé na teplotě. Výrazně se mění pokud se teplota magnetu pohybuje blízko mezních hodnot. Následkem toho mohou permanentní magnety utrpět trvalou ztrátu magnetování [11].

6 Návrh synchronního generátoru s permanentními magnety na rotoru

Na základě požadovaných parametrů generátoru v kapitole 3., jsme vybrali generátor s permanentními magnety (PM) na rotoru. Byl zvolen především pro svoje jednodušší konstrukční řešení vůči generátoru s budícím vinutím. Odpadnutím budícího vinutí, sběracích kroužků a kartáčů, se stane stroj jednodušší a zároveň spolehlivější. Podstatnou nevýhodou u generátorů s budícím vinutím je také potřeba zdroje proudu pro ono budící vinutí. To může být v sítích ostrovního typu problém. K volbě třífázového vinutí vedlo několik důvodů. Třífázové vinutí je vůči jednofázovému výhodnější, neboť se díky třem fázově posunutým vinutím sníží celkový odpor vinutí, tím se zvýší účinnost a k danému výkonu vychází generátor rozměrově menší a levnější [2]. Tři v podstatě jednofázová vinutí, která jsou fázově posunuta o 120° se obvykle zapojí do hvězdy, čímž získáme sdružené případně fázové napětí. Počet pólů (16) byl volen s ohledem na nízké otáčky generátoru a to tak, aby účinnost generátoru byla co nejvyšší. Jako materiál statorových plechů byl zvolen M800-50A, který je levný a snadno dostupný. Pokud by byly ztráty v železe příliš vysoké, bylo by vhodné zvolit materiál z tohoto hlediska kvalitnější (např. M400-50A). Elektromagnetické vlastnosti materiálu M800-50A jsou zřejmé z katalogového listu [Příloha E]. Typ permanentních magnetů byl zvolen NdFeB. Tyto magnety jsou v současnosti nejsilnějším typem magnetů s výbornými magnetickými vlastnostmi. Používají se standardně v sériově vyráběných generátorech s PM.

Nejprve je uvedena pro lepší přehlednost osnova výpočtů generátoru. Vstupní parametry generátoru jsou uvedeny v tabulce 6-1. Na konci návrhu generátoru je uveden přehled vypočtených hodnot generátoru.

Postup výpočtu vychází z ukázkového příkladu návrhu elektrického stroje s PM, který je přílohou literatury [4]. Příklad je volně dostupný z internetu [14] a nachází se na přiloženém CD.

Osnova výpočtů generátoru

6.1 Stanovení vstupních parametrů v tab. 6-1

6.2 Výpočty

- 6.2.1 Frekvence výstupního napětí
- 6.2.2 Úhlová rychlost magnetického pole
- 6.2.3 Permeabilita permanentního magnetu
- 6.2.4 Příkon generátoru
- 6.2.5 Úhlová rychlost hřídele generátoru
- 6.2.6 Moment na hřídeli generátoru

Výpočet hlavních rozměrů generátoru

- 6.2.7 Určení poměru mezi ekvivalentní délkou rotoru a průměrem vzduchové mezery
- 6.2.8 Stanovení tangenciálního napětí generátoru
- 6.2.9 Výpočet objemu rotoru
- 6.2.10 Vnější průměr rotoru
- 6.2.11 Ekvivalentní délka vzduchové mezery
- 6.2.12 Zvolení vzduchové mezery
- 6.2.13 Vnitřní průměr statoru
- 6.2.14 Výpočet délky jádra generátoru

Výpočet statorového vinutí

- 6.2.15 Volba vinutí a jeho kroku
- 6.2.16 Volba počtu drážek na pól a fázi
- 6.2.17 Celkový počet drážek statoru
- 6.2.18 Drážková rozteč
- 6.2.19 Pólová rozteč
- 6.2.20 Zvolení relativní šířky magnetu
- 6.2.21 Maximální hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře
- 6.2.22 Činitel vinutí
- 6.2.23 Napětí indukované PM
- 6.2.24 Počet závitů na fázi
- 6.2.25 Počet cívek v drážce

Výpočet statorové drážky

- 6.2.26 Šířka zubu statoru
- 6.2.27 Statorový proud
- 6.2.28 Průřez vodiče vinutí
- 6.2.29 Předběžný průřez otvoru drážky
- 6.2.30 Volba rozměrů a tvaru drážky
- 6.2.31 Rozměru drážky b4
- 6.2.32 Rozměru drážky b4c a h5
- 6.2.33 Rozměru drážky b5c
- 6.2.34 Průřez otvoru drážky pro vinutí
- 6.2.35 Rozměr drážky b5
- 6.2.36 Rozměr drážky h4
- 6.2.37 Celkový průřez statorové drážky

Výpočty magnetických napětí, výšky jha statoru, rotoru a PM

- 6.2.38 Magnetická indukce zubu
- 6.2.39 Magnetické napětí zubu
- 6.2.40 Stanovení koeficientů pro výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře
- 6.2.41 Cartetův koeficient
- 6.2.42 Výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře
- 6.2.43 Stanovení hodnoty maximální magnetické indukce pro jho statoru a rotoru
- 6.2.44 Magnetický tok procházející vzduchovou mezerou
- 6.2.45 Výška statorového jha
- 6.2.46 Výška rotorového jha
- 6.2.47 Magnetické napětí ve jhu
- 6.2.48 Střední průměr statorového jha
- 6.2.49 Pólová rozteč pro střední průměr statorového jha
- 6.2.50 Magnetické napětí statorového jha
- 6.2.51 Výška permanentního magnetu
- 6.2.52 Střední průměr rotorového jha
- 6.2.53 Pólová rozteč pro střední průměr rotorového jha
- 6.2.54 Magnetické napětí rotorového jha
- 6.2.55 Magnetické napětí PM
- 6.2.56 Celkové magnetické napětí

Odpor statoru

- 6.2.57 Střední délka závitů cívk
- 6.2.58 Vodivost mědi při oteplení o 80 °C
- 6.2.59 Odpor vinutí statoru

Magnetizační indukčnost

- 6.2.60 Efektivní vzduchová mezera pro výpočet magnetizační indukčnosti
- 6.2.61 Magnetizační indukčnost

Rozptylové indukčnosti a reaktance

- 6.2.62 Drážkový úhel
- 6.2.63 Stanovení koeficientů pro výpočet rozptylové indukčnosti a reaktance ve vzduchové mezeře
- 6.2.64 Rozptylová indukčnost ve vzduchové mezeře
- 6.2.65 Reaktance ve vzduchové mezeře
- 6.2.66 Stanovení koeficientů pro výpočet rozptylové indukčnosti a reaktance v drážce
- 6.2.67 Měrná magnetická vodivost drážky
- 6.2.68 Rozptylová indukčnost v drážce
- 6.2.69 Reaktance v drážce
- 6.2.70 Měrná magnetická vodivost zubu
- 6.2.71 Rozptylová indukčnost zubu
- 6.2.72 Rozptylová reaktance v zubu
- 6.2.73 Rozptylová indukčnost a reaktance na čele vinutí
- 6.2.74 Délka čela vinutí
- 6.2.75 Délka úseku čela závitů radiální
- 6.2.76 Délka úseku čela závitů axiální
- 6.2.77 Koeficient rozptylové indukčnosti
- 6.2.78 Rozptylová indukčnost na čele vinutí
- 6.2.79 Rozptylová reaktance na čele vinutí
- 6.2.80 Rozptylová indukčnost statoru
- 6.2.81 Rozptylová reaktance statoru
- 6.2.82 Synchronní indukčnost v ose d
- 6.2.83 Synchronní reaktance v ose d

Výpočet ztrát

- 6.2.84 Vnější průměr statorového jhu
- 6.2.85 Objem statorového jhu
- 6.2.86 Hmotnost statorového jhu
- 6.2.87 Hmotnost statorových zubů
- 6.2.88 Stanovení koeficientů pro stanovení ztráty ve statorovém jhu a v zubech statoru
- 6.2.89 Ztráta ve statorovém jhu
- 6.2.90 Ztráta ve statorových zubech
- 6.2.91 Celkové ztráty v železe
- 6.2.92 Rychlost na povrchu rotoru
- 6.2.93 Mechanické ztráty
- 6.2.94 Fiktivní vzduchová mezera pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře
- 6.2.95 Stanovení koeficientů pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře
- 6.2.96 Ztráty ve vzduchové mezeře

- 6.2.97 Přídavné ztráty
- 6.2.98 Ztráty v mědi
- 6.2.99 Celkové ztráty generátoru

Výkon generátoru a účinnost

- 6.2.100 Elektrický výkon generátoru
- 6.2.101 Účinnost generátoru

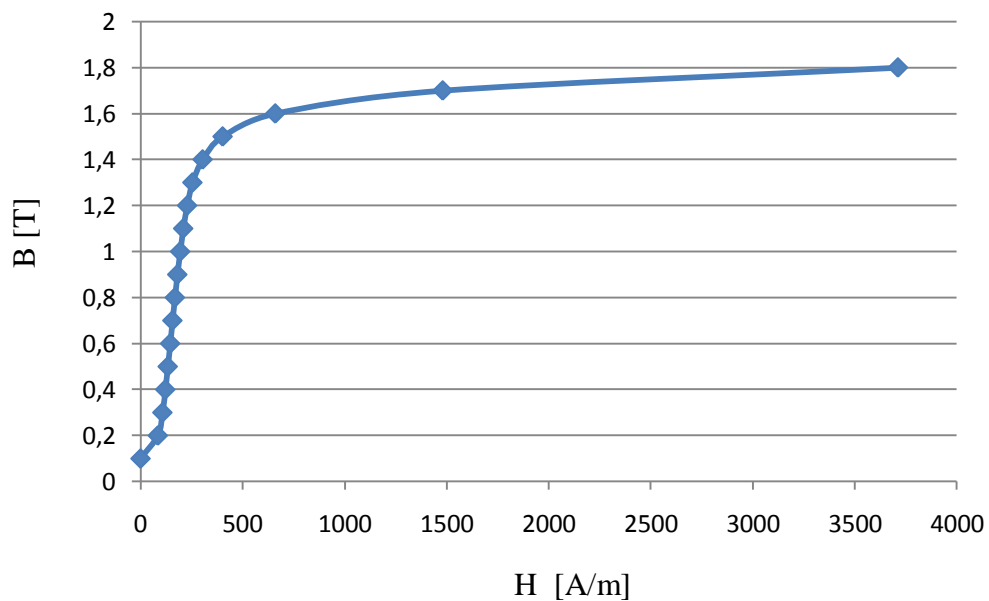
6.1 Vstupní parametry

Parametr	Hodnota	Jednotka	Značka
Výkon	150	W	P
Otáčky	160	ot/min	n
Výstupní napětí při n	28	V	U
Počet fází	3	-	m
Počet pólových dvojic	8	-	p
Účinnost	0,75	-	η
Účinník	1	-	$\cos\varphi$
Koercitivní síla PM	800000	A/m	H_c
Remanentní indukce	1,05	T	B_r
Permeabilita vakua	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	H/m	μ_0
Nárůst teploty ve vinutí	80	K	Θ
Měrná vodivost Cu při 20°C	$57 \cdot 10^6$	S/m	σ_{Cu20C}
Teplotní odporový koeficient Cu	$3,81 \cdot 10^{-3}$	1/K	α_{Cu}
Činitel plnění železa	0,97	-	k_{Fe}
Hustota železa	7600	Kg/m^3	ρ_{Fe}
Hustota PM	7500	Kg/m^3	ρ_{PM}
Hustota mědi	8960	Kg/m^3	ρ_{Cu}

Tab. 6-1. Vstupní parametry generátoru

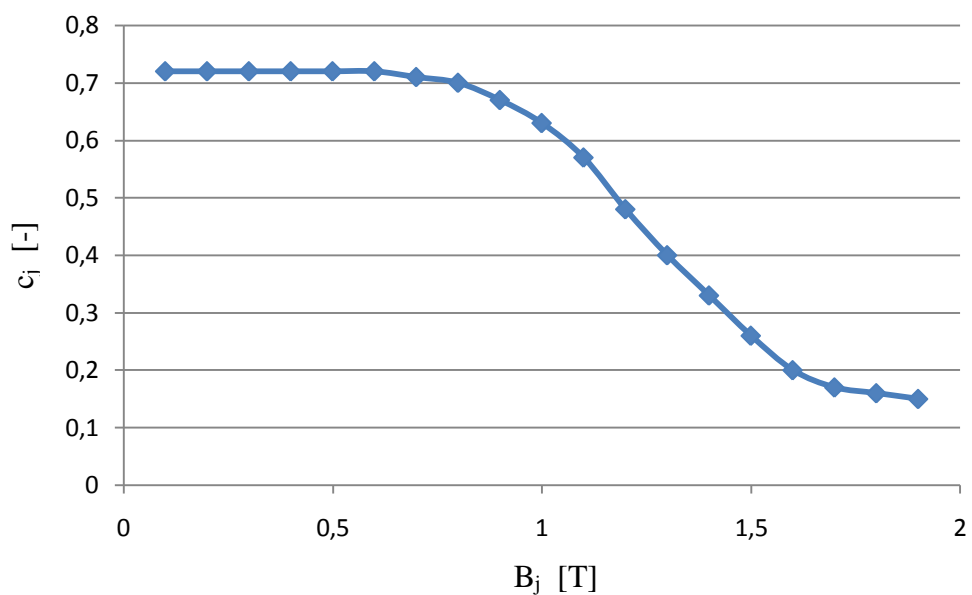
6.2 Návrh

Pro návrh je použit elektromagnetický materiál M800-50A jehož výrobcem i dodavatelem je švédská firma Surahammars Bruk AB. Hysterezní ztráta při $f=50\text{Hz}$ a $B=1,5\text{T}$ odpovídá hodnotě $P_{15}=6,6\text{ W/kg}$.



Obr. 6-1. Magnetizační křivka materiálu M800-50A [Příloha E]

Pro výpočet elektromagnetického jha z materiálu M800-50A byly použity hodnoty koeficientů rozptylu jha satoru $c_{js} = 0,33$ a rotoru $c_{jr} = 0,33$. Ty jsou určeny ze závislosti na maximální hodnotě elektromagnetické indukce jha satoru $B_{js}=1,3$ [T] a rotoru $B_{jr} = 1,3$ [T] dle Obr. 6-2.



Obr. 6-2. Závislost koeficientu rozptylu c na indukci jha B_j [179s, [4]]

6.2 Výpočty

6.2.1 Frekvence výstupního napětí

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{160 \cdot 8}{60} = 21,33 \text{ [Hz]} \quad (6)$$

6.2.2 Úhlová rychlost magnetického pole

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 134,04 \text{ [rad/s]} \quad (7)$$

6.2.3 Permeabilita PM

$$\mu_{PM} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_c} = \frac{1,05}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 800000} = 1,0445 \quad (8)$$

6.2.4 Příkon generátoru

$$P_h = \frac{P}{\eta} = \frac{150}{0,75} = 200 \text{ [W]} \quad (9)$$

6.2.5 Úhlová rychlost hřídele generátoru

$$\omega_h = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 160}{60} = 16,76 \text{ [rad/s]} \quad (10)$$

6.2.6 Moment na hřídeli generátoru

$$T = \frac{P_h}{\omega_h} = \frac{200}{16,76} = 11,94 \text{ [Nm]} \quad (11)$$

Výpočet hlavních rozměrů

6.2.7 Určení poměru mezi ekvivalentní délkou rotoru a průměrem vzduchové mezery

$$\chi = \frac{\pi \cdot \sqrt{p}}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot \sqrt{8}}{4 \cdot 8} = 0,2777 \quad (12)$$

6.2.8 Stanovení tangenciálního napětí generátoru [Příloha F-Tab. F-5., str. 284, [4]]

$$\sigma_{Tan} = 21000 \cdot \cos\varphi = 21000 \cdot 1 = 21000 \text{ [Pa]} = 21 \text{ [kPa]} \quad (13)$$

6.2.9 Výpočet objemu rotoru

$$V_r = \frac{T}{2 \cdot \sigma_{Tan}} = \frac{11,94}{2 \cdot 21000} = 0,000284 \text{ [m}^3\text{]} = 284 \text{ [cm}^3\text{]} \quad (14)$$

6.2.10 Vnější průměr rotoru

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_r}{\pi \cdot \chi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,000284}{\pi \cdot 0,2777}} = 0,1092[m] = 1092 [mm] \quad (15)$$

6.2.11 Ekvivalentní délka vzduchové mezery

$$l' = \chi \cdot D_r = 0,278 \cdot 0,1092 = 0,0303[m] = 30,3 [mm] \quad (16)$$

6.2.12 Zvolení vzduchové mezery

Vzduchová mezera by měla být větší než 1mm [str. 297 [4]].

Zvoleno: $\delta = 1,4 [mm]$

5.2.13 Vnitřní průměr statoru

$$D_s = D_r + 2 \cdot \delta = 0,1092 + 2 \cdot 0,0014 = 0,112 [m] = 112 [mm] \quad (17)$$

6.2.14 Výpočet délky jádra generátoru

$$l = l' - 2 \cdot \delta = 0,0303 - 2 \cdot 0,0014 = 0,0275[m] = 27,5 [mm] \quad (18)$$

Výpočet statorového vinutí

6.2.15 Volba vinutí a jeho kroku

Zvoleno jednovrstvé vinutí s krokem $W_{\tau_p} = 1$

6.2.16 Volba počtu drážek na pól a fázi

Zvolen počet drážek na pól a fázi $q = 1$

6.2.17 Celkový počet drážek statoru

$$Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 1 = 48 \quad (19)$$

6.2.18 Drážková rozteč

$$\tau_u = \pi \cdot \frac{D_s}{Q} = \pi \cdot \frac{0,112}{48} = 0,0073 = 7,3 [mm] \quad (20)$$

6.2.19 Pólová rozteč

$$\tau_p = \pi \cdot \frac{D_s}{2 \cdot p} = \pi \cdot \frac{0,112}{2 \cdot 8} = 0,022 [m] = 22 [mm] \quad (21)$$

6.2.20 Zvolení relativní šířky magnetu [str. 304,[4]]

$$\alpha_{PM} = 0,8$$

6.2.21 Maximální hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_{max}

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře se pohybuje v rozmezí 0,85-1,05 T [Příloha F-Tab. F-3., str. 283, [4]].

$$\text{Zvolena : } B_{\delta} = 0,95 [T]$$

$$B_{max} = \frac{\pi \cdot B_{\delta}}{4 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{PM} \cdot \pi}{2}\right)} = \frac{\pi \cdot 0,95}{4 \cdot \sin\left(\frac{0,8 \cdot \pi}{2}\right)} = 0,7845 [T] \quad (22)$$

6.2.22 Činitel vinutí

$$k_w = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot W_{\tau_p}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m \cdot 2}\right)}{\frac{Q}{m \cdot p} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q}\right)} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 1\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3 \cdot 2}\right)}{\frac{48}{3 \cdot 8} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 8}{48}\right)} = 1 \quad (23)$$

6.2.23 Napětí indukované PM

$$E_{PM} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{28}{\sqrt{3}} = 16,17 [V] \quad (24)$$

6.2.24 Počet závitů na fázi

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{PM}}{\omega \cdot k_w \cdot \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'} = \frac{\sqrt{2} \cdot 16,17}{134,04 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,785 \cdot 0,022 \cdot 0,0303} = 407,3 \quad (25)$$

Upraveno na $N = 408$ závitů

6.2.25 Počet cívek v drážce, a - počet paralelních větví vinutí ($a=1$)

$$z_Q = 2 \cdot a \cdot m \cdot \frac{N}{Q} = 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot \frac{408}{48} = 51 \quad (26)$$

Výpočet statorové drážky

6.2.26 Šířka zubu statoru b_d

Hodnota magnetické indukce v zubu se pohybuje v rozmezí od 1,5 do 2 T [Příloha F-Tab. F-3., str. 283, [4]]. Zvolena:

$$B_z = 1,6 [T]$$

$$b_d = \frac{l' \cdot \tau_u}{k_{FE} \cdot l} \cdot \frac{B_{max}}{B_z} = \frac{0,0303 \cdot 0,073}{0,97 \cdot 0,0275} \cdot \frac{0,7845}{1,6} = 0,0041 [m] = 4,1 [mm] \quad (27)$$

6.2.27 Výpočet statorového proudu

$$I_s = \frac{P}{m \cdot E_{PM} \cdot \cos\varphi} = \frac{150}{3 \cdot 16,17 \cdot 1} = 3,09 \text{ [A]} \quad (28)$$

6.2.28 Průřezu vodiče vinutí

Proudová hustota se pohybuje od 3 do 5 A/mm² [Příloha F-Tab. F-4., str. 283, [4]].

Zvolena : $J_s = 4 \text{ [A/mm}^2\text{]}$

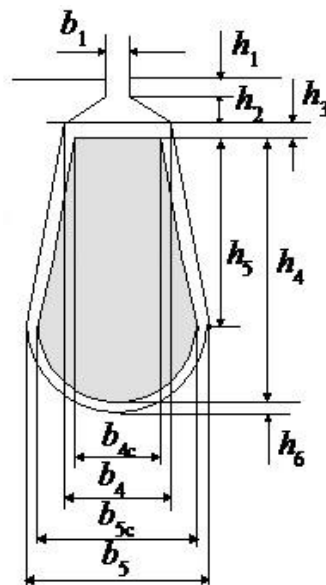
$$S_{cs} = \frac{I_s}{J_s} = \frac{3,09}{4} = 0,77 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (29)$$

6.2.29 Předběžný průřez otvoru drážky

$$S_0 = \frac{z_Q \cdot S_{cs}}{k_{Cus}} = \frac{51 \cdot 0,77}{0,89} = 44,12 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (30)$$

kde k_{Cus} je činitel plnění drážkové izolace který má přibližnou hodnotu 0,89 [str. 308, [4]].

6.2.30 Volba rozměrů a tvaru drážky



$$\begin{aligned} b_1 &= 0,001 \text{ [m]} \\ h_1 &= 0,001 \text{ [m]} \\ h_2 &= 0,001 \text{ [m]} \\ h_3 &= 0,0005 \text{ [m]} \\ h_6 &= 0,0005 \text{ [m]} \end{aligned}$$

Obr. 6-3. Rozměry drážky [7]

6.2.31 Rozměr drážky b_4

$$b_4 = \frac{\pi \cdot [D_s + 2 \cdot (h_1 + h_2)]}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot [0,112 + 2 \cdot (0,001 + 0,001)]}{48} - 0,0041 = 0,0035 \text{ [m]} = 3,5 \text{ [mm]} \quad (31)$$

6.2.32. Rozměr drážky b_{4c} a h_5

$$b_{4c} = b_4 + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_3}{Q} - 2 \cdot h_6 = 0,0035 + \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,0005}{Q} - 2 \cdot 0,0005 = 0,0026 [m] = 2,6 [mm] \quad (32)$$

Hodnota h_5 rozměru drážky zvolena tak, aby nová hodnota průřezu otvoru drážky odpovídala S_0 (přibližně).

$$h_5 = 0,011[m] = 11 [mm]$$

6.2.33 Rozměr drážky b_{5c}

$$b_{5c} = b_{4c} + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_5}{Q} = 0,0026 + \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,011}{48} = 0,004[m] = 4 [mm] \quad (33)$$

6.2.34 Průřez otvoru drážky pro vinutí

$$S_{cus} = \left(\frac{b_{4c} + b_{5c}}{2} \right) \cdot h_5 + \frac{\pi}{8} \cdot b_{5c}^2 = \left(\frac{0,0026 + 0,004}{2} \right) \cdot 0,011 + \frac{\pi}{8} \cdot 0,004^2 = 42,6 [mm^2] \quad (34)$$

6.2.35 Rozměr drážky b_5

$$b_5 = b_{5c} + 2 \cdot h_6 = 0,004 + 2 \cdot 0,0005 = 0,005[m] = 5 [mm] \quad (35)$$

6.2.36 Rozměr drážky h_4

$$h_4 = h_5 + \frac{b_{5c}}{2} = 0,011 + \frac{0,004}{2} = 0,013[m] = 13 [mm] \quad (36)$$

6.2.37 Celkový průřez statorové drážky

$$S_{celk} = b_1 \cdot h_1 + h_2 \cdot \left(\frac{b_4}{2} + \frac{b_1}{2} \right) + h_3 \cdot \left(b_4 + \frac{\pi \cdot h_3}{Q} \right) + h_5 \cdot \left(\frac{b_4 + b_5}{2} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot b_5^2 = 1 \cdot 1 + 2 \cdot \left(\frac{3,5}{2} + \frac{1}{2} \right) + 0,0005 \cdot \left(3,5 + \frac{\pi \cdot 0,0005}{48} \right) + 11 \cdot \left(\frac{3,5 + 5}{2} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot 5^2 = 61,8 [mm^2] \quad (37)$$

Výpočty magnetických napětí, výšky jha statoru, rotoru a PM

6.2.38 Magnetická indukce zubu B_{zs}

Zvolena zdánlivá magnetická indukce zubu dle [Příloha F-Tab. F-3., str. 283, [4]]:

$$B_z = 1,6 [T]$$

Z Obr.6-1. je odečtena hodnota H_z pro použitý materiál statoru (M800-50A) :

$$H_z = 1480 [A/m]$$

Skutečná hodnota magnetické indukce zubu statoru se vypočítá ze vztahu:

$$B_{zs} = B_z - \left(\frac{l' \cdot \tau_u}{k_{FE} \cdot l \cdot b_d} - 1 \right) \cdot \mu_0 \cdot H_z = \quad (38)$$

$$= 1,6 - \left(\frac{0,0303 \cdot 0,0073}{0,97 \cdot 0,275 \cdot 0,0041} - 1 \right) \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1480 = 1,598 [T]$$

Hodnotě B_{zs} odpovídá hodnota:

$$H_{zs} = 1465,2 [A/m]$$

5.2.39 Magnetické napětí zubu

$$U_{mz} = H_{zs} \cdot (h_3 + h_5) = 1465,2 \cdot (0,0005 + 0,011) = 16,85 [A] \quad (39)$$

6.2.40 Stanovení koeficientů pro výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře

$$\kappa = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arctg \cdot \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta} \right) - \frac{2 \cdot \delta}{b_1} \cdot \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta} \right)^2} \right) \right] = \quad (40)$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arctg \cdot \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,0014} \right) - \frac{2 \cdot 0,0014}{0,001} \cdot \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,0014} \right)^2} \right) \right] =$$

$$= 0,111$$

6.2.41 Carterův koeficient

$$k_c = \frac{\tau_u}{\tau_u - \kappa \cdot b_1} = \frac{0,0073}{0,0073 - 0,111 \cdot 0,001} = 1,0154 \quad (41)$$

6.2.42 Výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře $U_{m\delta e}$

Ekvivalentní vzduchová mezera pro výpočet magnetického napětí

$$\delta_e = k_c \cdot \delta = 1,0154 \cdot 0,0014 = 0,001422 [m] = 1,422 [mm] \quad (42)$$

Výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře

$$U_{m\delta e} = \frac{B_{max}}{\mu_0} \cdot \delta_e = \frac{0,7845}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,001422 = 887,76 [A] \quad (43)$$

6.2.43 Stanovení hodnoty maximální magnetické indukce pro jho statoru a rotoru [Příloha F-Tab. F-3., str. 283, [4]].

$$B_{js} = 1,3 [T] \quad [T] B_{jr} = 1,3 [T]$$

6.2.44 Magnetický tok procházející vzduchovou mezerou

$$\Phi = \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l' = 0,8 \cdot 0,7845 \cdot 0,022 \cdot 0,0303 = 0,00042 [Wb] = 0,42 [mWb] \quad (44)$$

6.2.45 Výška statorového jha

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot k_{FE} \cdot l \cdot B_{js}} = \frac{0,00042}{2 \cdot 0,97 \cdot 0,0275 \cdot 1,3} = 0,006[m] = 6 [mm] \quad (45)$$

6.2.46 Výška rotorového jha

$$h_{jr} = \frac{\Phi}{2 \cdot k_{FE} \cdot l \cdot B_{jr}} = \frac{0,00042}{2 \cdot 0,97 \cdot 0,0275 \cdot 1,3} = 0,006 [m] = 6 [mm] \quad (46)$$

6.2.47 Magnetické napětí ve jhu

Hodnoty $H_{js}=304 [A/m]$ a $H_{jr}=304 [A/m]$ odpovídají magnetizační charakteristice daného materiálu železa M800-50A pro indukci $B_{js}=1,3 [T]$ a $B_{jr}=1,3 [T]$. Té odpovídají také koeficienty $c_{js}=0,33$ a $c_{jr}=0,33$, které jsou odečteny z Obr. 6-2.

6.2.48 Střední průměr statorového jha

$$\begin{aligned} D_{js} &= D_s + 2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_6) + h_{js} = \\ &= 0,112 + 2 \cdot (0,001 + 0,001 + 0,0005 + 0,013 + 0,0005) + 0,006 = \\ &= 0,15 [m] = 150 [mm] \end{aligned} \quad (47)$$

6.2.49 Pólová rozteč pro střední průměr statorového jha

$$\tau_{js} = \frac{\pi \cdot D_{js}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,15}{2 \cdot 8} = 0,0295[m] = 29,5 [mm] \quad (48)$$

6.2.50 Magnetické napětí statorového jha

$$U_{mjs} = c_{js} \cdot H_{js} \cdot \tau_{js} = 0,33 \cdot 0,304 \cdot 0,0295 = 2,96 [A] \quad (49)$$

6.2.51 Výška permanentního magnetu (PM)

Pro výpočet magnetického napětí rotorového jha je nejprve nutné určit výšku permanentního magnetu

$$\begin{aligned} h_{PM} &= \frac{U_{m\delta e} + U_{mz} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{\pi \cdot c_{jr} \cdot H_{jr} \cdot (D_r - h_{jr})}{4 \cdot p}}{H_c - \frac{H_c}{B_r} \cdot B_{PM} \cdot \frac{\pi \cdot c_{jr} \cdot H_{jr}}{2 \cdot p}} = \\ &= \frac{887,76 + 20,51 + \frac{3,1}{2} + \frac{\pi \cdot 0,33 \cdot 304 \cdot (0,109 - 0,006)}{4 \cdot 8}}{800000 - \frac{800000}{1,05} \cdot 0,7845 \cdot \frac{\pi \cdot 0,33 \cdot 304}{2 \cdot 8}} = 0,0045 [m] = \\ &= 4,5[mm] \end{aligned} \quad (50)$$

kde B_{PM} je ekvivalentní B_{max} .

6.2.52 Střední průměr rotorového jha

$$D_{jr} = D_r - 2 \cdot h_{PM} - h_{jr} = 0,109 - 2 \cdot 0,0045 - 0,006 = 0,0942 [m] = 94,2 [mm] \quad (51)$$

6.2.53 Pólová rozteč pro střední průměr rotorového jha

$$\tau_{jr} = \frac{\pi \cdot D_{jr}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,0942}{2 \cdot 8} = 0,0185 [m] = 18,5 [mm] \quad (52)$$

6.2.54 Magnetické napětí rotorového jha

$$U_{mjr} = c_{jr} \cdot H_{jr} \cdot \tau_{jr} = 0,33 \cdot 304 \cdot 0,0185 = 1,86 [A] \quad (53)$$

6.2.55 Magnetické napětí PM

Magnetická indukce $B_{PM} = B_{\max} = 0,7845 [T]$

$$U_{mPM} = \frac{H_c}{B_r} \cdot h_{PM} \cdot B_{PM} = \frac{800000}{1,05} \cdot 0,0045 \cdot 0,7845 = 2689,8 [A] \quad (54)$$

6.2.56 Celkové magnetické napětí [náhradní magnetický obvod, Příloha G-Obr. G-4]

$$\begin{aligned} U_{mcelk} &= U_{m\delta e} + U_{mz} + U_{mPM} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2} = \\ &= 887,76 + 16,85 + 2689,8 + \frac{2,96}{2} + \frac{1,86}{2} = 3597 [A] \end{aligned} \quad (55)$$

Odpor statoru

6.2.57 Střední délka závitu cívky

$$\begin{aligned} l_{av} &= 2 \cdot l + 2,4 \cdot W_{tp} \cdot \tau_p + 0,1 = 2 \cdot 0,0275 + 2,4 \cdot 1 \cdot 0,022 + 0,1 = 0,208 [m] = \\ &= 208 [mm] \end{aligned} \quad (56)$$

6.2.58 Vodivost mědi při oteplení o 80°C

$$\sigma_{Cu} = \frac{\sigma_{Cu20C}}{1 + \theta \cdot \alpha_{Cu}} = \frac{5,7 \cdot 10^7}{1 + 80 \cdot 3,81 \cdot 10^{-3}} = 4,368 \cdot 10^7 [S/m] \quad (57)$$

σ_{Cu20C} je měrná vodivost mědi při 20°C, α_{Cu} je tepelný součinitel rezistivity mědi.

6.2.59 Odpor vinutí statoru

a – počet paralelních větví vinutí a = 1

$$R = \frac{N \cdot l_{av}}{\sigma_{Cu} \cdot a \cdot S_{cs}} = \frac{408 \cdot 0,208}{4,368 \cdot 10^7 \cdot 1 \cdot 0,77} = 2,52 [\Omega] \quad (58)$$

Magnetizační indukčnost

6.2.60 Efektivní vzduchová mezera pro výpočet magnetizační indukčnosti

$$\begin{aligned}\delta_{ef} &= \frac{U_{m\delta e} + U_{mz} + U_{mPM} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2}}{U_{m\delta e}} \cdot \delta_e = \\ &= \frac{887,76 + 20,51 + 2689,8 + \frac{3,1}{2} + \frac{1,86}{2}}{887,76} \cdot 0,001422 = 0,0058 [m] = \\ &= 5,8 [mm]\end{aligned}\quad (59)$$

6.2.61 Magnetizační indukčnost

$$\begin{aligned}L_{md} &= \frac{2 \cdot m \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot \tau_p \cdot (k_w(1) \cdot N)^2}{\pi^2 \cdot p \cdot \delta_{ef}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0303 \cdot 0,022 \cdot (1 \cdot 408)^2}{\pi^2 \cdot 8 \cdot 0,0058} = \\ &= 0,0018 H = 1,8 [mH]\end{aligned}\quad (60)$$

Rozptylové indukčnosti a reaktance

6.2.62 Drážkový úhel

$$\alpha_u = \frac{p \cdot 2 \cdot \pi}{Q} = \frac{8 \cdot 2 \cdot \pi}{48} = 1,047 [rad]\quad (61)$$

6.2.63 Stanovení koeficientů pro výpočet rozptylové indukčnosti a reaktance ve vzduchové mezeře

$$\begin{aligned}k_{\delta_1} &= \sum_{k=1}^{300} \left[\frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot W_{rp} \cdot \frac{\pi}{2}] \cdot \frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_u}{2}]}{q \cdot \sin[(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot \frac{\alpha_u}{2}]}}{(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot k_w(1)} \right]^2 = \\ &= \sum_{k=1}^{300} \left[\frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2}] \cdot \frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{1,047}{2}]}{1 \cdot \sin[(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot \frac{1,047}{2}]}}{(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1} \right]^2 = 0,037\end{aligned}\quad (62)$$

$$\begin{aligned}k_{\delta_2} &= \sum_{k=-1}^{-300} \left[\frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot W_{rp} \cdot \frac{\pi}{2}] \cdot \frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_u}{2}]}{q \cdot \sin[(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot \frac{\alpha_u}{2}]}}{(1 + 2 \cdot k \cdot m) \cdot k_w(1)} \right]^2 = \\ &= \sum_{k=-1}^{-300} \left[\frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2}] \cdot \frac{\sin[(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{1,047}{2}]}{1 \cdot \sin[(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot \frac{1,047}{2}]}}{(1 + 2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1} \right]^2 = 0,06\end{aligned}\quad (63)$$

$$k_{\delta} = k_{\delta_1} + k_{\delta_2} = 0,037 + 0,06 = ,097\quad (64)$$

6.2.64 Rozptylová indukčnost ve vzduchové mezeře

$$L_{\delta} = k_{\delta} \cdot L_{md} = 0,097 \cdot 0,0018 = 0,00018 [H] = 0,18 mH \quad (65)$$

6.2.65 Reaktance ve vzduchové mezeře

$$X_{\delta} = L_{\delta} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,00018 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,024 [\Omega] \quad (66)$$

6.2.66 Stanovení koeficientů pro výpočet rozptylové indukčnosti a reaktance v drážce

$$\varepsilon = 1 - W_{tp} = 1 - 1 = 0 \quad (66)$$

$$k_1 = 1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{9}{16} \cdot 0 = 1 \quad (67)$$

$$k_2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{3}{4} \cdot 0 = 1 \quad (68)$$

6.2.67 Měrná magnetická vodivost drážky

$$\begin{aligned} \lambda_u &= k_1 \cdot \frac{h_4}{3 \cdot b_4} k_2 \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \cdot \left(\frac{b_4}{b_1} \right) \right] = \\ &= 1 \cdot \frac{0,013}{3 \cdot 0,0035} \cdot 1 \cdot \left[\frac{0,0005}{0,0035} + \frac{0,001}{0,001} + \frac{0,001}{0,0035 - 0,001} \cdot \ln \cdot \left(\frac{0,0035}{0,001} \right) \right] = \\ &= 2,878 \end{aligned} \quad (69)$$

6.2.68 Rozptylová indukčnost v drážce

$$\begin{aligned} L_u &= \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot N^2 \cdot \lambda_u = \frac{4 \cdot 3}{48} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0303 \cdot 408^2 \cdot 2,878 = 0,0046 [H] = \\ &= 4,6 [mH] \end{aligned} \quad (70)$$

6.2.69 Reaktance v drážce

$$X_u = L_u \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,0046 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,62 [\Omega] \quad (71)$$

6.2.70 Měrná magnetická vodivost zubu

$$\lambda_z = k_2 \cdot \frac{5 \cdot \frac{\delta}{b_1}}{5 + 4 \cdot \frac{\delta}{b_1}} = 1 \cdot \frac{5 \cdot \frac{0,0014}{0,001}}{5 + 4 \cdot \frac{0,0014}{0,001}} = 0,66 [H/m] \quad (72)$$

6.2.71 Rozptylová indukčnost zubu

$$\begin{aligned} L_z &= \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot \lambda_z \cdot N^2 = \frac{4 \cdot 3}{48} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0303 \cdot 0,66 \cdot 408^2 = 0,001 [H] = \\ &= 1 [mH] \end{aligned} \quad (73)$$

6.2.72 Rozptylová reaktance v zubu

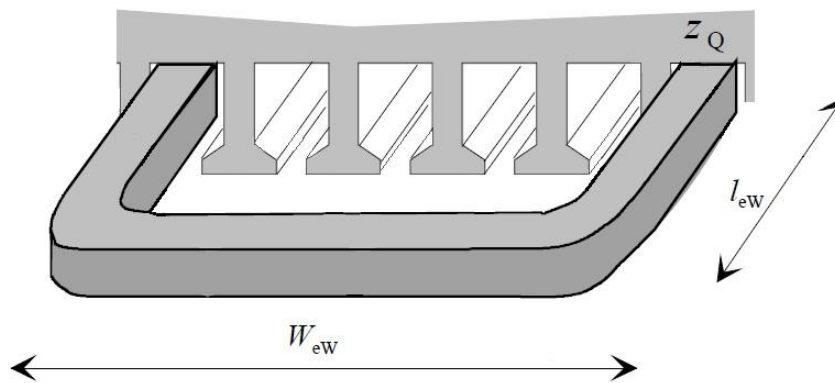
$$X_z = L_z \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,001 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,14 [\Omega] \quad (74)$$

6.2.73 Rozptylová indukčnost a reaktance na čele vinutí

Hodnoty měrných magnetických vodivostí jsou určeny z literatury [Příloha F-Tab. F-2., str. 248, [4]].

měrná magnetická vodivost čela vinutí axiální $\lambda_{lew} = 0,518$
 měrná magnetická vodivost čela vinutí radiální $\lambda_w = 0,138$

6.2.74 Délka čela vinutí



Obr. 6-4. Rozměry čela vinutí [7]

$$l_w = \frac{l_{av}}{2} - l = \frac{0,208}{2} - 0,0275 = 0,076 [m] = 76 [mm] \quad (75)$$

6.2.75 Délka úseku čela závitu radiální

$$W_{ew} = \tau_p = 0,022 [m] = 22 [mm]$$

6.2.76 Délka úseku čela závitu axiální

$$l_{ew} = \frac{l_w - W_{ew}}{2} = \frac{0,076 - 0,22}{2} = 0,027 [m] = 27 [mm] \quad (76)$$

6.2.77 Koeficient rozptylové indukčnosti

$$\lambda_w = \frac{2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + W_{ew} \cdot \lambda_w}{l_w} = \frac{2 \cdot 0,027 \cdot 0,518 + 0,022 \cdot 0,138}{0,076} = 0,408 \quad (77)$$

6.2.78 Rozptylová indukčnost na čele vinutí

$$L_w = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot q \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot l_w \cdot \lambda_w = \frac{4 \cdot 3}{48} \cdot 1 \cdot 408^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,076 \cdot 0,408 = 0,0016 [H] = 1,6 [mH] \quad (78)$$

6.2.79 Rozptylová reaktance na čele vinutí

$$X_w = L_w \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,0016 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,2145 [\Omega] \quad (79)$$

6.2.80 Rozptylová indukčnost statoru

$$L_{s\sigma} = L_\delta + L_u + L_z + L_w = 0,00018 + 0,0046 + 0,001 + 0,0016 = 0,0074 [H] = 7,4 [mH] \quad (80)$$

6.2.81 Rozptylová reaktance statoru

$$X_{s\sigma} = L_{s\sigma} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,0074 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,992 [\Omega] \quad (81)$$

6.2.82 Synchronní indukčnost v ose d

$$L_d = L_{s\sigma} + L_{md} = 0,0074 + 0,0018 = 0,009 [H] = 9 [mH] \quad (82)$$

6.2.83 Synchronní reaktance v ose d

$$X_d = L_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,009 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 1,233 [\Omega] \quad (83)$$

Výpočet ztrát

Pro výpočet ztrát v železe je nutné vypočítat hmotnosti jednotlivých částí generátoru.

6.2.84 Vnější průměr statorového jha

$$D_{se} = D_{js} + h_{js} = 0,15 + 0,006 = 0,156 [m] \quad (84)$$

6.2.85 Objem statorového jha

$$V_{js} = \pi \cdot \left[\left(\frac{D_{se}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{se}}{2} - h_{js} \right)^2 \right] \cdot l = \pi \cdot \left[\left(\frac{0,156}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,156}{2} - 0,006 \right)^2 \right] \cdot 0,0275 = 0,000078 [m^3] \quad (85)$$

6.2.86 Hmotnost statorového jha

$$m_{js} = V_{js} \cdot \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} = 0,000078 \cdot 7600 \cdot 0,97 = 0,575 [kg] \quad (86)$$

6.2.87 Hmotnost statorových zubů

$$m_z = \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot Q \cdot b_d \cdot h_5 \cdot l = 7600 \cdot 0,97 \cdot 48 \cdot 0,0041 \cdot 0,011 \cdot 0,0275 = 0,4376 [kg] \quad (87)$$

6.2.88 Ztráty ve statorovém jhu a v zubech

$$k_{Fejs} = 1,5 \\ k_{Fez} = 2$$

jsou korekční koeficienty pro výpočet ztrát ve statorovém jhu a v zubech [Příloha F-Tab. F-1., str. 198, [4]].

$$P_{15} = 6,6 [W/kg] - \text{ztráta v železe pro material M800-50 při 50 Hz}$$

6.2.89 Ztráta ve statorovém jhu

$$P_{Fejs} = k_{Fejs} \cdot P_{15} \cdot \left(\frac{B_{js}}{1,5}\right)^2 \cdot m_{js} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^3 = 1,5 \cdot 6,6 \cdot \left(\frac{1,3}{1,5}\right)^2 \cdot 0,575 \cdot \left(\frac{21,33}{50}\right)^3 = 1,19 [W] \quad (88)$$

6.2.90 Ztráta ve statorových zubech

$$P_{Fez} = k_{Fez} \cdot P_{15} \cdot \left(\frac{B_z}{1,5}\right)^2 \cdot m_z \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^3 = 2 \cdot 6,6 \cdot \left(\frac{1,598}{1,5}\right)^2 \cdot 0,4376 \cdot \left(\frac{21,33}{50}\right)^3 = 1,83 [W] \quad (89)$$

6.2.91 Celkové ztráty v železe

$$P_{Fe} = P_{Fejs} + P_{Fez} = 1,19 + 1,83 = 3,02 [W] \quad (90)$$

6.2.92 Rychlost na povrchu rotoru (m/s)

$$v_r = \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot D_r = \pi \cdot \frac{160}{60} \cdot 0,109 = 0,9151 [m/s] \quad (91)$$

6.2.93 Mechanické ztráty

Je obtížné je přesně stanovit (ztráty třením, chlazením, v ložiskách), běžně se určují experimentálně.

$$P_{mech} = k_\rho \cdot D_r \cdot (l + 0,6 \cdot \tau_p) \cdot v_r^2 = 10 \cdot 0,109 \cdot (0,0275 + 0,6 \cdot 0,022) \cdot 0,9151^2 = 0,0373 [W] \quad (92)$$

k_ρ - koeficient pro výpočet mechanické ztráty [Příloha F-Tab. F-7., str. 462, [4]].

$$k_\rho = 10 [Ws^2/m^4]$$

6.2.94 Fiktivní vzduchová mezera pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře

$$\delta_{fikt} = \delta + \frac{h_{PM}}{2 \cdot \mu_{PM}} = 0,0014 + \frac{0,0045}{2 \cdot 1,0445} = 0,00355 [m] \quad (93)$$

6.2.95 Stanovení koeficientů pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře

$$u = \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_{fikt}}\right) + \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_{fikt}}\right)^2} = \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,00355}\right) + \sqrt{1 + \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,00355}\right)^2} = 1,1407 \quad (94)$$

$$\beta = \frac{1 + u^2 - 2 \cdot u}{2 \cdot (1 + u^2)} = \frac{1 + 1,1407^2 - 2 \cdot 1,1407}{2 \cdot (1 + 1,1407^2)} = 0,0043 \quad (95)$$

$$B_0 = \beta \cdot B_{max} = 0,0043 \cdot 0,7845 = 0,0034 \quad (96)$$

$$\sigma_{PM} = 670000 \text{ [S/m]}$$

$$k_v = \sqrt{\omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot \mu_{PM} \cdot \mu_0 \cdot \frac{\sigma_{PM}}{2}} = \sqrt{134,04 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1,0445 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{670000}{2}} = 19,2 \quad (97)$$

$$\beta_v = \frac{\omega \cdot 2 \cdot \pi}{\pi \cdot D_r \cdot \frac{n}{60}} = \frac{134,04 \cdot 2 \cdot \pi}{\pi \cdot 0,109 \cdot \frac{160}{60}} = 920,38 \quad (98)$$

$$\alpha_{Rv} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \sqrt{\sqrt{4 + \left(\frac{\beta_v}{k_v}\right)^4} + \left(\frac{\beta_v}{k_v}\right)^2} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \sqrt{\sqrt{4 + \left(\frac{920,38}{19,24}\right)^4} + \left(\frac{920,38}{19,24}\right)^2} = 47,84 \quad (99)$$

6.2.96 Ztráty ve vzduchové mezeře

$$\begin{aligned} P_\delta &= \left(\frac{\alpha_{Rv}}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{\tau_u}{2 \cdot l}\right) \cdot \left(\frac{B_0}{\mu_{PM} \cdot \mu_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{k_v}{\sigma_{PM}}\right) \cdot \pi \cdot D_r \cdot \alpha_{PM} \cdot l \cdot \frac{(\sqrt{2} \cdot k_v)^2}{\beta_v^2} = \\ &= \left(\frac{47,84}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{0,0073}{2 \cdot 0,275}\right) \cdot \left(\frac{0,0034}{1,0455 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}\right)^2 \cdot \left(\frac{19,24}{670000}\right) \cdot \pi \cdot \\ &\cdot 0,109 \cdot 0,8 \cdot 0,0275 \cdot \frac{(\sqrt{2} \cdot 19,24)^2}{920,38^2} = 0,0350 \text{ [W]} \end{aligned} \quad (100)$$

6.2.97 Přídavné ztráty

Dle literatury [Příloha F-Tab. F-6., str. 459, [4]], lze počítat přídavné ztráty 0,1% vstupního výkonu.

$$P_{ex} = \frac{0,1}{100} \cdot P_h = \frac{0,1}{100} \cdot 200 = 0,2 \text{ [W]} \quad (101)$$

6.2.98 Ztráty v mědi

$$P_{Cu} = 3 \cdot R \cdot I_s^2 = 3 \cdot 2,52 \cdot 3,09^2 = 72,18 \text{ [W]} \quad (102)$$

6.2.99 Celkové ztráty generátoru

$$\begin{aligned} P_{celk} &= P_{Fe} + P_\delta + P_{mech} + P_{Cu} + P_{ex} = 3,02 + 0,035 + 0,0373 + 72,18 + 0,2 = \\ &= 75,47 \text{ [W]} \end{aligned} \quad (103)$$

Výkon generátoru a účinnost

6.2.100 Elektrický výkon generátoru

$$P_{el} = P_h - P_{celk} = 200 - 75,47 = 124,53 \text{ [W]} \quad (104)$$

6.2.101 Účinnost generátoru

$$\eta_g = \frac{P_{el}}{P_h} \cdot 100 = \frac{124,53}{200} \cdot 100 = 62,23 [\%] \quad (105)$$

Na základě prvního výpočtu byl proveden druhý výpočet, jehož cílem bylo zvýšit účinnost navrhovaného generátoru. Z výsledků prvního výpočtu vyplynulo, že nejvyšší ztráty vznikají ve vinutí statoru a to díky hodnotě elektrického odporu. Řešením jak snížit odpor vinutí bylo snížit jeho proudovou hustotu, neboli zvýšit průřez vodiče. Proto byla v následném výpočtu zvolena nová hodnota proudové hustoty a to 2,5 A/mm² namísto původní 4 A/mm² a výpočet byl stejným způsobem opakován. Hlavní výsledky nového výpočtu jsou uvedeny v Tab. 6-2 ve sloupci "Hodnoty výpočet 2". Díky této úpravě bylo dosaženo účinnosti 75%, což odpovídá našim původním předpokladům.

6.3 Přehled vypočtených hodnot generátoru s PM

Veličina	Značka	Hodnoty výpočet 1	Hodnoty výpočet 2	Jednotka
Elektrický výkon generátoru	P_{el}	124,53	150,55	W
Příkon generátoru	P_h	200,00	200,00	W
Účinnost generátoru	η_g	62,26	75,28	%
Moment na hřídeli generátoru	T	11,94	11,94	Nm
Frekvence výstupního napětí	f	21,33	21,33	Hz
Úhlová rychlost magnetického pole	ω	134,04	134,04	Rad/s
Úhlová rychlost hřídele generátoru	ω_h	16,76	16,76	Rad/s
Vnější průměr rotoru	D_r	0,1092	0,1092	m
Vnitřní průměr statoru	D_s	0,1120	0,1120	m
Vnější průměr statorového jha	D_{se}	0,1560	0,1688	m
Výška statorového jha	h_{js}	0,0060	0,0060	m
Výška rotorového jha	h_{jr}	0,0060	0,0060	m
Ekvivalentní délka vzduchové mezery	l'	0,0303	0,0303	m
Délka jádra generátoru	l	0,0275	0,0275	m
Vzduchová mezera	δ	0,0014	0,0014	m
Šířka zubu statoru	b_d	0,0041	0,0041	m
Počet závitů na fázi	N	408,00	408,00	-
Počet cívek v držce	Z_Q	51,00	51,00	-
Statorový proud	I_S	3,09	3,09	A
Proudová hustota vinutí statoru	J_S	4	2,5	A/m ²
Odpor vinutí statoru	R	2,52	1,57	Ω
Napětí indukované PM (fázové efektivní)	E_{PM}	16,17	16,17	V
Magnetický tok procházející vzduchovou mezerou	φ	0,00042	0,00042	Wb
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	B_δ	0,95	0,95	T
Magnetická indukce (T)	B_{max}	0,7845	0,7845	T
Magnetická indukce zubu	B_{ZS}	1,598	1,598	T
Intenzita magnetického pole zubu	H_{ZS}	1465,2	1465,2	A/m
Výška permanentních magnetů	h_{PM}	0,0045	0,0046	m
Krok vinutí	W_{tp}	1	1	-
Počet drážek na pól a fázi	q	1	1	-
Celkový počet drážek	Q	48	48	-
Drážková rozteč	τ_u	0,0073	0,0073	m
Pólová rozteč	τ_p	0,0220	0,0220	m
Průřez vodiče vinutí	S_{CS}	0,770	1,24	mm ²
Celkový průřez statorové drážky	S_{celk}	61,80	98,15	mm ²
Magnetizační indukčnost	L_{md}	0,0018	0,0018	H

Veličina	Značka	Hodnoty výpočet 1	Hodnoty výpočet 2	Jednotka
Magnetické napětí zubu	U_{mz}	16,85	25,64	A
Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	$U_{m\delta e}$	887,76	903,99	A
Magnetické napětí statorového jha	U_{mjs}	2,96	3,21	A
Magnetické napětí rotorového jha	U_{mjr}	1,86	1,86	A
Magnetické napětí permanentního magnetu	U_{mPM}	2689,80	2749,58	A
Celkové magnetické napětí	U_{mcelk}	3597	3682	A
Rozptylová indukčnost ve vzduchové mezeře	L_{δ}	0,00018	0,00017	H
Reaktance ve vzduchové mezeře	X_{δ}	0,024	0,023	Ω
Rozptylová indukčnost v drážce	L_u	0,0046	0,0049	H
Reaktance v drážce	X_u	0,62	0,66	Ω
Rozptylová indukčnost v zubu	L_Z	0,0010	0,0008	H
Rozptylová reaktance v zubu	X_Z	0,14	0,11	Ω
Rozptylová indukčnost na čele vinutí	L_W	0,0016	0,0016	H
Rozptylová reaktance na čele vinutí	X_W	0,2145	0,2145	Ω
Rozptylová indukčnost statoru	$L_{S\sigma}$	0,0074	0,0075	H
Rozptylová reaktance statoru	$X_{S\sigma}$	0,992	1,005	Ω
Synchronní indukčnost v ose d	L_d	0,009	0,009	H
Synchronní reaktance v ose d	X_d	1,233	1,247	Ω
Ztráta ve statorovém jhu	P_{Fejs}	1,19	1,28	W
Ztráta ve statorových zubech	P_{Fez}	1,83	2,82	W
Celkové ztráty v železe	P_{Fe}	3,02	4,10	W
Mechanické ztráty	P_{mech}	0,0373	0,0373	W
Ztráty ve vzduchové mezeře	P_{δ}	0,035	0,142	W
Přídavné ztráty generátoru	P_{ex}	0,2	0,2	W
Ztráty v mědi	P_{cu}	72,18	44,97	W
Celkové ztráty generátoru	P_{celk}	75,47	49,75	W
Rozměr drážky	h_1	0,0010	0,0010	m
Rozměr drážky	h_2	0,0010	0,0010	m
Rozměr drážky	h_3	0,0005	0,0005	m
Rozměr drážky	h_4	0,0130	0,0194	m
Rozměr drážky	h_5	0,0110	0,0170	m
Rozměr drážky	h_6	0,0005	0,0005	m
Rozměr drážky	b_1	0,0010	0,0015	m
Rozměr drážky	b_4	0,0035	0,0035	m
Rozměr drážky	b_5	0,0050	0,0058	m
Rozměr drážky	b_{4c}	0,0026	0,0026	m
Rozměr drážky	b_{5c}	0,0040	0,0048	m

Tab. 6-2. Vypočtené hodnoty generátoru

Závěr

Z rešerše trhu byly vybrány 3 zahraniční generátory, které by se teoreticky daly použít pro turbínu Setur a jenž byly prezentovány u zadavatele tematického úkolu. Nákup některého z výše uvedených generátorů se prozatím neuskutečnil a tím ani jeho praktické odzkoušení. Pro zadavatele je především cena uvedených výrobků příliš vysoká a proto momentálně nevidí nákup některého z komerčně vyráběných výrobků pro své záměry jako reálný. Z tohoto důvodu byl proveden vlastní návrh generátoru, který svými parametry odpovídá zadání a lze ho vyrobit levněji v našich tuzemských podmínkách. Při výpočtu generátoru bylo zjištěno, že celková účinnost navrhovaného generátoru je nejvíce ovlivněna celkovým odporem vinutí, ve kterém vznikají nejvyšší ztráty. Na základě tohoto poznatku byl proveden druhý výpočet, jehož cílem bylo zvýšit účinnost navrhovaného generátoru. Výsledky nového výpočtu jsou uvedeny v tab. 6-2, spolu s výsledky prvního výpočtu tak, že je lze vzájemně porovnat. Díky snížení odporu vinutí bylo dosaženo účinnosti 75%, což vyhovuje našim původním záměrům.

Výpočet generátoru, jenž vycházel především z literatury [4] a její přílohy [14], je vhodným podkladem pro zhotovení funkčního prototypu, na kterém je nutné potvrdit výsledky vypočtených parametrů. Z výsledku výpočtu lze konstatovat, že navržený generátor splňuje stanovené cíle a jehož případným uplatněním dojde ke zvýšení účinnosti malé vodní elektrárny a tudíž lepšímu využití energetického potenciálu přírodního zdroje.

Použitá literatura

- [1] ŘÍHA, Josef. *Elektrické stroje a přístroje*. Vyd. 2. Praha : SNTL, 1986. 288 s. L26-C1-II-84/55746.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Elektrické stroje : Působení, provedení a navrhování*. Vyd. 6. Praha II, Biskupská 7 : Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. 816 s. DT 621.313/.314.
- [3] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje : III. Navrhování elektrických strojů točivých*. Vyd. 2. Praha : SNTL, 1982. 240 s. L26-C2-II-84/55595.
- [4] PYRHÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of Rotating Electrical Machines*. [s.l.] : John Wiley & Sons, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [5] *Abeceda vodních pohonů* [online]. 2010 [cit. 2011-05-13]. Turbína SETUR. Dostupné z WWW: <<http://mve.energetika.cz/jineturbiny/setur.htm>>.
- [6] *DVE* [online]. 2010 [cit. 2011-06-29]. DVE Technologies - Permanent Magnet Generator for small wind turbines. Dostupné z WWW: <<http://dvetech.dk/?page=PMG&id=63>>.
- [7] *ALXION* [online]. 2010 [cit. 2011-06-08]. ALXION Automatique&Productique. Dostupné z WWW: <http://alxion.com/bin/e_eoliennes.html>.
- [8] *Ginlong* [online]. 2006 [cit. 2011-04-23]. 1kw Wind Turbine Permanent Magnet Generator Alternator. Dostupné z WWW: <<http://ginlong.com/wind-turbine-pmg-pma-permanent-magnet-generator-alternator-GL-PMG-1000.htm>>.
- [9] KOCMAN, Stanislav. *Synchronní stroje*. Ostrava, 2004. 6 s. Oborová práce. Technická univerzita Ostrava. Dostupné z WWW: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf>.
- [10] ČERNÝ, Ondřej. *Výzkum perspektivních metod mikroprocesorového řízení pro trakční synchronní motor s permanentními magnety*. Pardubice, 2009. 95 s. Dizertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Dostupné z WWW: <https://dspace.upce.cz:8443/bitstream/10195/37242/1/Disertacni_prace_Ing_Cerny.pdf>.
- [11] *Sinomag* [online]. 2006 [cit. 2011-07-05]. Permanentni_magnety. Dostupné z WWW: <http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf>.
- [12] *Sura* [online]. 2008 [cit. 2011-08-04]. Typical data for SURA. Dostupné z WWW: <[http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/\\$FILE/800-50.pdf?OpenElement](http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/$FILE/800-50.pdf?OpenElement)>.
- [13] KALINA, František; SEDLÁČEK, Miroslav. *Setur* [online]. 2003 [cit. 2011-08-16]. Účinnost turbíny SETUR. Dostupné z WWW: <<http://setur.cz/index.asp?dokument=37&sablona=9999>>.
- [14] Wiley Higher Education Supplementary Website. *Wiley* [online]. 2008 [cit. 2011-07-13]. Dostupné z: http://www.wiley.com/legacy/wileychi/pyrhonen_rotating/

[15] KVAPIL, Martin. *Návrh generátoru pro malou vodní elektrárnu*. Brno, 2011. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40775. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

Seznam příloh

Příloha A - Výstupní charakteristiky generátoru 1

- Obr. A-1. Výkonová charakteristika [6]
- Obr. A-2. Závislost výstupního proudu na momentu pro [6]
- Obr. A-3. Momentová charakteristika [6]
- Obr. A-4. Výstupní střídavé napětí [6]
- Obr. A-5. Výstupní stejnosměrné napětí [6]

Příloha B - Výstupní charakteristiky generátoru 2

- Obr. B-1. Výkonová charakteristika [7]
- Obr. B-2. Momentová charakteristika [7]
- Obr. B-3. Výstupní střídavé napětí [7]
- Obr. B-4. Účinnostní charakteristika [7]

Příloha C - Výstupní charakteristiky generátoru 3

- Obr. C-1. Výkonová charakteristika [8]
- Obr. C-2. Momentová charakteristika [8]
- Obr. C-3. Výstupní střídavé napětí bez zatížení [8]

Příloha D - Demagnetizační křivky permanentních magnetů [11]

Příloha E - Katalogový list elektromagnetického materiálu M800-50A [12]

Příloha F - Tabulky z literatury [4]

- Tab. F-1. Korekční koeficienty $k_{Fe,n}$ [4]
- Tab. F-2. Určení hodnot měrných magnetických vodivostí λ_{lew} , λ_w [4]
- Tab. F-3. Dovolené hustoty toku magnetického obvodu pro různé typy standardních elektrických strojů [4]
- Tab. F-4. Určení proudové hustoty J_s [4]
- Tab. F-5. Určení tangenciálního napětí σ_{Tan} [4]
- Tab. F-6. Určení přídavných ztrát vstupního výkonu [4]
- Tab. F-7. Určení koeficientu pro výpočet mechanické ztráty [4]

Příloha G - Výkresy návrhu

- Obr. G-1. Nákres navrženého generátoru
- Obr. G-2. Jednovrstvé statorové vinutí navrženého generátoru
- Obr. G-3. Magnetické toky navrženého generátoru
- Obr. G-4. Navržená drážka
- Obr. G-5. Náhradní magnetický obvod navrženého generátoru