

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

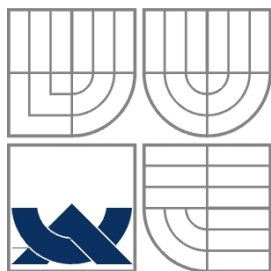
MODELOVÁNÍ PROVOZNÍCH STAVŮ A VYUŽITELNOST ELEKTRICKÉHO GENERÁTORU NAVRŽENÉHO PRO SPINNINGOVÉ KOLO

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

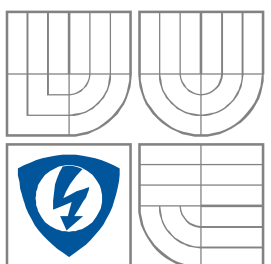
Bc. Jiří Sádlik

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

MODELOVÁNÍ PROVOZNÍCH STAVŮ A VYUŽITELNOST ELEKTRICKÉHO GENERÁTORU NAVRŽENÉHO PRO SPINNINGOVÉ KOLO

**DESIGN, SIMULATION AND USABILITY OF THE ELECTRIC MACHINE DESIGNED FOR THE
SPINNING BICYCLE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Sádlik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Kurfürst

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jiří Sádlik

ID: 98272

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Modelování provozních stavů a využitelnost elektrického generátoru navrženého pro spinningové kolo.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě patentové rešerše a znalostí o elektrických strojích vyberte vhodný generátor pro spinningové kolo.
2. Vytvořte parametrický model pro výpočet MKP a analyzujte vybrané topologie stroje.
3. Analyzujte navržený stroj s ohledem na výstupní výkon stroje a velikost indukovaného napětí.
4. Zpracujte získané teoretické výsledky a předložte koncepci generátoru na spinningové kolo.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 17.9.2012

Termín odevzdání: 28.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kurfürst

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce provádí kompletní návrh generátoru do spinningového kola. Je řešena problematika současného vývoje a proveden analytický návrh generátoru. Pro analýzu a optimalizaci je používán program Maxwell. Na základě získaných výsledků je vytvořen model a konstrukční výkres generátoru. Závěr práce se věnuje problematice zapojení generátoru do elektrické sítě a cenové kalkulaci návratnosti investice.

Abstract

This thesis provides complete design of generator into a spinning bike. The issue of current development is solved and the analytical design of the generator is made. The software Maxwell is being used for the analysis and optimization. On the basis of the obtained results is designed a model and a design drawing of the generator. The end of the thesis deals with the issue of connecting the generator to the mains supply and price calculation of the investment return.

Klíčová slova

Spinning; generátor; Maxwell; Rmxprt; analytický návrh; synchronní stroj; vinutí; připojení do elektrické soustavy; cenová kalkulace; návratnost investice;

Keywords

Spinning; generator; Maxwell; Rmxprt; analytical design; synchronous machine; winding; connection to the electricity grid; price calculation; return on investment.

Bibliografická citace

SÁDLÍK, J. Modelování provozních stavů a využitelnost elektrického generátoru navrženého pro spinningové kolo. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Kurfürst.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Modelování provozních stavů a využitelnost elektrického generátoru navrženého pro spinningové kolo, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

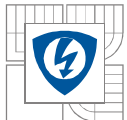
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiří Kurfürst za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

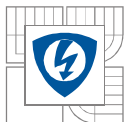
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

1 ÚVOD.....	13
2 PROBLEMATIKA	14
2.1 SPINNING	14
2.1.1 SPINNINGOVÉ KOLO	14
2.1.2 REGULACE ZÁTĚŽE.....	14
2.2 LIDSKÉ TĚLO.....	15
2.2.1 MNOŽSTVÍ VYROBENÉ ENERGIE.....	15
2.3 PATENTY	16
2.3.1 ČESKÉ.....	16
2.3.2 EVROPSKÉ	16
2.4 ČLÁNKY.....	16
2.5 POŽADAVKY NA GENERÁTOR.....	18
3 ANALYTICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE.....	19
3.1 HLAVNÍ ROZMĚRY	19
3.1.1 ROZMĚRY STATORU	20
3.1.2 VÝPOČET STATOROVÉHO JHA	23
3.2 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE	26
3.3 MOMENT SYNCHRONNÍHO STROJE.....	27
3.4 NÁVRH ROZMĚRŮ ROTORU PRO STROJ II.....	27
3.5 MAGNETY.....	28
4 NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE.....	29
4.1 VÝPOČET STROJE I.....	29
4.1.1 ZADANÉ PARAMETRY	29
4.1.2 VYPOČTENÉ PARAMETRY STROJE	29
4.2 STROJ II.....	30
4.2.1 ROTOR	30
4.3 RMXPRT	31
4.4 NÁVRH VINUTÍ	32
4.4.1 TINGLEYHO SCHÉMA	32
4.4.2 NÁVRH VINUTÍ.....	33
5 PARAMETRICKÝ MODEL STROJE	35
5.1 DEFINICE PROMĚNNÝCH	35
5.2 ROTOR.....	35
5.3 DRÁŽKA.....	36
5.4 STATOR A VINUTÍ	36
5.5 MATERIÁL.....	37
5.6 MODEL	38
6 MAXWELL 2D	39



6.1 TEORIE	39
6.2 STROJ VYPOČÍTÁN ANALYTICKY	39
6.2.1 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ STROJE.....	40
6.2.2 MOMENT STROJE	41
6.3 STROJ II.....	42
6.3.1 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ STROJE.....	42
6.3.2 MAGNETICKÁ INDUKCE VE STROJI	43
6.3.3 VÝSTUPNÍ VÝKON STROJE	44
6.4 PARAMETRY STROJE	46
7 3D MODEL – INVENTOR.....	47
8 PŘIPOJENÍ DO ELEKTRICKÉ SOUSTAVY	48
8.1 PŘIPOJENÍ DO OSTROVNÍHO PROVOZU	48
8.2 PŘIPOJENÍ DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	49
9 MOŽNOST VYUŽITÍ.....	50
9.1 CENA SESTAV	50
9.2 ODHAD VYROBENÉ ENERGIE.....	51
9.3 NÁVRATNOST INVESTICE	53
10 KONCEPCE GENERÁTORU	54
11 ZÁVĚR	55
LITERATURA.....	56
PŘÍLOHY	59



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Spinningové kolo [12].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Průměrný výkon příležitostného cyklisty [15]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 Kolo ve stojanu [20]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4 Drážka [5].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 5 Parametry statoru</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 6 Zvolený typ drážky a) pro analytický návrh, b) pro stroj II.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 7 Spojení fáze A, B, C ve dvojvrstevném vinutí.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 8 Model vygenerovaný skriptem</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 9 Tabulka definovaných proměnných</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 10 Definované proměnné a parametry v Maxwell 2D.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 11 Síť konečných prvků</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 12 Rovinné a prostorové elementy</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 13 Magnetická indukce optimalizovaného stroje s 15 drážkami $t=0,1s$.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 14 Magnetická indukce optimalizovaného stroje s 45 drážkami $t=0,12s$.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 15 Vektor magnetické indukce u optimalizovaného stroje $t=0,12s$</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 16 Motor vymodelovaný v programu Maxwell</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 17 Model upravený v Programu Autodesk Inventor 2013</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 18 Koncepce zapojení generátoru</i>	<i>54</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Možný vydaný výkon pro jednotlivé cvičící stroje [16]</i>	16
<i>Tab. 2 Povolená indukce magnetického obvodu pro různé standardní elektrické stroje.[5]</i>	24
<i>Tab. 3 Povolené RMS hodnoty pro proudové hustoty J a lineární proudové hustoty A pro různé elektrické stroje pro měděné vinutí [5]</i>	24
<i>Tab. 4 Typické $\chi=l/D$ poměry pro různé elektrické stroje.[5]</i>	25
<i>Tab. 5 Tangenciální napětí σ_{tan} vypočítané z hodnot z tabulky 2 a 3.[5]</i>	25
<i>Tab. 6 Hlavní rozměry stroje</i>	29
<i>Tab. 7 Rozměry drážky</i>	29
<i>Tab. 8 Parametry setrvačnicku</i>	30
<i>Tab. 9 Hmotnost rotoru v závislosti na otáčkách a průměru</i>	30
<i>Tab. 10 Hmotnost rotoru</i>	31
<i>Tab. 11 Parametry Stroje II</i>	31
<i>Tab. 12 Tingleyovo schéma</i>	33
<i>Tab. 13 Rozdělení cívkových stran vinutí</i>	33
<i>Tab. 14 Závislost úhlu natočení na maximálním výkonu stroje</i>	45
<i>Tab. 15 Parametry stroje</i>	46
<i>Tab. 16 Kalkulace ceny pro ostrovní provoz 1)a</i>	50
<i>Tab. 17 Kalkulace ceny pro ostrovní provoz 1)b</i>	51
<i>Tab. 18 Kalkulace ceny připojení do sítě využití měniče 2)a</i>	51
<i>Tab. 19 Kalkulace ceny připojení do sítě pomocí střídače 2)b</i>	51
<i>Tab. 20 Hodinová využitelnost kola</i>	52
<i>Tab. 21 Vyrobená energie v kWh</i>	52
<i>Tab. 22 Návratnost investice</i>	53



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	počet paralelních větví	[-]
A	intenzita proudu	[Am ⁻¹]
a_{pm}	korekce magnetických ztrát u magnetu	[-]
A_v	Vyrobena energie	[kWh]
β	Zátěžný úhel	[°]
b_1	rozměr drážky	[m]
B_{1spic}	maximální indukce ve vzduchové mezeře	[T]
b_4	rozměr drážky	[m]
b_{4c}	rozměr drážky	[m]
b_{5c}	rozměr drážky	[m]
B_σ	indukce ve vzduchové mezeře	[T]
B_z	indukce v zubu statoru	[T]
b_z	šířka zubu	[m]
D	střední průměr vzduchové mezery	[m]
δ	Vzduchová mezera	[m]
D_r	vnitřní průměr rotoru	[m]
D_{ro}	vnější průměr rotoru	[m]
D_s	vnitřní průměr statoru	[m]
D_{so}	vnější průměr statoru	[m]
D_v	průměr vodiče	[m]
E_i	indukované pole	[V m ⁻¹]
E_k	kinetická energie	[J]
f	frekvence	[Hz]
F	síla	[N]
ϕ	magnetický tok	[Wb]
η	účinnost	[-]
h'	rozměr drážky	[m]
h_1	rozměr drážky	[m]
h_2	rozměr drážky	[m]
h_3	rozměr drážky	[m]
h_4	rozměr drážky	[m]
h_5	rozměr drážky	[m]
h_6	rozměr drážky	[m]
h_{j1}	výška statorového jha	[m]
i_d	proud v d ose stroje	[A]
i_q	proud v q ose stroje	[A]
I_n	jmenovitý proud stroje	[A]
I_{n1}	jmenovitý proud vinutím	[A]
I_{n10m}	proud stroje po dobu 10minut	[A]



I_{n60m}	proud stroje po dobu 60minut	[A]
φ	účiník	[°]
J	Moment setrvačnosti	[kg m ²]
J_a	proudová hustota	[A mm ⁻²]
k_{dr}	koeficient plnění drážky	[-]
k_{Fe}	koeficient plnění železa	[-]
k_v	koeficient využití	[-]
K_w	koeficient určující poměr toků ve vinutí	[-]
l	aktivní délka stroje	[m]
L_d	indukčnost v d ose stroje	[H]
L_q	indukčnost v q ose stroje	[H]
m	hmotnost	[kg]
m	počet fází	[-]
M	moment	[Nm]
n	otáčky stroje	[s ⁻¹]
N	počet závitů jedné fáze cívky	[-]
N_v	počet závitů ve vinutí	[-]
p	počet pólových dvojic	[-]
P	elektrický výkon	[W]
q	počet drážek na pól	[-]
Q	počet drážek statoru	[-]
S_{dr}	plocha drážky	[m ²]
S_{drcu}	plocha mědi v drážce	[m ²]
σ_{Ftan}	tangenciální napětí železa	[Pa]
S_v	plocha vodiče	[m ²]
t	doba provozu	[hod]
T	doba využitelnosti	[hod]
T_{max}	doba jednoho roku	[hod]
t_d	drážková rozteč	[m]
t_p	pólová rozteč	[m]
U	napětí	[V]
U_f	fázové napětí	[V]
U_i	Indukované napětí	[V]
U_{pm}	indukované napětí indukované permanentními magnety	[V]
V_d	počet vodičů v drážce	[-]
V_r	objem	[m ³]
ω	úhlová rychlost	[rad s ⁻¹]



1 ÚVOD

V současné době je v energetické politice trendem prosazování výroby elektřiny pomocí alternativních zdrojů. Mezi hlavní alternativní zdroje energie patří obnovitelné zdroje, které využívají vítr, sluneční záření, vodu a další. K těmto alternativním zdrojům patří i výroba elektrické energie pomocí energie lidského těla. Lidské tělo produkuje tepelnou a mechanickou energii. Tato energie se může využít například při nabíjení mobilních telefonů, napájení senzorů prostřednictvím tepla nebo vibrací. Mechanická energie získaná činností svalů může dosahovat řádově až stovky wattů. Využití lidské mechanické práce a její přeměna na elektrickou energii pomocí generátoru je předmětem této diplomové práce.

Práce se zabývá postupem výroby nového elektrického stroje. Na základě rešerše literatury a patentů je vybrán vhodný stroj pro návrh použitelného generátoru. Hlavní parametry jsou počítány pomocí analytických rovnic. Analytický návrh je prozkoumán v programu Maxwell a je vybrán vhodný typ topologie stroje. Pro tuto topologii je vytvořen konstrukční výkres. Jelikož kromě konceptu ostrovního řešení je uvažováno i dodávání energie do sítě, je generátor z tohoto hlediska analyzován. Připojení na elektrickou síť obstarávají vhodně zvolené, na míru vyrobené průmyslové součásti.

V závěru práce jsou oba koncepty podrobeny cenové kalkulaci, zhodnoceny z hlediska odhadovaného množství vyrobené energie a rentability investice. Nejvýhodnější varianta je předložena jako návrh elektrického generátoru pro spinningové kolo.

2 PROBLEMATIKA

2.1 Spinning

Slovo spinning je možné definovat jako skupinové cvičení na stacionárním kole. Neboli indoor-cyclingový program. Jedná se o aerobní cvičení. Cvičení je určeno pro formování, udržování tělesné kondice. Je velice účinný při hubnutí (na jedné lekci se spálí 1600 -2600 KJ). [1]

Lekce spinningu je vedena lektorem a doba trvání lekce je 60 až 80 minut. Tempo je určeno motivační hudbou. Celá lekce je složena ze stylů, kdy trenér určuje profil tratě. Tyto techniky jsou různou kombinací situací, se kterými se setkáme venku při jízdě. Základní technika je jízda v sedle (rovina – nízká zátěž, z kopce) a ze sedla (sprint, do kopce – těžší zátěž) a střídavě v sedle a ze sedla.[11]

2.1.1 Spinningové kolo

Spinner (česky cyklotrenažér) **Obr. 1** je podobný rotopedu. Stavba spinningového kola je však odlišná v tom, že je více přizpůsobena pro sportovní použití. Spinner má setrvačnost. Hlavní části kola jsou:

- Sedlo (1),
- Řídítka (2),
- sloupek řídítek (3),
- rám (4),
- pedály (5),
- setrvačnick (6),
- regulátor zátěže (7).



Obr. 1 Spinningové kolo[12]

2.1.2 Regulace zátěže

U moderních spinningových kol jsou v současnosti použity tři způsoby regulace zátěže:

1. Brzda přítlačná (kotoučová, čelist'ová). Na destičkách brzdy je nalepený filc, který tlačí na setrvačnick. Tím se pohybová energie přeměňuje na odpadní teplo. Výhoda je v neomezené velikosti zátěže. Nevýhoda je hlučnost, opotřebením destiček a jejich výměna.[13]



2. Brzda magnetická, kde se odpor trenažeru vytváří pomocí permanentních magnetů, které brzdí na principu Lorenzovy síly nebo vířivými proudy. V závislosti na přibližování a oddalování magnetu k setrvačnicku se mění brzdový účinek. Výhoda je bezúdržbový provoz. Nevýhodou je vznikající teplo z elektrické energie.[13]
3. Elektromagnetická (indukční) brzda je cívka s elektromagnetem umístěna na setrvačnicku. Řídící jednotka nastavuje proud v cívce a tím sílu magnetického pole pro brzdění. Výhodou je plynulá regulace, tichý provoz, vysoké zatížení. Nevýhodou je, že odebírá proud ze sítě a vzniká odpadní teplo.[13]

Brzdění pomocí generátoru. Místo elektromagnetické brzdy je v setrvačnicku umístěn elektrický generátor s permanentními magnety nebo s vinutím. Generátor přeměňuje mechanickou energii na elektrickou, která je v měničích přetransformována na napětí umožňující ukládání energie do baterií, nebo energie dodávána do elektrické sítě.

2.2 Lidské tělo

Lidské tělo přeměňuje energii uloženou v potravě na mechanický pohyb pomocí svalů.

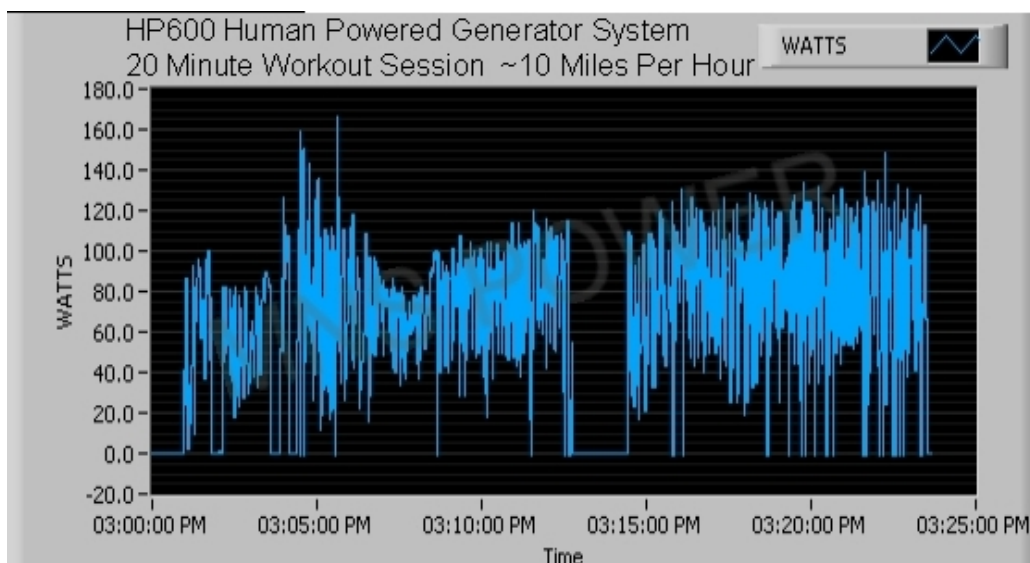
Sval (musculus), často také svalovina, je orgán, jehož funkcí je umožnění aktivního pohybu živočicha nebo jeho částí. Sval je tvořen především svalovou tkání. Všechny svaly tvoří svalovou soustavu.[2]

Ve svalu dochází k přeměně chemicky vázané energie v podobě živin přijímaných z potravy v mechanickou práci (kinetickou energii) a odpadní teplo. Účinnost této přeměny je do 30 %. [2]

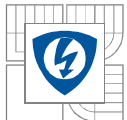
2.2.1 Množství vyrobené energie

Odhaduje se, že průměrný cyklista „ve formě“ může podávat výkon zhruba 3 wattů na každý kilogram své váhy po dobu jedné hodiny, špičkoví amatérští cyklisté jsou schopni až 5 wattů a profesionální atleti dokážou podávat hodinu výkon až 6 wattů. Elitní cyklisté specializovaní na krátké tratě krátkodobě v řádech sekund podat výkon až okolo 25 wattů na každý kilogram své váhy. [14]

Při tomto předpokladu vychází, že sportovec může vyvinout trvalý výkon v rozmezí 200 W až 400 W po dobu cvičebního programu. Tuto energii je možné převést na elektrickou energii.



Obr. 2 Průměrný výkon příležitostného cyklisty [15]



Na Obr. 2 je výkon cyklisty, který se snaží jet přibližné rychlosti. V obrázku jsou vynášeny okamžité hodnoty. Nejvyšší špička je kolem 170 W, průměrně se výkon pohyboval kolem 80 W v momentě, kdy je výkon nulový byla aktivována ochrana proti přetížení baterie. Toto měření bylo provedeno u elektrického stroje, který byl připevněn pomocí hřídele na cyklistické kolo.

Věk člověka [roky]	Ruční generátor [W]	Cyklo treňažér [W]	Eliptický treňažér [W]	Veslovací treňažér [W]
2-6	2-5	10-20	-	-
7-12	5-10	10-25	15-35	5-25
13-17	10-25	35-70	45-95	25-50
18-40	25-50	75-400	100-450	65-300

Tab. 1 Možný vydaný výkon pro jednotlivé cvičící stroje [16]

V **Tab. 1** je u jednotlivých strojů uveden elektrický výkon, který mohou tyto cvičící stroje vygenerovat v závislosti na věku cvičící osoby.

2.3 Patenty

Mezi patenty, se kterými bylo pracováno, nebyl nalezen žádný schválený patent, který se zabýval spinningovým kolem. Pro nalezení by se musela udělat hloubková rešerše, zda některé patenty nejsou zveřejněny, případně zda neproběhlo u těchto patentů schvalovací řízení.

2.3.1 České

V České republice provádí udělování patentů Úřad průmyslového vlastnictví na základě patentové přihlášky. Vedle vlastní žádosti o patent musí obsahovat popis vynálezu, popřípadě jeho výkresy a tzv. patentové nároky, které přesně vymezují předmět, pro nějž se ochrana požaduje.[17]

Úřad následně každou přihlášku podrobí průzkumu, zda je možné ji patentovat. Po uplynutí 18 měsíců od vzniku práva přednosti úřad přihlášku zveřejní.[17] Úřad udělí patent až po úplném průzkumu patentovatelnosti, kdy je nutno pro tento průzkum podat přihlášku. Majitel patentu musí platit poplatky za udržování patentu v platnosti.

2.3.2 Evropské

V Evropské unii (dále jen EU) se jedná o návrh **Jednotného evropského patentu** pod Evropským patentovým úřadem. Kdy bude pro celou EU platit jednotný patent. Získáním tohoto patentu bude platit ve všech zemích EU, oproti současnému modelu, že se musí v každé zemi žádat zvlášť.[18]

2.4 Články

Články se dají rozdělit na dva druhy na vědecky publikované články a amatérské internetové stránky. Oba typy se zabývají úpravou jízdního kola, kdy se na zadní kolo pomocí převodů připojí průmyslově vyráběný elektrický stroj. Přesto v člancích nebyla zmínka o využití spinningového kola, případně o návrhu vhodného elektrického stroje.

Článek [3] se zabývá návrhem generátoru a měniče. Jako generátor je použit Lundellův alternátor, který se používá v automobilovém průmyslu. Jeho výhoda je, že se jedná o alternátor,



který je masově vyráběn. Je zde pouze doplněn o měnič a převodovku z důvodu práce generátoru při 600 – 6000 otáčkách. Hlavní část je věnována regulátoru, který je napájen pouze z generátoru.

Článek [4] pojednává o využití spinningového kola s generátorem ve fitness centru. Zjišťuje množství energie vyrobené jedním kolem během cvičení (0,232 kWh). Porovnává spotřebu fitness centra (4800 kWh/rok) s možností pokrytí energie ze spinningových kol. Navrhují použít generátor o výkonu 750 W a napětí 12 V s regulátorem napětí, který dodává energii do baterií. Z baterií je přes konvektory DC/DC, DC/AC měněno napětí 24 V na 48 V a 230 V. Regulátor je uzpůsoben na napájení DC i AC, kde se přepíná podle množství dodávané energie. Experimentálně zjistili, že při průměrné rychlosti 20 km/h bylo produkováno okolo 250 W a za 6 hodin provozu bylo vyrobeno 1,5 kWh. Zabývají se i odhadem nákladů a návratností investic, kdy se investice splatí během 4 let.

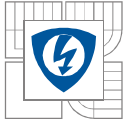
Internetové stránky [19] se zabývají kompletním řešením výroby a následného užití generátorů napojené na kolo. Generátor je připojen na zadní kolo pomocí řemene. Web je hlavně určen lidem kteří si chtějí postavit generátor pro kolo doma. Využívají při tom hlavně DC motory zapojené jako generátory, které je možné sehnat na trhu. Jako generátor byl použit DC motor o napětí 12 V – 180 V DC s permanentními magnety z důvodu jeho nízké ceny. Na stránce je plno informací ohledně optimálního zvolení motoru pro jednotlivé aplikace. Přepočítávání energie na spotřebovanou lidskou energii. Porovnávají jednotlivá napětí, kdy dle zatěžovací křivky se pro vyšší výkony vyplatí nižší napětí. Věnují se zde problému zahřívání, kde dochází k ohřátí na Curieho teplotu a odmagnetizování magnetů. Vysvětlují čtyři způsoby připojení generátoru:

1. Připojení generátoru přímo na spotřebič – napětí záleží na frekvenci šlapání.
2. Připojení generátoru přes měnič k přístroji – částečně chrání při vysokém napětí.
3. Generátor připojen přes kondenzátor na měnič a k přístroji – stabilizování napětí.
4. Místo DC motoru použít auto alternátor jako ve článku 2 – uvádějí, kdy se vyplatí do nízkého výkonu kolem 50 W, pak se zvyšuje odpor šlapání. Generátor musí dosáhnout minimálních otáček.

Internetové stránky [20] se zabývají použitím stejného principu jako stránky předchozí. Pouze je generátor připojen přes pružnou spojku na hřídel, která se dotýká zadního kola **Obr. 3**. Ukazuje návod na vytvoření stojánu pro kolo a následně porovnává, pro jaké aplikace se vyrobená energie hodí nejvíce, kde dochází k závěru, že se nejlépe hodí pro nabíjení baterií. O použitém DC motoru se příliš nezmiňují



Obr. 3 Kolo ve stojanu [20]



Využití kola jako elektrárny má i své odpůrce jako například web [21]. Stránka komentuje negativní věci, jako je efektivita přeměny energie, kdy dochází ke ztrátám při přenosu mechanické energie a následně elektrické a vypočítává efektivitu této přeměny na 32,5 – 58 %. Ukazuje na špatný výběr kol, která jsou zapojena. Využití závodních kol, která jsou konstruována pro dosažení co nejnižšího odporu vzduchu při jízdě, není příliš vhodná při šlapání na jednom místě. Jako další nevýhodu uvádí nepřítomnost setrvačnicku, kdy nám setrvačnick pomáhá držet konstantní zátěž a tím frekvenci šlapání. Síla, kterou působí cyklista, pak není vyrovnaná.

2.5 Požadavky na generátor

Optimálně vybraný stroj splňuje s minimálními náklady dynamické požadavky stroje, aniž by se při provozu nadměrně otepleval. Požadovaná dynamika stroje se vyjádří časovým průběhem mechanického momentu a rychlosti v čase. Uváží se další hlediska, hmotnost motoru na jednotku výkonu, spotřebovaný prostor a vliv váhy pohonu na funkci a parametry stroje. [22]

Z předchozích kapitol a článků byly vybrány hlavní podmínky, které musí generátor splňovat. Jedná se o jeho rozměry, aby byly kompaktní a dal se jednoduše připojit k existujícím spinningovým kolům. Výkon generátoru musí být konstruován na trvalou zátěž 200 – 400 W. Zároveň by měl mít možnost nastavovat zátěž (moment) podle pokynů cyklisty. Cena generátoru by měla být co nejlevnější a generátor by měl být bezúdržbový.

Dle těchto parametrů byl vybrán synchronní stroj s permanentními magnety. Jeho výhodou je vysoká účinnost a tím malé ztráty. Stroj je bezúdržbový a neobsahuje budící vinutí, které je potřeba regulovat. Další výhodou absence budícího vinutí je jednodušší návrh měniče, který neobsahuje regulaci a může se použít průmyslově vyráběný měnič.



3 ANALYTICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE

Kapitola je zaměřena na analytický výpočet stroje. Tento výpočet je jen základní návrh hlavních parametrů, které se budou využívat v programu RMxpert a Maxwell. Ve výpočtu se nezabýváme návrhem a velikostí permanentních magnetů, tento problém je řešen až v programu Maxwell, kde je možné efektivně měnit magnety a jejich parametry. Numerický výpočet by se musel dělat pro každý magnet zvlášť. Pro návrh a výpočet elektrického stroje byly použity podklady z literatury [5], [6], [7], [8].

3.1 Hlavní rozměry

Pro výpočet rozměrů vycházíme ze vzorce:

$$M = \sigma_{Ftan} \cdot \pi \frac{D^2}{2} l = 2 \cdot \sigma_{Ftan} \cdot V_r \quad [Nm; Pa, -, m^2, -, m] \quad 3-1$$

Výpočet momentu:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{p}} \quad [Nm; W, Hz] \quad 3-2$$

Výpočet objemu stroje:

$$V_r = \frac{M}{2 \cdot \sigma_{Ftan}} \quad [m^3; Nm, Pa] \quad 3-3$$

Z objemu stroje určíme průměr stroje:

$$V_r = \frac{\pi}{4} l \cdot D^2 \quad [m^3; m, m^2] \quad 3-4$$

χ je určeno dle tabulky Tab. 4:

$$\chi = \frac{\pi}{4 \cdot p} \sqrt{p} \quad [-; -, -] \quad 3-5$$

Vnitřní průměr statoru je:

$$D_s = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_r}{\pi \cdot \chi}} \quad [m; m^3, -] \quad 3-6$$

Aktivní délka stroje:

$$l = \chi \cdot D_s \quad [m; -, m] \quad 3-7$$



Výpočet vzduchové mezery:

$$\delta = \frac{0,18 + 0,006 \cdot p^{0,04}}{1000} \quad [m; m] \quad 3-8$$

Magnety ale potřebují podpůrné uchycení a vzduchová mezera se zvětší o 0,2 – 1 mm

Vnitřní průměr stroje:

$$D_{si} = D_s + 2 \cdot \delta \quad [m; m, m] \quad 3-9$$

3.1.1 Rozměry statoru

Počet drážek statoru:

$$Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q \quad [-; -, -, -] \quad 3-10$$

Drážková rozteč:

$$t_d = \frac{\pi \cdot D_{si}}{Q} \quad [m; m, -] \quad 3-11$$

Výpočet pólové rozteče:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_{si}}{2 \cdot p} \quad [m; m, -] \quad 3-12$$

Amplituda toku první harmonické ve Fourierovi transformaci je:

$$B_{1\text{špič}} = \frac{4 \cdot \sin\left(\alpha_{pm} \frac{\pi}{2}\right)}{\pi} B_\delta \quad [T; -, T] \quad 3-13$$

Potom maximální indukce je:

$$B_\delta = \frac{\pi \cdot B_{1\text{špič}}}{4 \cdot \sin\left(\alpha_{pm} \frac{\pi}{2}\right)} \quad [T; T, -] \quad 3-14$$

Kde $B_{1\text{špič}}$ je hodnota z *Tab. 2* α_{pm} je korekce ztrát, dle tvaru magnetů

Koeficient k_w je určen pro každý stroj zvlášť a vyjadřuje poměr toků ve vinutí, je složen z koeficientu rozteče, rozdělení, zkreslení a pohybuje se v rozmezí cca 0,47 až 1:

$$k_w = k_{rozteč} \cdot k_{rozdělení} \cdot k_{zkreslení} \quad [-; -, -, -] \quad 3-15$$

Počet závitů ve vinutí:

$$N_v = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{pm}}{\omega \cdot k_w \cdot \Theta_m} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{pm}}{\omega \cdot k_w \cdot \alpha_{pm} \cdot B_\delta \cdot \tau_p \cdot l} \quad [-; V, Hz^{-1}, -, T, m, m] \quad 3-16$$



Kde U_{pm} je indukované napětí permanentními magnety:

$$U_{pm} = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad [V; V] \quad 3-17$$

Počet vodičů ve drážce:

$$V_d = 2 \cdot a \cdot m \frac{N_v}{Q} \quad [-; -, -, -, -] \quad 3-18$$

Počet závitů cívky v jedné fázi vinutí:

$$N = \frac{Q \cdot V_d}{2 \cdot a \cdot m} \quad [-; -, -, -, -] \quad 3-19$$

Počet vodičů ovlivní maximální hodnotu toku. Přepočítaná indukce:

$$B_\delta = \left(\frac{V_d}{V_{d-z}} \right) \cdot B_\delta \quad [T; -, -, T] \quad 3-20$$

Šířka statorové drážky: Z Tab. 2 se indukce v zubu statoru u synchronního stroje je 1,5 - 2T:

Minimální šířka zubu je:

$$b_z = \frac{l \cdot \frac{\pi \cdot D_{si}}{Q}}{k_{fe} \cdot l} \cdot \frac{B_z}{B_\delta} \quad [m; m, m, -, -m, T, T] \quad 3-21$$

Kde - $k_{fe} = 0,97$ činitel plnění železa

Stanovení rozměrů

Jmenovitý proud vinutí statoru se určí dle vztahu:

$$I_{N1} = \frac{P}{m \cdot \eta \cdot U_f} \quad [A; W, -, -, A] \quad 3-22$$

Statorové fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad [V; V] \quad 3-23$$

Plocha vodiče:

$$S_v = \frac{I_{N1}}{a \cdot J_a} \quad [m^2; A, -, Am^2] \quad 3-24$$

Průměr vodiče:

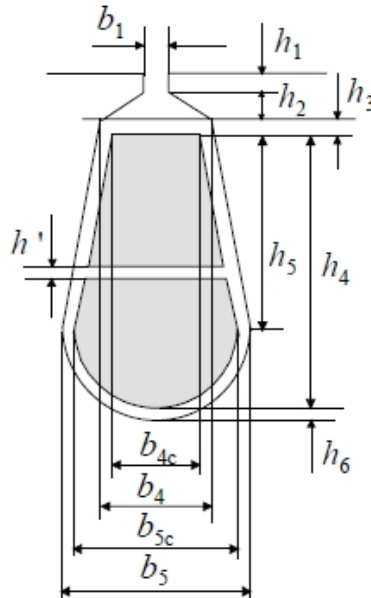
$$D_v = \sqrt{\frac{S_v}{4 \cdot \pi}} \quad [m; m^2] \quad 3-25$$



Potřebný prostor v drážce:

$$S_{dracu} = \frac{S_v \cdot V_{d-z}}{k_{dr}} \quad [m^2; m^2, -, -] \quad 3-26$$

Výpočet drážky



Obr. 4 Drážka [5]

Zvolené rozměry

$$- b_1, h_1, h_2, h_3, h_6, h' \quad [m]$$

Velikost b_4 je stanovena:

$$b_4 = \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_1 + h_2)]}{Q} - b_z \quad [m; m, m, m, -, m] \quad 3-27$$

Rozměr vnitřní části drážky:

$$b_{4c} = b_4 + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_3}{Q} \quad [m; m, m] \quad 3-28$$

Nyní se musí zvolit h_5 tak aby odpovídal prostoru v drážce (rozměr se počítá pomocí numerické metody), orientačně je dá určit dle pomoci výpočtu plochy:

$$h_5 = \frac{S_{dr}}{b_{4c}} \quad [m; m^2, m] \quad 3-29$$

Pro délku drážky je nutné znát rozměr h_4

$$h_4 = h_5 + \frac{b_{5c}}{2} \quad [m; m, m] \quad 3-30$$

Rozměr b_{5c} je počítán:

$$b_{5c} = b_{4c} + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_5}{Q} \quad [m; m, m] \quad 3-31$$



Celková plocha drážky:

$$S_{dr} = \left(\frac{b_{4c} + b_{5c}}{2} \right) \cdot h_5 + \frac{\pi}{8} b_{5c}^2 \quad [m^2; m, m, m, m^2] \quad 3-32$$

Prostor pro vinutí ve drážce by měl být větší:

$$S_{dr} > S_{drcu} \quad [m^2; m^2] \quad 3-33$$

Činitel vinutí:

$$k_{dr} = \frac{S_v \cdot V_{d-z}}{S_{dr}} \quad [-; m^2, -, m^2] \quad 3-34$$

Činitel plnění by neměl překročit hodnotu 0,45

3.1.2 Výpočet statorového jha

Magnetický tok:

$$\Phi = a_{PM} \cdot B_\delta \cdot t_p \cdot l \quad [Wb; -, T, m, m] \quad 3-35$$

Výška statorového jha

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_z \cdot l \cdot k_{fe}} \quad [m; Wb, T, m^{-1}, -] \quad 3-36$$

Dle Tab. 2 se velikost magnetické indukce bude pohybovat 1-1,5T. Výška permanentních magnetů se pohybuje v rozmezí 4 – 8 mm zde záleží na jednotlivých koeficientech rovnice:

$$h_{PM} = \frac{U_{m\delta e} + U_{mz} + \frac{U_{mh1}}{2} + \frac{\pi \cdot c_r \cdot H_{jm} (D_r - h_{jr})}{4 \cdot p}}{H_C - \frac{H_C}{B_r} \cdot B_{PM} \cdot \frac{\pi \cdot c_r \cdot H_{jm}}{2 \cdot p}} \quad [m; Am^{-1}, Am^{-1}, Am^{-1}, Am^{-1}, m, m, -, Am^{-1}, Am^{-1}, T, T, Am^{-1}, Am^{-1}, -] \quad 3-37$$

kde:

- $U_{m\delta e}$ Magnetické napětí ve vzduchové mezeře
- U_{mz} Magnetické napětí v zubu
- U_{mh1} Magnetické napětí statorového jha
- c_r Koeficient velikosti magnetické indukce
- H_{jm} Koercitivní síla statorového jha
- D_r Vnější průměr rotoru
- h_{jr} Výška rotorového jha
- H_C Koercitivní síla permanentního magnetu
- B_r Remanentní indukce
- B_{PM} Magnetická indukce permanentních magnetů
- p Počet pólů



Tab. 2 Povolená indukce magnetického obvodu pro různé standardní elektrické stroje. [5]

	Indukce B/T			
	Asynchronní stroje	Synchronní stroje s vyniklými póly	Synchronní stroje s nevyniklými póly	Stejnoseměrné stroje
Vzduchová mezera	0,7 – 0,90 ($\hat{B}_{\delta 1}$)	0,85 – 1,05 ($\hat{B}_{\delta 1}$)	0,8 – 1,05 ($\hat{B}_{\delta 1}$)	0,6 – 1,1 (\hat{B}_{max})
Jho statoru	1,4 – 1,7 (2)	1,0 – 1,5	1,1 – 1,5	1,1 – 1,5
Účinnost (zdánlivá maximální hodnota)	1,4 – 2,1 (stator) 1,5 – 2,2 (rotor)	1,6 – 2,0	1,5 – 2,0	1,6 – 2,0 (kompenzační vinutí) 1,8 – 2,2 (armaturní vinutí)
Jho rotoru	1,1 – 1,6 (1,9)	1,0 – 1,5	1,3 – 1,6	1,0 – 1,5
Jádro pólu	-	1,3 – 1,8	1,1 – 1,7	1,2 – 1,7
Komutační póly	-	-	-	1,3

Tab. 3 Povolené RMS hodnoty pro proudové hustoty J a lineární proudové hustoty A pro různé elektrické stroje pro měděné vinutí [5]

	Asynchronní stroje	Synchronní stroje s vyniklými póly nebo s permanentními magnety	Synchronní stroje s nevyniklými póly			Stejnoseměrné stroje
			Nepřímé chlazení		Přímé chlazení vodou	
			Vzduch	Vodík		
A/kA/m	30 – 65	35 – 65	30 – 80	90 – 110	150 – 200	25 – 65
	statorové vinutí	armaturní vinutí	armaturní vinutí	armaturní vinutí		armaturní vinutí
J/A/mm ²	3 – 9	4 – 6,5	3 – 5	4 – 6	7 – 10	4 – 9
	měděné rotorové vinutí	oblastní vinutí				pólové vinutí
J/A/mm ²	3 – 8	2 – 3,5				2 – 5,5
	hliníkové rotorové vinutí	vícevrstvé		oblastní vinutí		kompenzační vinutí
J/A/mm ²	3 – 6,5	2 – 4 Jednovrstvé	2 – 4	3 – 5	6 – 12	3 – 4

S přímým vodním chlazením, v oblastním vinutí může být dosaženo: 13 – 18 A/mm² a 250 – 300 kA/m



Tab. 4 Typické $\chi=l/D$ poměry pro různé elektrické stroje.[5]

Asynchronní stroje	Synchronní stroje, $p>1$	Synchronní stroje, $p=1$	Stejnoseměrné stroje
$\chi \approx \frac{\pi}{2 \cdot p} \sqrt[3]{p}$	$\chi \approx \frac{\pi}{4 \cdot p} \sqrt{p}$	$\chi = 1 - 3$	$\chi \approx \frac{0,8-1,6}{p}$

Tab. 5 Tangenciální napětí σ_{Ftan} vypočítané z hodnot z tabulky 2 a 3.[5]

	Zcela uzavřené asynchronní stroje	Synchronní stroje s vyniklými póly nebo s permanentními magnety	Synchronní stroje s nevyniklými póly			Stejnoseměrné stroje
			Nepřímé chlazení		Přímé chlazení vodou	
			Vzduch	Vodík		
A/kA/m, RMS	30 - 65	35 - 65	30 - 80	90 - 110	150 - 200	25 - 65
Vzduchová mezera indukce $\bar{B}_{\delta 1}/T$	0,7 - 0,9	0,85 - 1,05	0,8 - 1,05	0,8 - 1,05	0,8 - 1,05	0,6 - 1,1
Tangenciální napětí σ_{Ftan}/Pa						
minimální	12 000*	21 000*	17 000*	51 000*	85 000*	12 000*
průměrné	21 500*	33 500*	36 000*	65 500*	1 14 500*	29 000*
maximální	33 000*	48 000*	59 500*	81 500*	1 48 500*	47 500*
	* $\cos \varphi = 0,8$	* $\cos \varphi = 1$	* $\cos \varphi = 1$	* $\cos \varphi = 1$	* $\cos \varphi = 1$	* $\cos \varphi = 2/3$

Tab. 5 udává tři hodnoty napětí, vypočítané s nejnižší lineární proudovou hustotou a indukcí, s průměrnými hodnotami a s nejvyššími hodnotami. Předpokládané rozložení indukce a lineární proudové hustoty je sinusoidální. Pro stejnosměrné stroje je předpokládán koeficient šířky 2/3. Předpokládaný účinník synchronního stroje je 1 a asynchronního stroje 0,8.[5]



3.2 Elektromagnetická indukce

Zákon elektromagnetické indukce je fyzikální zákon, který vyslovil v r. 1831 Michael Faraday. Tento zákon pojednává o vzniku elektrického napětí v uzavřeném elektrickém obvodu, který je způsoben změnou magnetického indukčního toku, což je označováno jako elektromagnetická indukce. [24]

Obecné vyjádření indukovaného elektromagnetického napětí

$$U_i = \oint \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{l} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad [V; Vm^{-1}, A] \quad 3-38$$

Kde: \mathbf{E}_i - indukované pole

\mathbf{l} – vodič ve směru indukovaného pole

\mathbf{v} – vektor směru pole

\mathbf{B} – pole magnetická indukce

Elektrický stroj pracuje na základě Ampérová zákona, pokud tento zákon upravíme, potom dostaneme rovnici, která vyjadřuje sílu působící na vodič

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{l} \cdot I \quad [N; T, A, m] \quad 3-39$$

Elektrický stroj využívá elektromagnetickou indukci k přeměně elektrické energie na mechanickou energii nebo mění elektrickou energii na mechanickou energii. Indukované napětí v cívice je:

$$U_i = N \frac{d\phi}{dt} \quad [V; -, Wb, s] \quad 3-40$$

Uvažujeme, že magnetický tok se mění sinusově, a dosadíme do předešlé rovnice

$$U_i = N \frac{d(\phi_{max} \cdot \sin \omega t)}{dt} \quad [V; -, Wb, Hz, s] \quad 3-41$$

Po derivování složené funkce předešlé rovnice můžeme napsat

$$U_i = N \cdot \omega \cdot \phi_{max} \cdot \cos \omega t \quad [V; -, rad s^{-1}, -] \quad 3-42$$

Úpravou rovnice na efektivní hodnoty, a pro maximum funkce kdy $\cos \omega t$ je roven 1 a $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ dostaneme rovnici

$$U_i = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot \phi_m \quad [V; Hz, -, Wb] \quad 3-43$$

Pro elektrický stroj je efektivní hodnota indukovaného napětí v jedné fázi vinutí je dána vztahem:

$$U_i = 4,44 \cdot k_v \cdot f \cdot N \cdot \phi_m \quad [V; -, Hz, -, Wb] \quad 3-44$$



Kde k_v - činitel vinutí
 f - frekvence
 N - Počet závitů jedné fáze
 ϕ_m - celkový magnetický tok ve vzduchové mezeře

3.3 Moment synchronního stroje

Vztah pro vnitřní moment stroje je:

$$M = \frac{3}{2}p[\psi_q i_d - \psi_d i_q] \quad [Nm; -, Wb, A, Wb, A] \quad 3-45$$

Po úpravě a dosazením za ψ_d a ψ_q dostaneme výslednou rovnici:

$$M = \frac{3}{2}p[\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d] \quad [Nm; -, Wb, A, H, H, A] \quad 3-46$$

Kde p - je počet pólových dvojic
 ψ_{PM} - spřažený magnetický tok od PM
 L_d a L_q - indukčnost v d a q ose
 i_d a i_q - proud v d a q ose

3.4 Návrh rozměrů rotoru pro stroj II

Při návrhu elektrického stroje uvažujeme s nahrazením setrvačnicku u spinningového kola generátorem, tím se docílí zachování rozměru spinningového kola a místo setrvačnicku bude umístěn elektrický stroj (generátor). U návrhu je dán předpoklad, kdy rotor elektrického stroje bude plnit funkci setrvačnicku o stejné kinetické energii, jako měl původní setrvačnick.

Pro moment setrvačnosti platí:

$$J = m \cdot r^2 \quad [kg \cdot m^2; kg, m] \quad 3-47$$

kde m hmotnost setrvačnicku
 r poloměr setrvačnicku

Kinetická energie setrvačnicku:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \quad [J, kg \cdot m^2, Hz] \quad 3-48$$

Moment setrvačnosti rotoru stroje určíme z rovnice:

$$J = \frac{2 \cdot E_k}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2} \quad [kg \cdot m^2; J, Hz] \quad 3-49$$



Hmotnost setrvačnicku je odvozena z rovnice:

$$m = \frac{J}{r^2} \quad [kg; kg \cdot m^2, m] \quad 3-50$$

3.5 Magnety

Kapitola vychází z materiálu [24], [26], v textu jsou zmíněny pouze základní části.

Základní fyzikální veličiny popisující magnetické pole:

- Magnetický tok
- Intenzita magnetického pole
- Magnetická indukce
- Permeabilita prostředí
- Permeabilita vakua

Hlavní parametry magnetu:

- Magnetický tok
- Curie teplota
- Hysterezní smyčka
- Magnetická indukce

Typy permanentních magnetů:

Ferit – Feritový magnet

Je typický představitel feromagnetických materiálů. Čistý kov ve formě prášku se slisuje pomocí pojava do tuhého tvaru a ve vákuu nebo ochranná atmosféře.

Výhody: běžně dostupný, nejlevnější

Nevýhody: malá koercivní síla, a nízká magnetická indukce

NdFeB – Neodymový magnet

Patří mezi ferity. Snadno korodují, proto se provádí povrchová úprava nejčastěji niklováním.

Výhody: velká magnetická indukce a koercivní síla

Nevýhody: nízká Curieova teplota začínající od 80°C, vysoká cena

AlNiCo – „Alnico“ magnet

Vyráběno je pomocí slévárenských technologií.

Výhody: mechanicky odolné, vysoká remanence a indukce, vysoká Curieova teplota

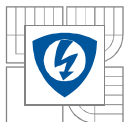
Nevýhody: obtížné obrábění

SmCo – Samarium Kobalt

Vyráběny práškovou technologií

Výhody: dlouhá životnost, velká odolnost proti odmagnetování

Nevýhody: vysoká cena



4 NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE

V této kapitole budou měněny jednotlivé parametry stroje a budou počítány v programu Maxwell, kde budou navrženy a analyzovány jednotlivé parametry stroje, Změna parametrů se bude týkat hlavně rozměrů a parametrů stroje.

Pro vhodný stroj požadovaných vlastností, byly vybrány dvě základní topologie stroje. Těmto el. strojům budou zachovány vnější rozměry a budou se měnit parametry jako je počet pólu, počet drážek a rozměry drážek, materiál magnetů atd., aby hodnoty indukce magnetického obvodu odpovídaly Tab. 2.

4.1 Výpočet stroje I

Stroj I je počítán pomocí analytického návrhu. Takto získaný model návrhu, je jedno z možných řešení elektrického generátoru pro spinningové kolo.

Vzorce 3-1 až 3-36 v předchozí kapitole 2.1 byly přepsány do programu Matlab, kde byl vytvořen m-file soubor na výpočet jednotlivých hodnot, dle zadaných parametrů. M-file byl zvolen pro rychlé výpočty s možností změny jednotlivých vstupních parametrů.

4.1.1 Zadané parametry

Výkon	$P = 300 \text{ W}$
Napětí	$U = 36 \text{ V}$
Počet pólů	$2p = 10$
Frekvence	$f = 20 \text{ Hz}$
Účinnost	$\eta = 0,85$
Počet fází	$m = 3$
Tangenciální napětí zvoleno z Tab. 5	$\sigma_{Ftan} = 21000 \text{ Pa}$
Počet drážek na pól	$q = 0,5$

4.1.2 Vypočtené parametry stroje

Hlavní rozměry stroje vypočítané pomocí analytického skriptu v programu Matlab, jsou uvedeny v Tab. 6 a parametry drážky dle Tab. 7.

Tab. 6 Hlavní rozměry stroje

Jednotka	M	D_{s0}	D_s	δ	D	D_r	Q	In	hj1
Veličina	[Nm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[A]	[mm]
Vzorec									
Výsledek	11,94	186,8	103	1	101	50	15	5,66	4,6

Tab. 7 Rozměry drážky

b_1	b_4	b_{5c}	h_1	h_2	h_5
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
3	12,7	27,2	1	1	35,3



4.2 Stroj II

Tento el. stroj je dalším návrhem se změněnou koncepcí oproti stroji počítanému analyticky. Jedná se o stroj, který velikostně odpovídá rozměrům setrvačnicku, který je odstraněn ze spinningového kola. Stroj bude mít vnější rozměry původního setrvačnicku. Tím, že se velikost stroje je větší, může rotor stroje nahradit svou kinetickou energií původní setrvačnick. Pro výpočet nahrazení setrvačnicku rotorem jsou důležité parametry setrvačnicku, které jsou uvedeny v Tab. 11. Rozměr elektrického stroje je zvolen dle parametrů setrvačnicku $D_{so} = 310\text{mm}$. Tento rozměr odpovídá průměru setrvačnicku, je nechána rezerva 10 mm pro vnější obal stroje. Výška statoru je zvolena dle výšky statoru z analytického návrhu. Pro elektrický stroj je nutné změnit napětí na $U_f = 230\text{V}$ z důvodu použití za frekvenční měnič sériově vyráběný.

4.2.1 Rotor

Setrvačnick pro spinningové kolo byl vybrán dle setrvačnicku na kole „Elite Fitz Bike Pro V2“ [31]

Tab. 8 Parametry setrvačnicku

D_r	[mm]	320
l	[mm]	60
m	[kg]	15
n	[min ⁻¹]	100

Pro určení velikosti rotoru odpovídající energii setrvačnicku se použijí vzorce z kapitoly „Návrh rozměrů rotoru“. Moment setrvačnosti vypočítáme dle 3-47:

$$J = 0,384\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Kinetická energie setrvačnicku je počítána dle 3-48:

$$E_k = 21,05\text{J}$$

Moment setrvačnicku vypočítáme dle rovnic 3-49 a 3-50, rotor je menší, proto se použijí vyšší otáčky pro zachování kinetické energie. Z momentu setrvačnosti vypočítáme hmotnost rotoru. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Hmotnost rotoru v závislosti na otáčkách a průměru

n	[min ⁻¹]	100	200	250	300
J	[kg m]	0,5632	0,1408	0,0901	0,0626
D_{ro}	[mm]	0,32	0,234	0,234	0,234
m	[kg]	22,00	10,29	6,58	4,57



Tab. 10 Hmotnost rotoru

D_{ro}	[mm]	229,3	229,3	229,3	229,3
D_r	[mm]	165	175	175	175
l	[mm]	50	50	50	50
Výška magnetů	[mm]	9	7	7	6
Pólové krytí	[-]	0,9	0,9	0,8	0,8
m	[kg]	7,23	6,46	6,22	6,17

Hmotnost rotoru je počítána v programu RMxprt, kde jsou zadány jednotlivé rozměry rotoru, program spočítal hmotnost která je uvedena v Tab. 10.

Dle Tab. 9 a Tab. 10 jsou pro Stroj II zvoleny parametry uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Parametry Stroje II

D_{so}	[mm]	310
D_s	[mm]	230
D_{ro}	[mm]	229,3
D_r	[mm]	175
l	[mm]	50
n	[min^{-1}]	250

4.3 RMxprt

V programu RMxprt byl vybrán model stroje „Adjust-Speed Synchronous Machine“, kde byly zadávány hodnoty. Jako základní byly použity hodnoty analytického výpočtu. Hodnoty byly zadány podle požadavku programu. V programu byl nastaven výpočet vodičů, velikost vodičů a počet vodičů ve svazku na automatický návrh. Návrh modelu v RMxprt sloužil pro přibližný výpočet, kde se měnily jednotlivé parametry k dosažení co nejlepších vlastností. Následně byly tyto stroje převedeny do Maxwell 2D, kde byly analyzovány.

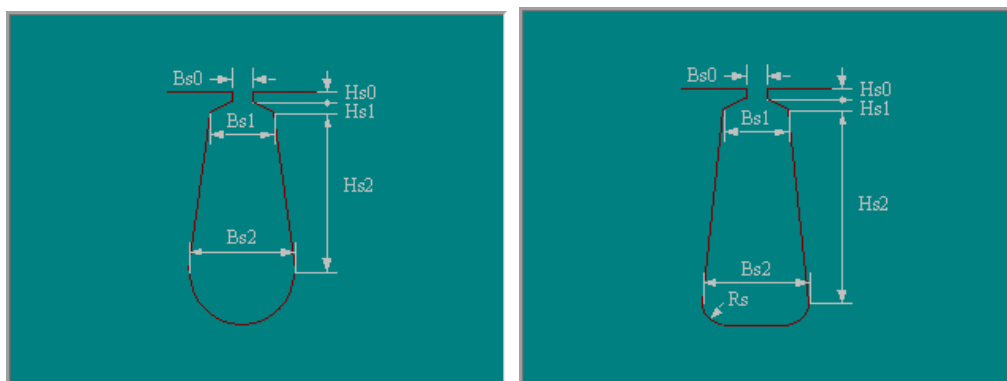
Vkládání hodnot bylo po jednotlivých částech stroje:

- Řešení vstupních podmínek: zde se nastavil výstupní výkon P , napětí V , otáčky n .
- Stroj: zde nastaven počet pólů $2p$, jmenovité otáčky n , zapojení fází do hvězdy „Y“.
- Stator Obr. 5: vnější D_{so} a vnitřní rozměr D_s , aktivní délka l , počet drážek Q , typ drážky
 - Drážka Obr. 6: vloženy rozměry drážky $b_1, b_4, b_{5c}, h_1, b_2, b_5$
 - Vinutí: vrstev vinutí, paralelní počet vodičů a , krok cívky
- Rotor: vnější D_{ro} a vnitřní rozměr D_r , aktivní délka l , typ pólů
 - Magnety: zde se nastavila výška magnetů a pólové krytí.



Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Outer Diameter	310	mm	310mm	Outer diameter of the stator core	<input type="checkbox"/>
Inner Diameter	230	mm	230mm	Inner diameter of the stator core	<input type="checkbox"/>
Length	50	mm	50mm	Length of the stator core	<input type="checkbox"/>
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the stator core	<input type="checkbox"/>
Steel Type	steel_1010			Steel type of the stator core	<input type="checkbox"/>
Number of Slots	15			Number of slots of the stator core	<input type="checkbox"/>
Slot Type	3			Slot type of the stator core	<input type="checkbox"/>
Skew Width	0		0	Skew width measured in slot number	<input type="checkbox"/>

Obr. 5 Parametry statoru



Obr. 6 Zvolený typ drážky a) pro analytický návrh, b) pro stroj II

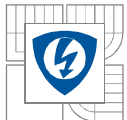
4.4 Návrh vinutí

Zlomkové vinutí znamená, že počet drážek na pól a fázi je dán zlomkem, tj. je to necelé číslo. Toto vinutí se používá je velice vhodné pro synchronní generátory, kde je indukované střídavé napětí velmi podobné sinusovému průběhu, i když je tvar magnetického pole nepravidelný a odlišný od sinusovky. Vhodný je pro stroje s velkým počtem pólů kdy by při $q = 2$ vyšel velký počet drážek. Navrhování drážek pokusnou metodou je velmi zdlouhavé proto se používá Tingleyho schéma.

4.4.1 Tingleyho schéma

Tingley udal přehlednou tabulku pro zlomková vinutí, z níž plyne poloha cívkových stran v magnetickém poli.[10] Vlastní schéma se skládá z políček uzavřených čarou v Tab. 12. Počet čtverečku a rozmístění čísel ve schématu určuje pólová rozteč vyjádřena pomocí zlomku.

Činitel určuje počet čtverečků v řádku (na jeden pól). Musí být dělitelný třemi, aby bylo možné rovnoměrně rozdělit mezi fáze. Jmenovatel řídí přiřazování čísel. Jako první zapíšeme číslo 1 do prvního čtverečku. Jmenovatel je 12, takže první zapsání blokuje prvních dvanáct čtverečků v řádku, do nich už nelze zapisovat. Číslo 2 zapíšeme do následujícího volného čtverečku, který je v pořadí třináctý. Při každém zapsání se blokuje tolik čtverečků jako je jmenovatel Q_p . Číslo 3 tedy bude v desátém. U přechodu na další řádek se, ale otáčí fáze. Tímto způsobem se vyplní celá tabulka, jakoby póly ležely na jednom řádku za sebou v pořadí +, -, +, -. Čísla ve schématu jsou drážky stroje, v Tab. 12 je pouze třetina drážek. Z důvodu násobení pólové rozteče na číslo dělitelné třemi beze zbytku. Další dvě schémata jsou symetrická, jen začínají o 0,75 drážky posunuty doprava dle jmenovatele. Číslům drážek stroje jsou v pořadí zprava doleva přiřazovány fáze podle Tab. 13 po přiřazení drážek prvnímu pólu (I), následuje



pól další. Tímto způsobem dostáváme rozložení fází v jedné vrstvě. Druhá vrstva má rozložení stejné posunuté o krok doleva. Krok se zpravidla volí mírně zkrácený.[10]

Počet drážek:

$$Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q \quad [-; -, -, -] \quad 4-1$$

Počet drážek na pól a fázi:

$$Q_p = m \cdot q \quad [-; -, -] \quad 4-2$$

Tab. 13 sestavené podle výše uvedených odstavců je možné sestavit zapojení vinutí pro jednotlivé fáze Obr. 7. Tingleyho schéma se může použít pro sestavení Görgesova diagramu.

4.4.2 Návrh vinutí

Pro výpočet parametrického modelu je potřeba znát rozmístění a spojení jednotlivých cívek 3f. obvodu. Pro určení rozložení vinutí bylo použito Tingleyho schéma.[10] Postup vytvoření schématu je popsán v této kapitole.

Schéma je vypočítáno pro variantu stroje s $p=6$.

Počet drážek počítán dle rovnice 4-1:

$$Q = 2 \cdot 6 \cdot 3 \cdot \frac{5}{12} = \underline{15}$$

Počet drážek na pól dle rovnice 4-2:

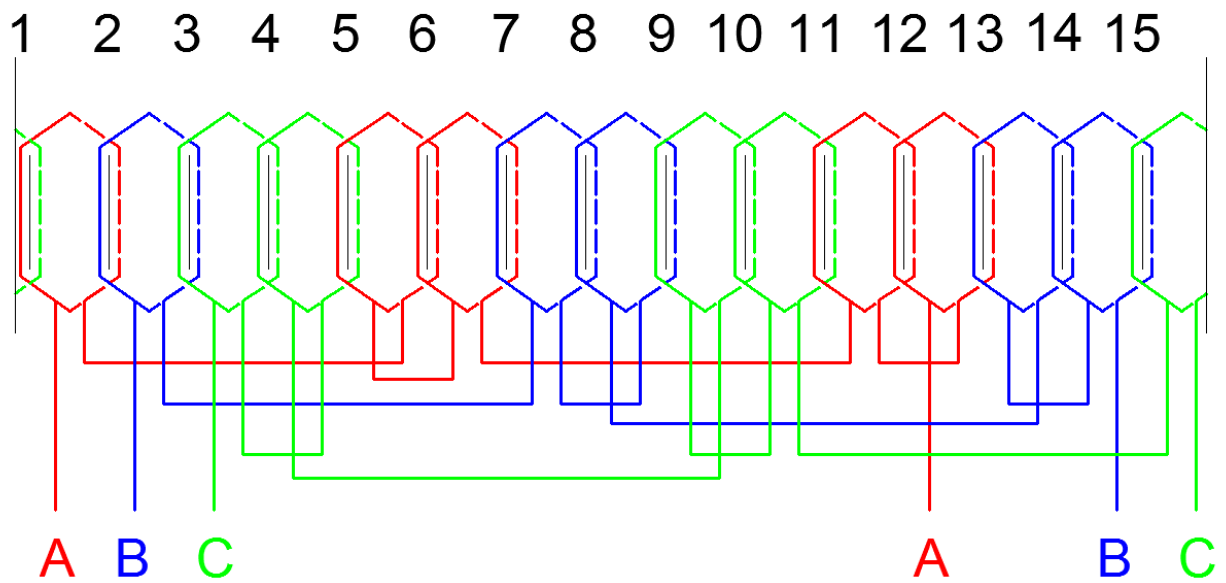
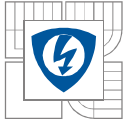
$$Q_p = 3 \cdot \frac{5}{12} = \frac{15}{12} = \frac{5}{4} = \underline{1,25}$$

Tab. 12 Tingleyovo schéma

	Fáze A					Fáze C'					Fáze B				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
+	1												2		
-										3					
+							4								
-				5											

Tab. 13 Rozdělení cívkových stran vinutí

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	B	C	C'	A'	A	B	B'	C'	C	A	A'	B'	B	C
C'	A'	B'	C'	C	A	A'	B'	B	C	C'	A'	A	B	B'



Obr. 7 Spojení fáze A, B, C ve dvojrstevém vinutí



5 PARAMETRICKÝ MODEL STROJE

Model stroje pro maxwell 2D je vytvořen pomocí skriptu. Skript je vybrán z důvodu větší konfigurace jednotlivých rozměrů oproti automatickému návrhu programu maxwell. Tento skript slouží k vytvoření dvourozměrného modelu stroje. Skript je vytvořen tak, aby bylo možné měnit jednotlivé parametry 2D modelu a tím bylo dosaženo větší variability proti automatickému návrhu a vyšší rychlosti oproti ručnímu návrhu geometrie stroje.

Skript obsahuje definici proměnných, které definují rozměry stroje. Výpočet jednotlivých bodu pro sestavení jednotlivých částí stroje. Spojení částí dohromady, a přiřazení materiálu.

Skript se ukládá jako soubor VBscript, pro práci s tímto skriptem byl použit program VbsEdit, který je volně stažitelný a plně použitelný.

Výhody ve skriptu jsou ve vyšší rychlosti a variabilitě, přínosem je i zjištění jakým způsobem pracuje Maxwell při návrhu geometrie stroje.

Skript obsahuje:

- Definice proměnných
- Vytvoření statoru (složená geometrie)
 - Rotoru
 - Magnetu (složen z křivky)
 - Rozmístění magnetu po obvodu rotoru
- Stator (složena geometrie)
 - Drážka (složena z křivky, pro každý ohyb definován poloměr)
 - Rozmístění drážek po obvodu statoru
 - Vytvoření vinutí podle rozměrů drážky a jeho rozmístění do drážek
- Definice materiálu jednotlivých

Po spuštění skriptu v programu Maxwell se geometricky vykreslil model Obr. 8

5.1 Definice proměnných

Postup při psaní skriptu bylo použito nahrávání skriptu, kdy byla v programu nadefinována jedna proměna a následně v VbsEdit přidány další proměnné. Zde je ukázka definice proměnných. V programu Maxwell jsou tyto proměnné pomocí skriptu přístupné Obr. 9. Proměnné jsou v počátku skriptu definované a později se dají v programu měnit, čím dochází ke změně geometrie.

```
oProject.ChangeProperty Array("NAME:AllTabs",  
Array("NAME:ProjectVariableTab", Array("NAME:PropServers", _  
"ProjectVariables"), Array("NAME:NewProps", _  
Array("NAME:$Prumer_vnitr_rotor", "PropType:=", "VariableProp", "UserDef:=",  
true, "Value:=", "89mm"))))
```

5.2 Rotor

Při vytváření rotoru se postupovalo následovně. Byla vytvořena plocha o průměru vnitřního rotoru, a plocha o průměru vnějšího rotory zmenšený o výšku magnetu. Vnitřní plocha byla následně odečtena od vnější, vznikl dutý válec. Geometrie magnetu byla vytvořena z úseček,



kteřé byly spojeny do plochy. Vzniklý magnet se pomocí kruhového pole se duplikoval a umístil kolem rotoru. Magnety se spojily s dutým válcem, tím vznikl rotor. Ukázka jednotlivých bodů.

```
' ---- Rotor vnitřní průměr ----
oEditor.CreateCircle Array("NAME:CircleParameters", "IsCovered:=", true,
"XCenter:=", _
    "0mm", "YCenter:=", "0mm", "ZCenter:=", "0mm", "Radius:=",
"$Prumer_vnitr_rotor", "WhichAxis:=", _
    "Z", "NumSegments:=", "0")

' ---- Odečtení vznikne rotor bez magnetu ----
oEditor.Subtract Array("NAME:Selections", "Blank Parts:=", "Circle2", "Tool
Parts:=", _
    "Circle1")

-- Magnet ----
oEditor.CreatePolyline Array("NAME:PolylineParameters", "IsPolylineCovered:=",
true, "IsPolylineClosed:=", _
    true, Array("NAME:PolylinePoints", _
    Array("NAME:PLPoint", "X:=", "($Prumer_vnej_rotor-
$Vyska_magnetu)*cos($Polove_kryti*(pi/$Pocet_polu))", "Y:=",
"($Prumer_vnej_rotor-$Vyska_magnetu)*sin($Polove_kryti*(pi/$Pocet_polu))",
"Z:=", "0mm"), _
```

5.3 Drážka

Drážka byla vytvořena obdobně jako magnet. Ke každému vrcholu bylo přidáno zaoblení. Drážka byla duplikována a kruhově umístěna.

```
' ---- Drazka ----
oEditor.CreatePolyline Array("NAME:PolylineParameters", "IsPolylineCovered:=",
true, "IsPolylineClosed:=", _
    true, Array("NAME:PolylinePoints", _
    Array("NAME:PLPoint", "X:=",
"($Prumer_vnej_rotor+$Velikost_vzduchove_mezery)*cos(atan(($A0)/($Prumer_vnej_
rotor+$Velikost_vzduchove_mezery))", "Y:=",
"($Prumer_vnej_rotor+$Velikost_vzduchove_mezery)*sin(atan(($A0)/($Prumer_vnej_
rotor+$Velikost_vzduchove_mezery))", "Z:=", "0mm"), _

' ---- Zakulaceni drazky ----
oEditor.Fillet Array("NAME:Selections", "Selections:=", "Polyline2",
"NewPartsModelFlag:=", _
    "Model"), Array("NAME:Parameters", Array("NAME:FilletParameters", "Edges:=",
Array(), "Vertices:=", Array( _
    166, 172), "Radius:=", "$R0", "Setback:=", "0mm"))

' ---- Rotování a kopie drazek ----
oEditor.DuplicateAroundAxis Array("NAME:Selections", "Selections:=",
"Polyline2", "NewPartsModelFlag:=", _
    "Model"), Array("NAME:DuplicateAroundAxisParameters", "CreateNewObjects:=",
true, "WhichAxis:=", _
    "Z", "AngleStr:=", "2*pi/$Pocet_drazek", "NumClones:=", "$Pocet_drazek"),
Array("NAME:Options", "DuplicateAssignments:=", _
    false)
```

5.4 Stator a Vinutí

Stator byl vytvořen stejným způsobem jako rotor. Od statoru byla odečtena drážka, čímž vznikl celý rotor.

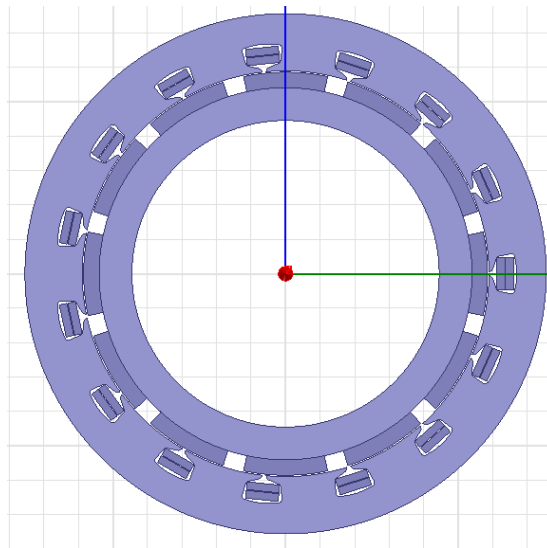
Vinutí se dopočítává z rozměrů drážky. Tak aby se měnily rozměry podle velikosti drážky. V drážce je dvojrstvé vinutí. Toto vinutí bylo duplikováno a umístěno ve všech drážkách.

5.5 Materiál

Každému vytvořenému objektu byl přiřazen materiál:

- Rotor a stator – Steel 1010
- vinutí – měď
- magnet – SmCo28

```
oEditor.AssignMaterial Array("NAME:Selections", "Selections:=", "Polyline2"),
Array("NAME:Attributes", "MaterialValue:=", _
    "" & Chr(34) & "copper" & Chr(34) & "", "SolveInside:=", true)
```



Obr. 8 Model vygenerovaný skriptem

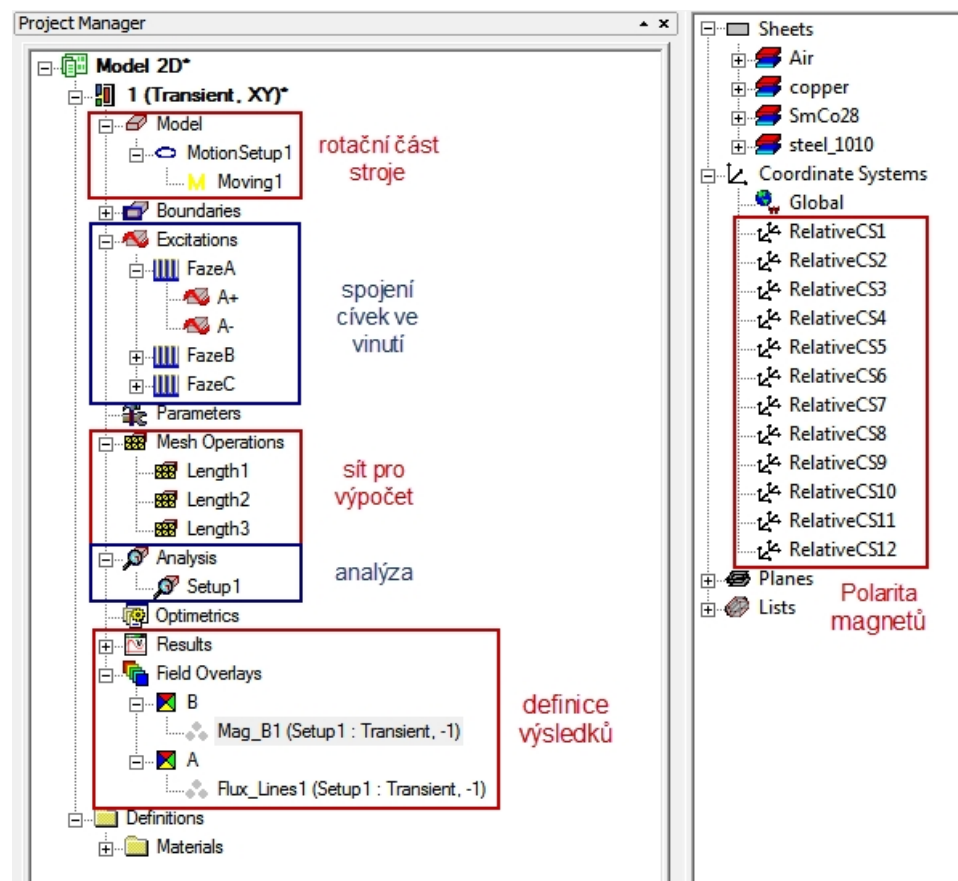
Name	Value	Unit
\$Prumer_vnitř_rotor	89	mm
\$Prumer_vněj_rotor	117	mm
\$Prumer_vněj_stator	151	mm
\$Výška_magnetu	9	mm
\$Offset	0	mm
\$Polove_kryti	0.8	
\$Velikost_vzduchove_mezery	0.8	mm
\$A0	1	mm
\$A1	2	mm
\$A2	10	mm
\$A3	12	mm
\$B0	2	mm
\$B1	3	mm
\$B2	10	mm
\$B3	2	mm
\$R0	2	mm
\$R1	2	mm
\$R2	2	mm
\$R3	40	mm

Obr. 9 Tabulka definovaných proměnných

5.6 Model

Ve vytvořeném modelu se musí definovat parametry Obr. 9, aby mohla být spuštěna simulace. Tyto parametry, se dají definovat pomocí skriptu, ale při spuštění skriptu se tyto parametry neprovedou správně a je potřeba je dodělat ručně jedná se o:

- Polaritu magnetů
- Určení rotační části stroje
- Spojení cívek ve vinutí fází
- Nastavení sítě pro výpočet MKP
- Nastavení analýzy
- Definování výsledků

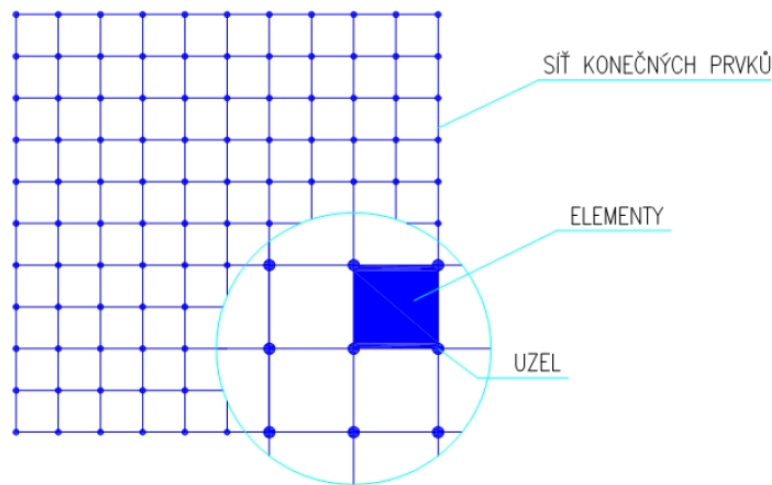


Obr. 10 Definované proměnné a parametry v Maxwell 2D

6 MAXWELL 2D

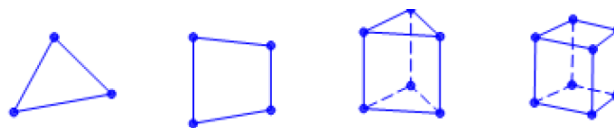
6.1 Teorie

Metoda konečných prvků (dále jen MKP) se používá k výpočtům a analýze fyzikálních modelů například (elektromagnetismu, vedení tepla, atd.). Princip je založen na eliminaci diferenciálních rovnic nebo na ekvivalentní obyčejnou diferenciální rovnici, jež je následně řešena matematickým postupem např. metoda konečných diferencí. Princip je v rozdělení oblasti na vhodné elementární části, jak je naznačeno na Obr. 11. Celá oblast se chápe jako konečný systém prvků. Tyto prvky na sebe navzájem působí.



Obr. 11 Síť konečných prvků

Pro neznámé uzlové potenciály se sestaví soustava rovnic. Koeficienty matice soustavy a pravých stran se počítají jako integrály přes rovinné nebo prostorové elementy. Ve vrcholech elementů jsou uzly, kde jsou určeny zjišťované parametry. Na Obr. 12 jsou uvedeny některé příklady rovinných a prostorových elementů [6]

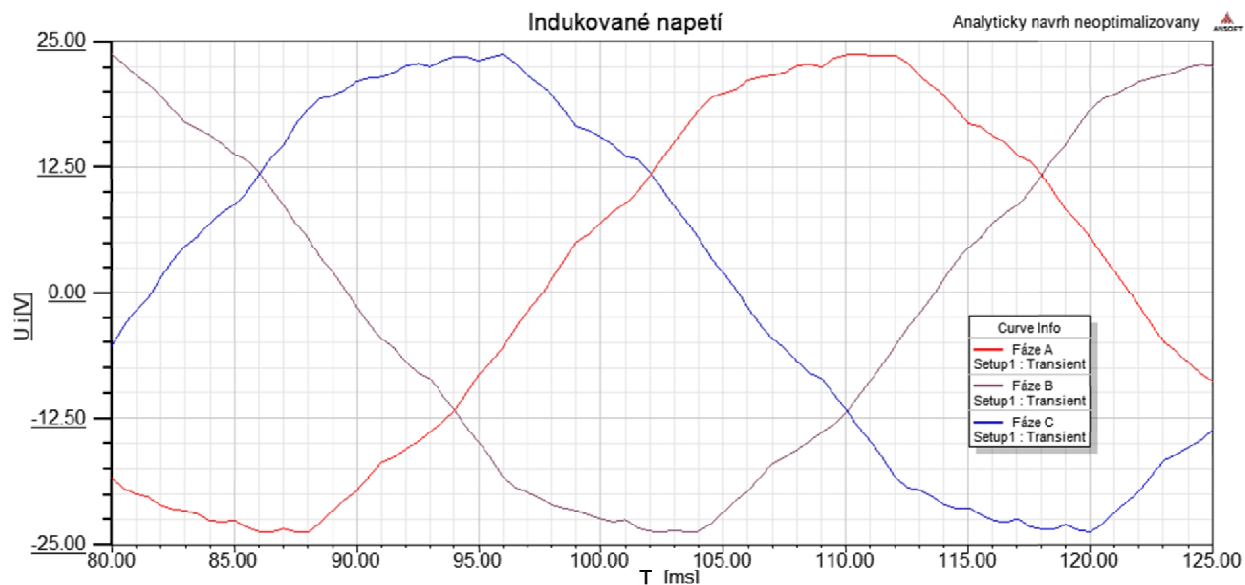


Obr. 12 Rovinné a prostorové elementy

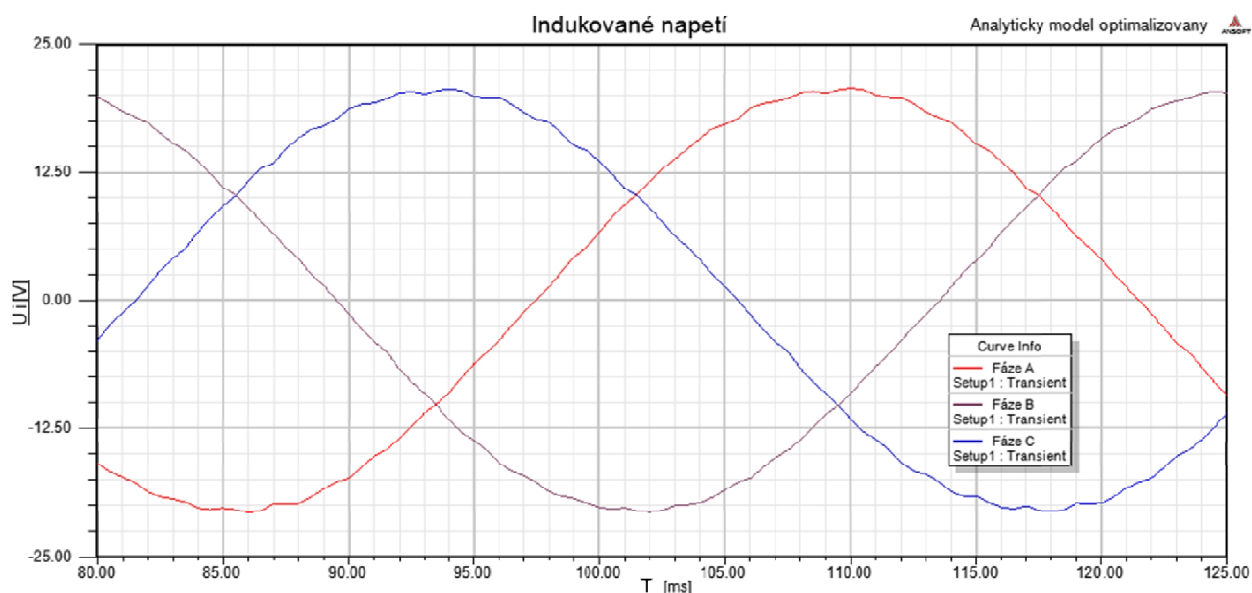
6.2 Stroj vypočítán analyticky

Model stroje, který byl počítán analyticky dle kap. 2 je převeden pomocí skriptu do programu Maxwell 2D. Zde je provedena analýza. Zde jsou uvedeny dva stroje, jeden s původními parametry a druhý z upravených parametrů pro vyšší účinnost.

6.2.1 Indukované napětí stroje



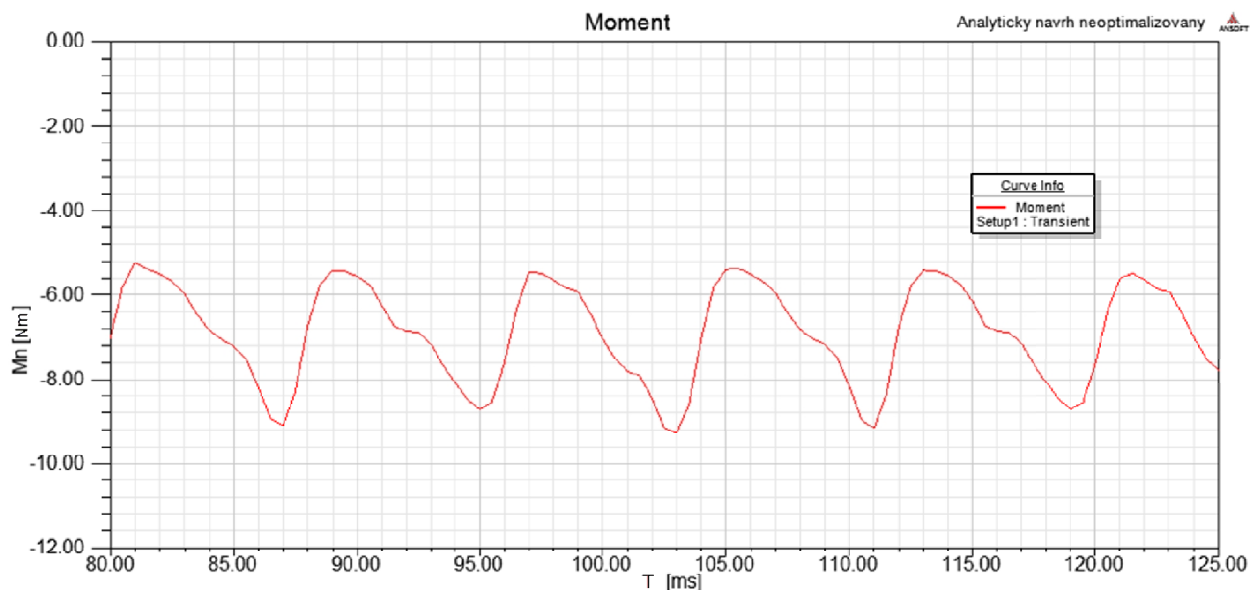
Graf 1 Průběh indukovaného napětí ve vinutí neoptimalizovaného stroje



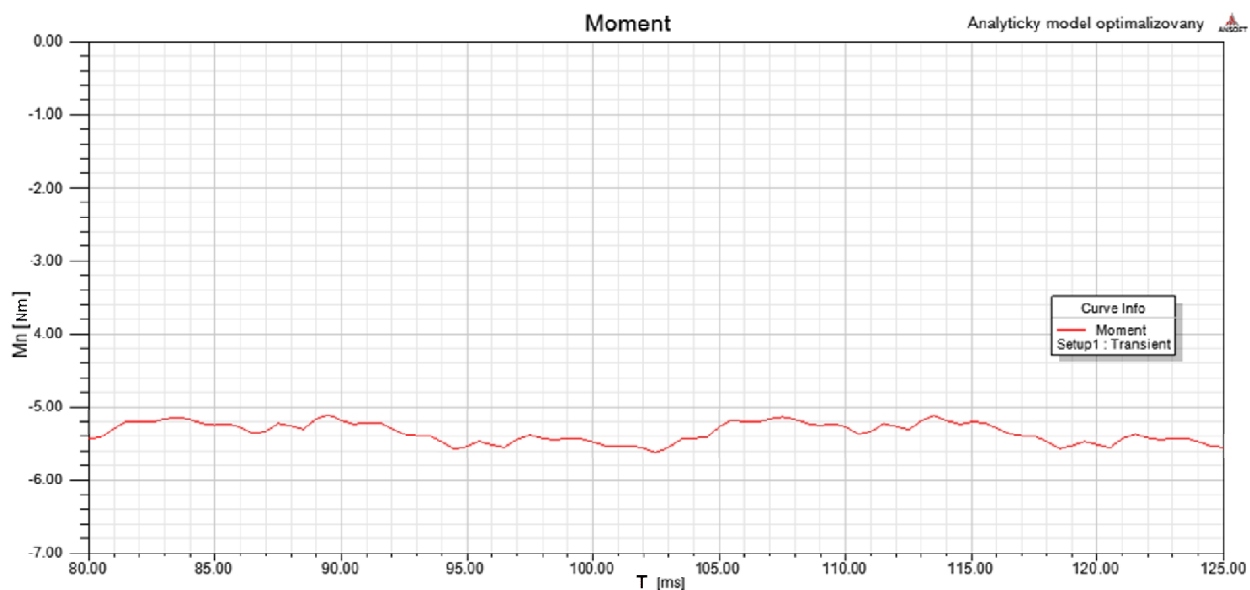
Graf 2 Průběh indukovaného napětí ve vinutí optimalizovaného stroje

Porovnáním Graf 1 a Graf 2 je patrný rozdíl v optimalizaci. U neoptimalizovaného stroje je sinusový průběh indukovaného napětí deformován reluktančním momentem. Pro optimalizovaný stroj byla provedena změna topologie magnetů pro snížení vlivu reluktančního momentu, kde došlo k vyhlazení a přiblížení indukovaného napětí sinusovému průběhu.

6.2.2 Moment stroje



Graf 3 Moment neoptimalizovaného stroje



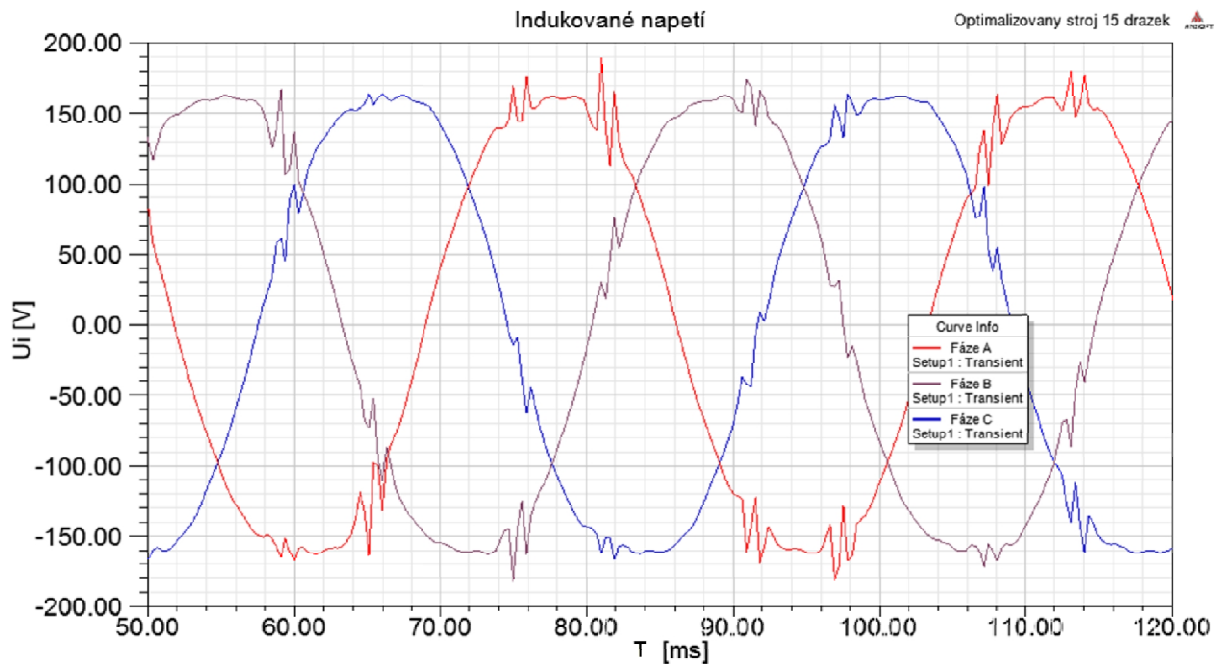
Graf 4 Moment optimalizovaného stroje

U neoptimalizovaného stroje (Graf 3) oproti (Graf 4) je patrný velký vliv reluktančního momentu, který způsobuje kývání stroje a nevyvážený chod. Je způsoben nesterjným magnetickým odporem v podélné a příčné ose stroje.

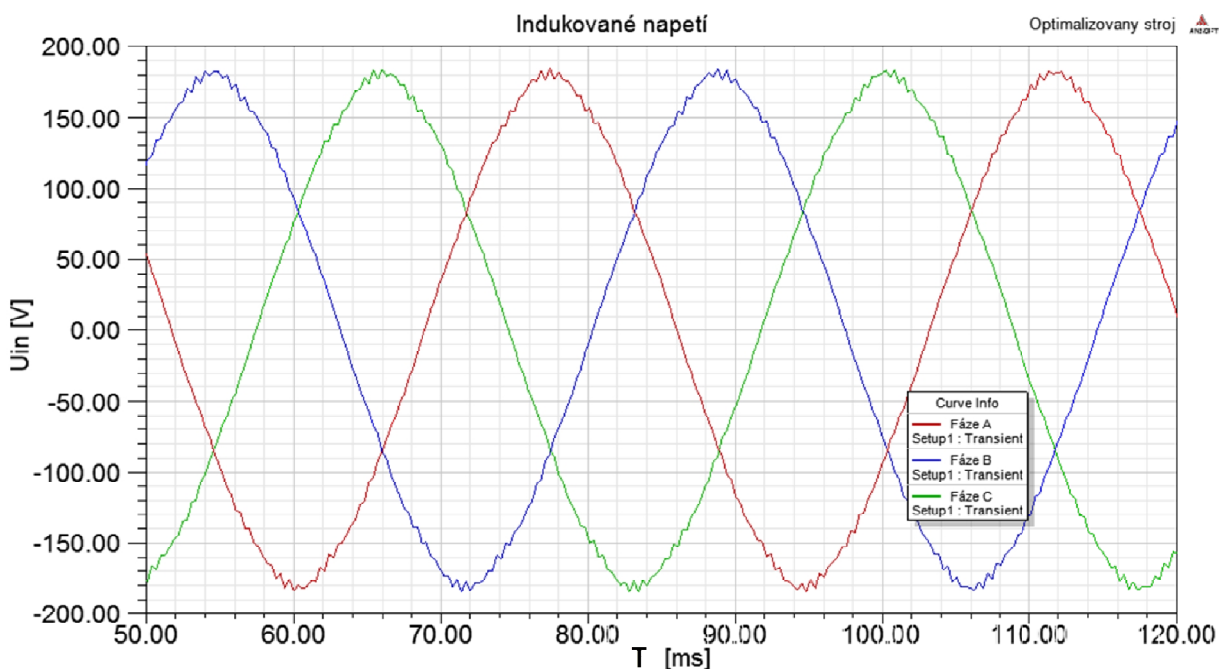
6.3 Stroj II

Stroj má rozměry setrvačnicku, u tohoto stroje byla změněna konfigurace. Pro měnič na který bude tento generátor připojen je navržen pro napětí 380-600V, proto došlo k navýšení pólů pro vyšší frekvenci a zároveň k navýšení počtu drážek z 15 na 45 z důvodu hladšího průběhu indukovaného napětí. Kterého se při optimalizaci pro 15 drážek nedosáhlo.

6.3.1 Indukované napětí stroje



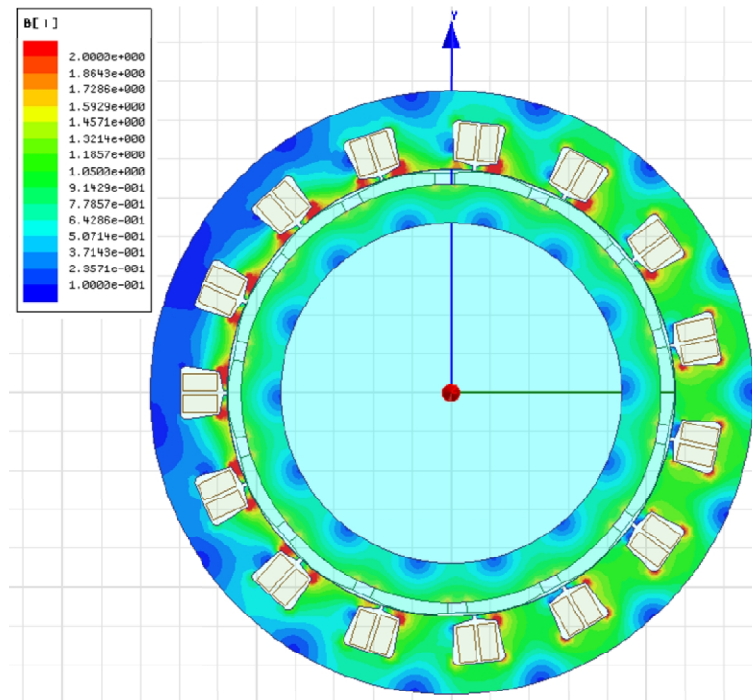
Graf 5 Optimalizovaný stroj s 15 drážkami



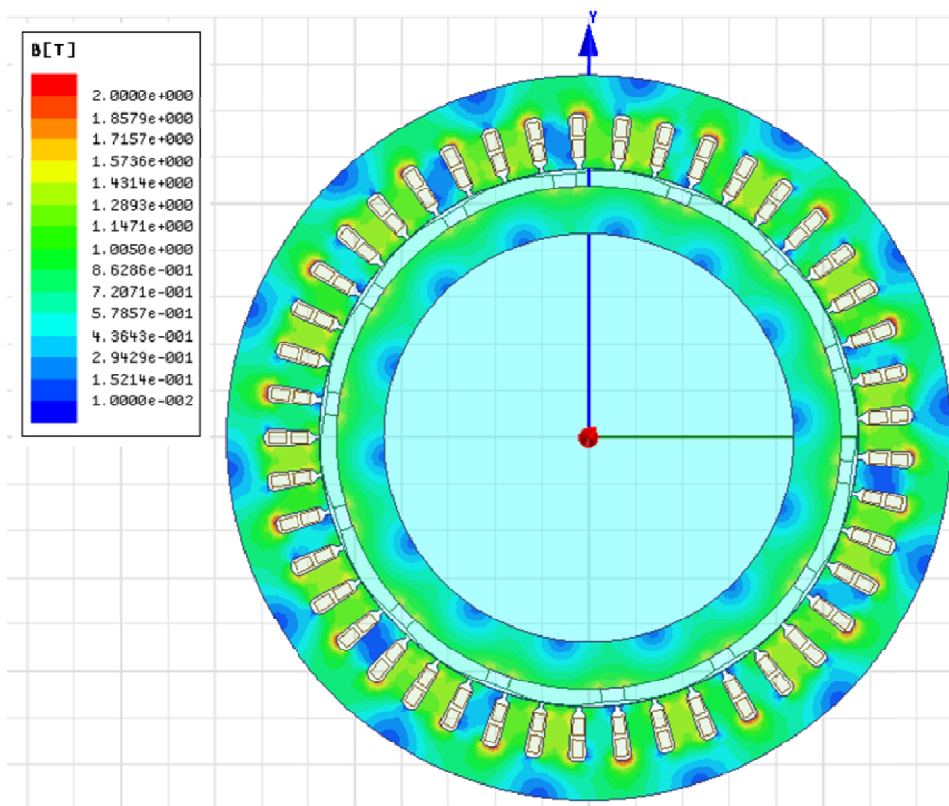
Graf 6 Optimalizovaný stroj s 45 drážkami

Graf 6 znázorňuje indukované napětí na vinutí. Napětí všech fází za normálního provozního stavu je po ustálení 230V, oproti (Graf 5), kde má indukované napětí hladší průběh.

6.3.2 Magnetická indukce ve stroji

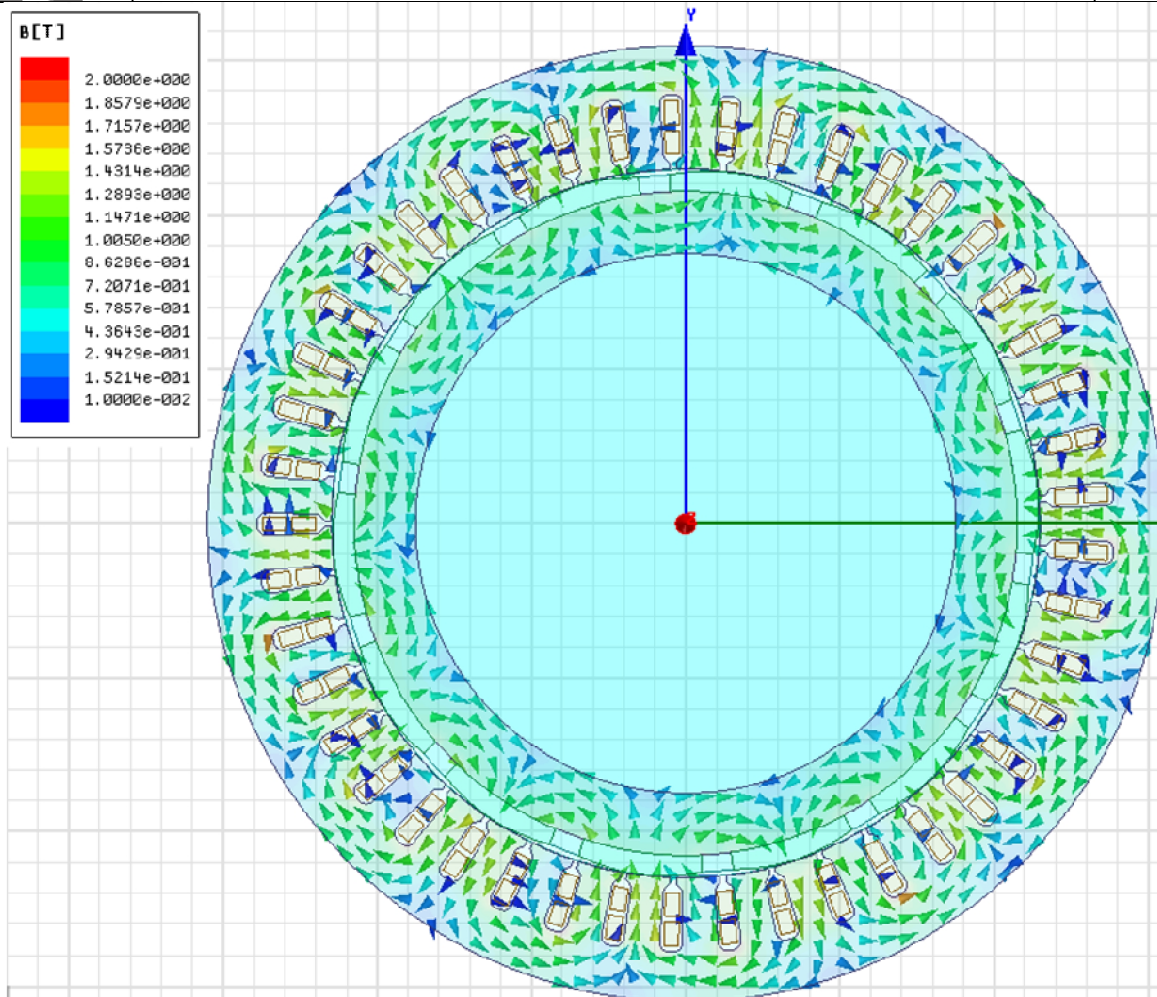


Obr. 13 Magnetická indukce optimalizovaného stroje s 15 drážkami $t=0,1s$



Obr. 14 Magnetická indukce optimalizovaného stroje s 45 drážkami $t=0,12s$

Z Obr. 13 je parné, že kolem zubu dochází ke zvýšení magnetické intenzity magnetickým tokem. Na Obr. 14 je vidět rozložení magnetické intenzity v tomto případě nedochází k přesycení pouze je indukce zvýšena kolem 1,9 T.



Obr. 15 Vektor magnetické indukce u optimalizovaného stroje $t=0,12s$

Obr. 15 Vektor magnetické indukce u optimalizovaného stroje $t=0,12s$ znázorňuje vektorové rozložení magnetické indukce u optimalizovaného stroje s 45 drážkami.

6.3.3 Výstupní výkon stroje

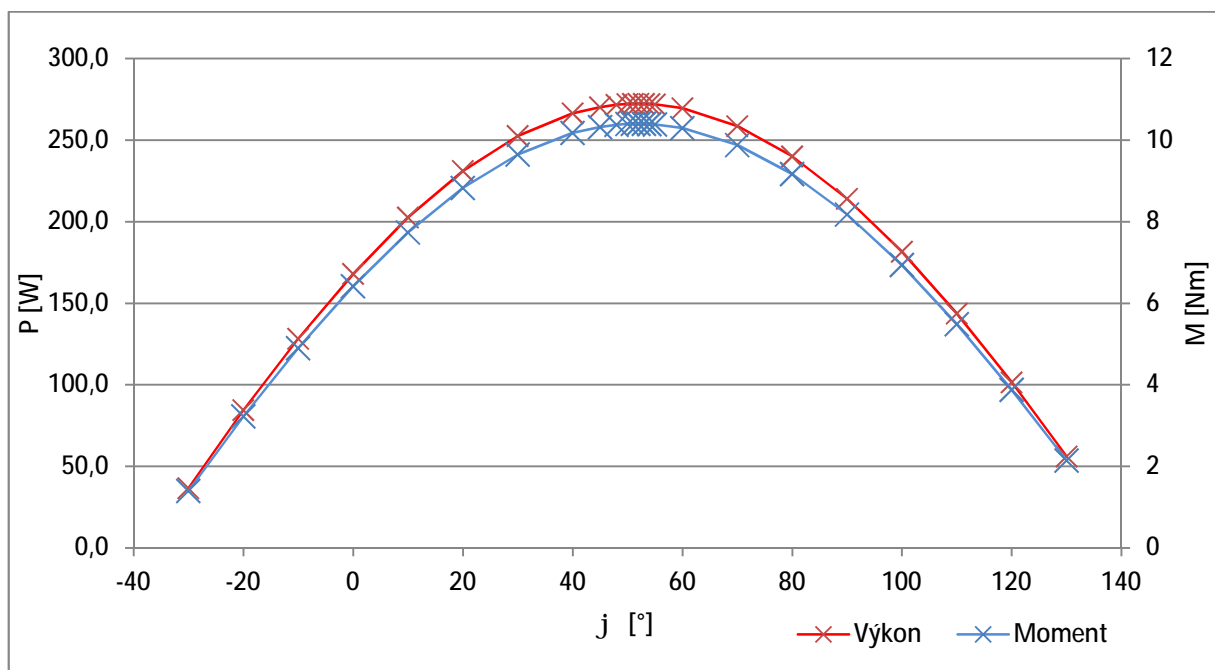
Výkon stroje je počítán dle maximálního momentu. Maximální moment byl určen pro jmenovitý proud při jmenovitém výkonu, proud byl nastaven dle efektní hodnoty vypočítanou maxwellem. Úhel reprezentuje natočení vektoru polohy rotoru k vektoru proudu. Byl nastaven proud ve vinutí a měněn úhel posunutí rotoru. Napětí bylo odečteno z programu Maxwell.

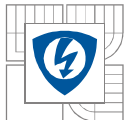


Tab. 14 Závislost úhlu natočení na maximálním výkonu stroje

φ [°]	M [Nm]	P [W]
-30	1,4	36,7
-20	3,23	84,6
-10	4,9	128,3
0	6,42	168,1
10	7,74	202,6
20	8,83	231,2
30	9,65	252,6
40	10,18	266,5
45	10,32	270,2
48	10,379	271,7
50	10,398	272,2
51	10,402	272,3
52	10,403	272,3
53	10,402	272,3
54	10,396	272,2
55	10,388	272,0
60	10,299	269,6
70	9,88	258,7
80	9,17	240,1
90	8,18	214,2
100	6,94	181,7
110	5,49	143,7
120	3,88	101,6
130	2,145	56,2

Graf 7 Závislost úhlu natočení na maximálním výkonu stroje





Výkon stroje:

$$P = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 10,403 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{250}{60} = 272,35W$$

Příkon stroje:

$$P_{př} = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 1,23 \cdot 230 \cdot \cos 53^\circ = 294,88W$$

Účinnost:

$$\eta = \frac{P}{P_{př}} = \frac{272,35}{294,88} = 0,924$$

$$\eta_{\%} = \eta \cdot 100 = 0,924 \cdot 100 = 92,4\%$$

6.4 Parametry stroje

V Tab. 15 jsou uvedeny hlavní parametry stroje, který byl analyzován a navrhnut jako vhodný generátor do spinningového kola. Tyto parametry budou využity při modelování, návrhu připojení do sítě a cenové kalkulaci.

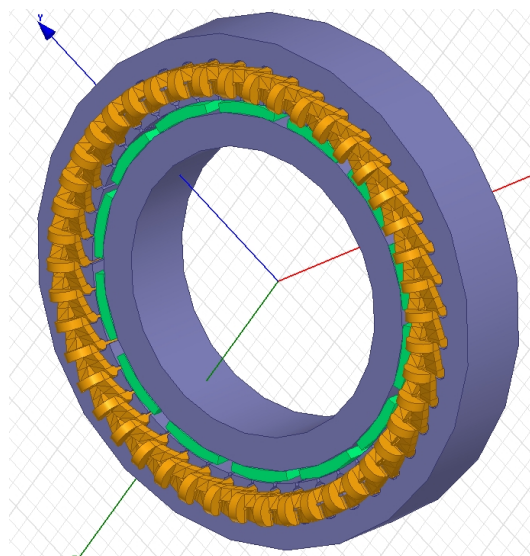
Tab. 15 Parametry stroje

Výstupní výkon	P	300 W
Napětí fázové	U_f	230 V
Počet pólů	2p	14
otáčky	n	250 min ⁻¹
Počet drážek	q	45
Průměr statoru vnější	D_{so}	310 mm
Průměr statoru vnitřní	D_s	230 mm
Průměr rotoru vnější	D_{ro}	215 mm
Průměr rotoru vnitřní	D_r	175 mm
Šířka stroje	l	50 mm
Typ vinutí		Zlomkové
Typ magnetu		SmCo28
Pólové krytí		0,8
výška magnetů		7 mm
Hmotnost statoru		9,8 kg
hmotnost vinutí		3,8 kg
Hmotnost rotoru		4,6 kg
hmotnost magnetu		1,5 kg

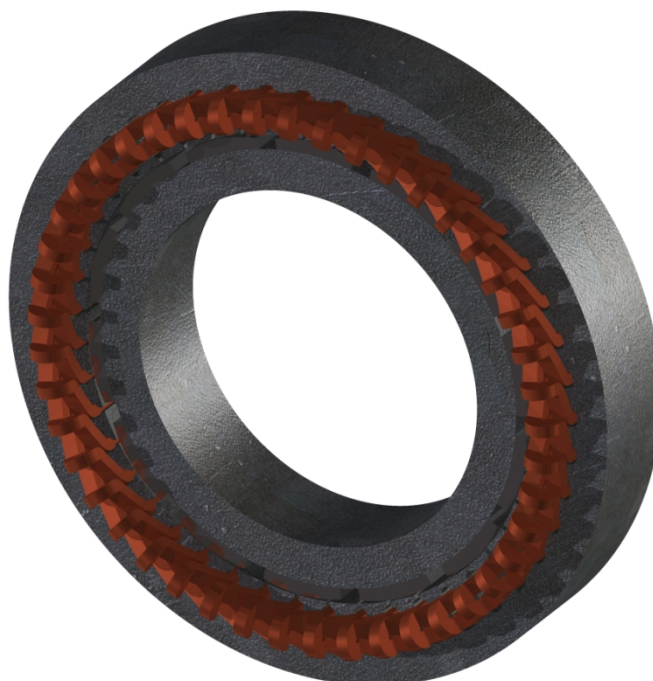
7 3D MODEL – INVENTOR

Inventor obsahuje funkce pro adaptivní a parametrické 3D navrhování, tvorbu 2D výkresové dokumentace, prezentace a fotorealistické vizualizace a animace, i správu dokumentů a konstrukčních dat.

Model byl vytvořen pomocí importování modelu z programu Maxwell a převeden do programu Inventor. Postup byl zvolen pro vhodnost programu Inventor, kdy je použit jako konstrukční program a slouží k prezentaci 3D modulu a hlavně k vytvoření výkresové dokumentace, která je přiložena v příloze diplomové práce.

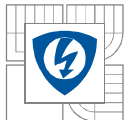


Obr. 16 Motor vymodelovaný v programu Maxwell



Obr. 17 Model upravený v Programu Autodesk Inventor 2013

Obr. 16 a Obr. 17 ukazuje schopnost jednotlivých software vykreslit model. V programu Inventor 2013 byly přidány modelu textury.



8 PŘIPOJENÍ DO ELEKTRICKÉ SOUSTAVY

V současné době je většina elektrické energie vyráběna v tepelných a jaderných elektrárnách. Palivem je zde především černé a hnědé uhlí, zemní plyn a uran. Zásoby těchto energetických surovin však nejsou nevyčerpatelné.

Legislativní podmínky v ČR v současné době neřeší připojení zdroje elektrické energie lidské výroby. V následující kapitole jsou uvažovány stejné podmínky jako pro připojení obnovitelných zdrojů energie, dále jen OZE, jako je fotovoltaická elektrárna, větrná elektrárna, vodní elektrárna a další.

Elektrický stroj v této práci má sloužit jako generátor pro výrobu elektrické energie. Aby bylo možné elektrickou energii dodávanou generátorem využít, musí mít parametry odpovídající připojenému spotřebiči, proto je potřeba připojení měniče. Zde připadají dva možné způsoby využití elektrické energie:

1. Připojení do vlastní sítě (ostrovní provoz)
2. Připojení do elektrifikační soustavy

8.1 Připojení do ostrovního provozu

Ostrovní síť (Off-grid) jedná se o síť která je nezávislá na dodávce energie z distribuční sítě. Jedná se o soběstačné energetické bloky. Pro takovou síť se musí zajistit, aby byla udržována rovnováha mezi výrobou a spotřebou elektrické energií. V této kapitole bylo čerpáno z literatury [28], [29], [30].

Bilanční rovnice ES:

$$\sum S_g(t) = \sum S_s(t) + \sum S_z(t) \quad [W; W, W] \quad 8-1$$

Kde:

S_g – Výkon dodávaný generátory

S_s – Výkon spotřebovaný

S_z – Ztráty

Princípem je vygenerovat dostatečné množství elektrické energie pro připojené zařízení. Pro udržování rovnováhy energie v síti, musí být v síti akumulární člen (akumulátor), který dokáže vyrovnat jednotlivé špičky, ať přebytku nebo výpadku energie. Tento člen prodražuje systém a musí být optimálně navrhnout pro každou síť.

Ostrovní síť obsahuje:

- Generátor
- Ostrovní střídač (řídící prvek, řídí toky energie mezi akumulátory a sítí)
- Elektrické vedení
- Spotřebič

Výhody ostrovní sítě:

- Nezávislé na elektrifikaci
- Soběstačnost
- Možnost připojení jakýkoliv zařízení, žádné omezení distributora elektrické energie



Nevýhody ostrovní sítě

- Hlavní nevýhoda ostrovní sítě spočívá v nutnosti použití akumulátoru pro uchování energie
- Vysoké pořizovací náklady
- Omezená flexibilita
- Nutnost provedení dimenzace baterií pro každou síť zvlášť

8.2 Připojení do distribuční sítě

Pro připojení do distribuční sítě budeme postupovat stejně jako při připojení OZE dle zákona č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Tento zákon byl vybrán z důvodu, že energie člověka je obnovitelná a je závislá na sluneční energii.

V případě připojení zařízení do distribuční sítě je výkup energie prováděn dle:

- Pevná výkupní cena

Povinnost připojit elektrárny do přenosové soustavy a veškerou vyrobenou elektřinu (na kterou se vztahuje podpora) vykoupit. Výkup probíhá za cenu určenou pro daný rok Energetickým regulačním úřadem a tato cena bude vyplácena jako minimální (navyšuje se o index PPI, tedy o inflaci) po dobu následujících dvaceti let.[28]

- Zelený bonus

Pro výkup energie z elektrárny si dále můžete vybrat i jiné schéma podpory - tzv. zelený bonus. Jde o finanční částku, která navyšuje tržní cenu elektřiny. Ta zohledňuje snížené poškození životního prostředí využitím obnovitelného zdroje, tedy elektrárny. Tento systém odpovídá více volnému trhu, protože tlačí na výrobce, aby si na trhu sám našel obchodníka, kterému elektřinu prodá za tržní cenu.[28]

Pokrytí vlastní spotřeby

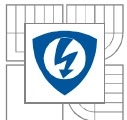
Využití vyprodukované energie pro vlastní spotřebu objektu, kdy místo prodeje elektrické energie distributorovi bude ponížena odběr elektrické energie objektu. Zde je ovšem nutné, aby bylo zajištěno odpojení v případě možného přetečení energie do distribuční sítě.

Výhody

- Výkup vyrobené energie
- Spolehlivost
- Nižší cena v porovnání z ostrovního provozu

Nevýhody

- Změna objektu na výrobu elektrické energie
- Regulace dodávané energie do sítě



9 MOŽNOST VYUŽITÍ

Způsob využití energie získané z generátoru získaného kola:

- 1) Ostrovní provoz
 - a. Pro ostrovní provoz je navržena konfigurace: Generátor je připojen na usměrňovač. Usměrňovač následně napájí regulátor baterií. Baterie jsou připojeny na střídač, který napájí 1f. spotřebiče maximálně o výkonu 800 VA.
 - b. Kolo připojené přes frekvenční měnič nebo usměrňovač je zapojeno do existujícího ostrovního provozu.
- 2) Připojení do sítě
 - a. Využití frekvenčního měniče s rekuperací, kdy je energie vrácena do sítě.
 - b. Využití frekvenčního měniče, kde stejnosměrný obvod bude zapojen do střídače určeného pro FVE, který bude připojen do rozvodné sítě (ON-GRID).

Přidaná hodnota:

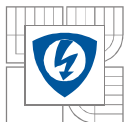
Zde je možné generátor připojit na informační systém. Při řízeném odběru/vrácení energie může trenér nastavovat zátěž neboli intenzitu šlapání. Cvičení se dá i oživit různými soutěžemi, kdy je možné systém nastavit na přetlačování, kdy jednotliví cvičící se poměřují navzájem atd. Tento systém je vhodný pro vizualizaci, kdy je možné snímat vyprodukovanou energii, úsporu CO₂ a další.

9.1 Cena sestav

Kalkulace ceny pro jednotlivé provozy s využitím průmyslově vyráběného příslušenství pro provoz. Zde jsou vybrány hlavní součásti elektrického zařízení pro provoz. Cena je uvedena bez spinningového kola z důvodu pohybu cen kol od 5 000 Kč po 50 000 Kč. Uvedené zařízení odpovídá parametrům $U_{vstupní/výstupní}$, $I_{jmenovitý/maximální}$ a dalším. Ceny zařízení jsou uvedeny pro koncové zákazníky, měniče Sinamics a výkonné jednotky PM od výrobce Siemens pro obchodní partnery (své odběratele). Cena generátoru byla poptána u firem zabývajících se návrhem atypických strojů, bohužel do termínu odevzdání diplomové práce, nedošla cenová nabídka, neoficiální cena byla při malosériové výrobě stanovena na cenu 20 000 Kč.

Tab. 16 Kalkulace ceny pro ostrovní provoz 1)a

Název	ks	Cena s DPH	Celková cena
Navržený generátor	1	20 000 Kč	20 000 Kč
Usměrňovač 1000V/6A [34]	1	200 Kč	200 Kč
Měnič napětí DC/DC 19-72V na 12V 480W 40A [36]	1	5 000 Kč	5 000 Kč
Regulátor nabíjení [33]	1	2 600 Kč	2 600 Kč
Baterie 2V, 213Ah [32]	6	4 400 Kč	26 400 Kč
Střídač 12 DC/AC 230V 800VA [35]	1	9 600 Kč	9 600 Kč
			<u>63 800 Kč</u>



Tab. 17 Kalkulace ceny pro ostrovní provoz 1)b

Název	ks	Cena s DPH	Celková cena
Navržený generátor	1	20 000 Kč	20 000 Kč
Usměrňovač 1000V/6A [34]	1	200 Kč	200 Kč
Měnič napětí DC/DC 19-72V na 12V 480W 40A [36]	1	5 000 Kč	5 000 Kč
			<u>25 200 Kč</u>

Tab. 18 Kalkulace ceny připojení do sítě využití měniče 2)a

Název	ks	Cena s DPH	Celková cena
Navržený generátor	1	20 000 Kč	20 000 Kč
SINAMICS G120D(řídící jednotka CU240B-2) [37]	1	10 000 Kč	10 000 Kč
Výkoná jednotka PM250-HO 0,75kW – rekuperace [37]	1	10 000 Kč	10 000 Kč
			<u>40 000 Kč</u>

Tab. 19 Kalkulace ceny připojení do sítě pomocí střídače 2)b

Název	ks	Cena s DPH	Celková cena	ks	Celková cena
Navržený generátor	1	20 000 Kč	20 000 Kč	40	800 000 Kč
SINAMICS G120(řídící jednotka CU240B-2) [37]	1	3 300 Kč	3 300 Kč	40	132 000 Kč
Výkoná jednotka PM230-HO 0,55kW [37]	1	4 200 Kč	4 200 Kč	40	168 000 Kč
Střídač STP 17000TL-10 (17kW) [38]	0	106 600 Kč	0 Kč	1	106 600 Kč
			<u>27 500 Kč</u>		<u>1 206 600 Kč</u>

V Tab. 19 jsou dvě varianty. První, kdy je kolo připojeno do stávající soustavy FVE elektrárny (objekt vyrábí energii pomocí fotovoltaických panelů) a je možné připojit frekvenční měnič bez poškození panelů. Druhá varianta je střídač určený pouze pro generátor, kdy je možné připojit až 40 generátorů, tím klesne cena pro jedno kolo na cenu 30 000kč.

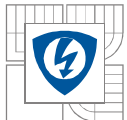
Při srovnání kalkulaci je možné se dostat na cenu kolem 25 000kč dobudováním generátoru do stávající infrastruktury. Při ceně 30 000kč je možné vybudovat nové přípojné místo. Využití frekvenčního měniče v současné době není vhodné kvůli vysoké ceně a nevhodnosti, cena těchto měničů klesá a vhodnost tohoto řešení by mělo nastat dle výrobců měničů do deseti let. Ostrovní provoz za pomoci kola je 2 krát dražší a jeho použití není vhodné.

9.2 Odhad vyrobené energie

Pro množství vyrobené energie je nutné zavést několik předpokladů, kterými jsou průměrná denní doba využití stroje, průměrný výkon člověka cvičící na spinningovém kole.

Výpočet se provede pro jedno spinningové kolo, které je umístěno ve fitness centru a jedno kolo pro soukromé použití.

Pro domácí cvičení byl použit výzkum TNS AISA z roku 2009. [27] Průměrná frekvence cvičení u dotázaných lidí 2x týdně. Doba cvičení na spinningovém kole je uvažována 50 minut.



Pro fitness centrum otevřené 12 hodin denně je průměrné využití spinningového kola 300 minut denně. Plné využití je 600minut.

Výpočet výroby elektrické energie je proveden dle literatury [9], pro potřebu práce je zjednodušen. Výkon dodávaný generátorem $P = 300 \text{ W}$. Sledované období je jeden týden, měsíc (28 dní), rok.

Výroba elektrické energie A_v je energie měřená na svorkách generátoru

$$A_v = \int_0^T P \cdot dt \quad [kWh; kW, h] \quad 9-1$$

Po integrování dostaneme rovnici:

$$A_v = P \cdot t \quad [kWh; kW, h] \quad 9-2$$

Kde t - doba provozu

Pro porovnání využití zavedeme koeficient vytižení:

$$k_v = \frac{T}{T_{max}} \quad [-; h, h] \quad 9-3$$

Kdy T - doba využitelnosti kola

T_{max} - doba jednoho roku, 8760 hodin

Tab. 20 Hodinová využitelnost kola

	Domácí použití		Spinningové centrum	
	1 osoba	2 osoby	Průměrná využití	Plné využití
Týden	1,7	3,3	35	70
Měsíc	6,7	13,3	140	140
Rok	86,7	173,3	1820	3640
k_v	0,01	0,02	0,21	0,42

Tab. 21 Vyrobená energie v kWh

	Domácí použití		Spinningové centrum	
	1 osoba	2 osoby	Průměrná využití	Plné využití
Týden	0,5	1	10,5	21
Měsíc	2	4	42	42
Rok	26	52	546	1092

Z Tab. 20 vyplývá nevhodnost pro domácí použití, jelikož je kolo využíváno sporadicky, pro jednu osobu vychází využití kola za rok na 87 hodin, což odpovídá 1 % využitelnosti. Využití kola ve fitness centru je daleko výhodnější, kdy je kolo využito 20 % času využitelnosti.

Tab. 21 je převedena na vyprodukovanou energii, kdy je průměrně ve spinningovém centru vyprodukováno na jednom kole 0,5 MWh za rok.



9.3 Návratnost investice

Hlavní argument pro osazení generátoru do spinningového kola je návratnost investice. V této kapitole se zaměříme na predikci a výpočet vyrobené energie a následně její cenové zhodnocení.

Nejlepší varianta je dle současné legislativy zelený bonus. Za vyrobenou energii dostane výkupní tržní cenu, zelený bonus jako příplatek k tržní ceně a ušetří za nákup elektrické energie od distributora.

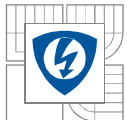
Zelený bonus pro výrobu energie pomocí lidského těla v současné době není vypsán ani zveřejněn. Pro výpočet se použije modelový příklad s FVE. Návratnost investice je pouze orientační.

Tab. 22 Návratnost investice

		Domácí použití	Spinningové centrum (40 kol)	
		samotné kolo	Průměrné vytížení	Plné vytížení
Investiční náklady	[Kč]	40 000 Kč	1 206 600,00 Kč	1 206 600,00 Kč
Instalovaný výkon	[kW]	0,75	17	17
Roční produkce energie	[kWh]	26	21840	43680
Roční výnos za zelený bonus	[Kč]	74 Kč	53 290 Kč	106 579 Kč
Roční úspora v nespotřebované energii	[Kč]	122 Kč	102 648 Kč	205 296 Kč
Celkový roční výnos	[Kč]	197 Kč	155 938 Kč	311 875 Kč
Návratnost investice	[rok]	203 let	7,7 let	3,8 let

V Tab. 22 je uvažována sazba pro zelený bonus 2,44 Kč/kWh, tržní cena energie 4,7 Kč/kWh. Dle extrémně dlouhé návratnosti investice je domácí použití nevhodné. V případě využití kol ve spinningovém centru při průměrném vytížení kol dojde k navrácení investovaných prostředků přibližně v horizontu 8 let, za předpokladu průměrného vytížení všech kol, nulových ztrát a bez dalších nákladů. Při plném vytížení dojde k návratnosti investice již za necelé čtyři roky.

V případě využívání získané energie pouze pro vlastní spotřebu provozovny je návratnost investice při průměrném vytížení odhadována přibližně na 12 let, při plném vytížení na 6 let.



11 ZÁVĚR

Práce se zabývala využitím energie získané lidskou mechanickou prací a návrhem elektrického stroje pro spinningové kolo.

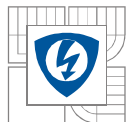
První část se zabývala analýzou možností využití lidské energie pro výrobu elektrické energie při sportovní aktivitě na spinningovém kole. V práci je vysvětlen spinning, funkčnost a problematika spinningového kola. Dále se práce zabývala možnostmi vydané energie lidského těla z fyziologického hlediska s ohledem na výkon, který je tělo schopno vydat. Na základě rešerše dostupné literatury bylo zjištěno, že totožná problematika využití lidské energie získané z cvičení na spinningovém kole nebyla zatím řešena. Existují pouze práce zabývající se využitím jízdního kola. Z provedené rešerše vznikly podklady pro výběr vhodného stroje vzhledem k jeho pořizovací ceně, účinnosti a velikosti.

Jako vhodný stroj pro tento účel byl vybrán synchronní stroj s permanentními magnety ze vzácných zemin. Na základě analytických výpočtů byl stanoven rozměr a další parametry stroje. Pro výpočet základních parametrů stroje byl vytvořen zdrojový kód pro program MATLAB, aby bylo možno tyto parametry měnit. Výsledky těchto výpočtů byly použity v programu Maxwell. Model byl vytvořen formou skriptu s definovanými proměnnými, aby bylo možné snadno měnit rozměry. Na základě vytvořeného modelu byl stroj optimalizován a získané výsledky analyzovány. Základní model generátoru byl změněn na jinou topologii, kdy byl generátor zvětšen na velikost setrvačnicku, vyskytujícího se v každém spinningovém kole. Byly upraveny také hlavní parametry v elektrické části stroje, aby bylo možno provést optimalizaci a následnou analýzu v programu Maxwell. Hlavním cílem těchto změn bylo umožnit připojení existujících zařízení, která mohou generátorem vyrobenou energii předávat do sítě.

Upravený návrh generátoru byl vymodelován v programu Inventor 2013, kde byl vytvořen konstrukční výkres. Pro tento stroj byly vypracovány dva koncepty využití – v ostrovní síti a připojení do distribuční sítě. Návratnost investice byla počítána u stroje využívaného v domácím prostředí a ve spinningovém (fitness) centru. Pořizovací cena navrhovaného řešení byla stanovena na 30 – 40 tisíc Kč.

Vzhledem k téměř sporadickému využití spinningového kola v domácím prostředí a tudíž extrémně dlouhé době návratnosti je tento koncept zavržen. Vhodnější je využití navrženého generátoru ve spinningovém centru, kde může dosahovat vyrobená elektrická energie průměrně až 0,5 MWh za rok, při plném využití 1 MWh za rok. Navrácení investice s podporou dotací na obnovitelné zdroje je v tomto případě odhadována na necelých 8 let, respektive necelé 4 roky při plném využití. V případě využití získané energie pouze pro vlastní spotřebu provozovny je odhadována délka návratnosti přibližně 12 let, respektive 6 let.

Při rozumně nastavených dotacích na výkup elektrické energie je koncept využití elektrické energie ze spinningového kola ve fitness centru rentabilní. V případě absence dotací je návratnost investice delší a finanční úspora menší. Z hlediska společenské odpovědnosti firem je však i tento koncept přínosný a může být využit v ekologicky zaměřené prezentaci firmy.



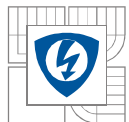
LITERATURA

Knižní

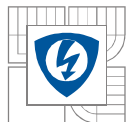
- [1] SLÁMOVÁ, Petra. Porovnávání hodnot bodystatu ve fitness [online]. 2011 [cit. 2012-04-22]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií. Vedoucí práce Hana Bubníková. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/213797/fsps_m/
- [2] ELIŠKOVÁ, Miloslava. Přehled anatomie. 2006. vyd. Praha: Karolinum, 2006, 309 s. ISBN 80-246-1216-X.
- [3] Lindberg-Poulsen, K.; Andersen, M.A.E.; Knott, A.; Andersen, T.; , "Energyharvestingfromanexercise bike using a switch-mode convertercontrolledgenerator," SustainableEnergy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conferenceon , vol., no., pp.1-5, 6-9 Dec. 2010. doi: 10.1109/ICSET.2010.5684421. Print ISBN: 978-1-4244-7192-8.
- [4] Strzelecki, R.; Jarnut, M.; Benysek, G.; , "Exercise bike poweredelectricgeneratorfor fitness club appliances," PowerElectronics and Applications, 2007 EuropeanConferenceon , vol., no., pp.1-8, 2-5 Sept. 2007. doi: 10.1109/EPE.2007.4417471. Print ISBN: 978-92-75815-10-8
- [5] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOV´A. JOHN WILEY & SONS, Ltd. DESIGN OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES. 2008. vyd. Hardcover: Wiley, 2008, 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [6] HETFLAJŠ, M. Teplotní analýza asynchronního stroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 29 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..
- [7] SVOREŇ, J. Návrh a analýza třífázového asynchronního motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [8] KVAPIL, M. Návrh generátoru pro malou vodní elektrárnu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík.
- [9] MATOUŠEK, Antonín. Elektrárny I - příklady. 1. vyd. Brno: VUT, 1991, 192 s. ISBN 80-214-0358-6.
- [10] CIGÁNEK, Ladislav. Elektrické stroje: Působení, provedení a navrhování. 1951. vyd. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. Svazek 4.

Elektronické

- [11] SPINNING® & FITNESS. SPINNING® & FITNESS [online]. 2009 [cit. 2012-02-23]. Dostupné z: <http://www.spinningafitness.cz>
- [12] CyklotrenažerinSPORTlineEvotron [online]. Praha, 2011 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://obchod.ronnie.cz/o-4179-cyklotrenazer-insportline-evotron.html?o=9428>
- [13] FITHAM S.R.O. Cyklotrenažéry [online]. 2010 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <http://www.cyklotrenazer.cz/>



- [14] Lidský výkon [online]. 17. 3. 2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Doprava_lidskou_silou
- [15] PedalPower Bike Generator Frequently Asked Questions: How do I measure power generated by a bicycle generator? [online]. 2006 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://scienceshareware.com/bicycle-generator-faq.htm>
- [16] Free Bike Generator Plans [online]. 2006 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.pedalpowergenerator.com/how-to-build-a-bicycle-generator-free-power.html#much>
- [17] Úřad průmyslového vlastnictví [online]. 2008 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.upv.cz/cs/prumyslova-prava/vynalezy-patenty.html>
- [18] Patent Společenství. Oficiální internetové stránky Evropské unie [online]. 22.03.2011 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/pharmaceutical_and_cosmetic_products/l26056_cs.htm
- [19] PedalPower Bike Generator Frequently Asked Questions: How do I measure power generated by a bicycle generator? [online]. 2006 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://scienceshareware.com/bicycle-generator-faq.htm>
- [20] Bicycle Powered Generator [online]. 1999 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.mattshaver.com/bikegen/index.htm>
- [21] Bike powered electricity generators are not sustainable. Low-tech Magazine [online]. 25. 5. 2011 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.lowtechmagazine.com/2011/05/bike-powered-electricity-generators.html>
- [22] MALÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY MAXON. In: MALÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY MAXON [online]. 18. 7. 2002, 2002 [cit. 2012-04-22]. 1.1. Dostupné z: http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf
- [23] ANSYS Maxwell [online]. 2012 [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Electromechanical+Design/ANSYS+Maxwell>
- [24] Akumulátory a malé stroje. In: ČVUT FEL. Akumulátory a malé stroje [online]. 28.11.2012 [cit. 3.4.2013]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/A0B14AMS/1_mal_stroje_vod.pdf
- [25] KONÍČEK, Ing. Václav. Elektrické stroje: Transformátory [online]. Praha: Vyšší odborná škola elektrotechnická F. Křížáka, 2007, s. 23 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z WWW: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/sps/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [26] KONEČNÁ, CSC., Doc. Ing. Eva a Doc. Ing. Aleš RICHTER, CSS. Elektrické stroje: Učební texty [online]. Zář 2000. Liberec: Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studi, 2000 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/ele/El_Str
- [27] Magazín pro zdraví. Jak často Češi cvičí [online]. 25.02.2009. 2009 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.bud-fit.cz/hubnuti/jak-casto-cesi-cvici/>
- [28] Proč se solární elektrárna vyplatí?. Alufront: fotovoltaika [online]. 2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://alufrontsolar.cz/cs/zpusoby-pripojeni.html>



- [29] PETRUŽELA, Ivan. Ostrovní provoz: BlackOut. 2006, 32 s. Dostupné z: home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/FEL_CVUT/lekce13_06.pdf
- [30] Ostrovní a záložní FV systémy: vstupenka do světa energetické nezávislosti. Mojeslunce.cz [online]. 2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.mojeslunce.cz/o-fotovoltaice/ostrovnii-systemy/>
- [31] Trenažér Elite Fitz Bike Pro V2. Global-Sport [online]. 2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.global-sport.cz/trenazer-elite-fitz-bike-pro-v2>
- 32 4 OPzS solar.power 280 [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://eshop.terms.eu/cz/e-shop/969440/c59736-baterie/4-opzs-solar-power-280.html>
- 33 BlueSolar MPPT 70/15 (12/24V-15A) [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://eshop.terms.eu/cz/e-shop/1035344/c61882-regulator-nabijeni/bluesolar-mppt-70-2f15-2812-2f24v15a-29.html>
- 34 3FÁZOVÝ KREM. MUSTK. USM. DBI6 -12 [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/3fazovy-krem-mustk-usm-dbi6-12.k161052>
- 35 Phoenix 12/800 [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://eshop.terms.eu/cz/e-shop/1035067/c61783-male-systemy-28-3c5kw-29-komponenty/phoenix-12-2f800.html>
- 36 Měnič napětí DC/DC 19-72V na 12V 480W 40A [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.mulac.cz/301-1000w/menic-napeti-dc-dc-19-72v-na-12v-480w-40a-sd-500l-12.htm>
- 37 SINAMICS G120 [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.automation.siemens.com/mcms/standard-drives/en/low-voltage-inverter/sinamics-g120/pages/sinamics-g120.aspx>
- 38 Měniče (střídače) [online]. 2013 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.ztcenergy.com/2012/08/27/menice-stridace/>

Zákony

180/2005 Sb. Zákon o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů)



PŘÍLOHY

- 1. Zdrojový kód programu MATLAB pro analytický výpočet**
- 2. Výkresová dokumentace**



1) Zdrojový kód programu MATLAB pro analytický výpočet

```
clc;
%% Zadané parametry %%
P=300;      %výkon ve W
U=36;      %napětí ve V
ni=0.85;   %účinnost

%% měním parametry %%
p=5;      %počet pólových dvojic
f=20;     %frekvence v Hz

m=3;      %počet fází
q=0.5;    %počet drážek pro vinutí

vzduchmezzad=5e-4; %vzduchová mezera volena +0,3-1mm
%h5o=0.03; %délka rozteče
Ja=4e6;   %proudová hustota vodiče
a=1;      %počet paralelních větví

%% neměním hodnoty %%
lmax=0.06; %délka

Blspic=0.95;      %indukce ve vzduchové mezeře v T
Bz=1.8;           %indukce v zubu statoru v T
Bjho=1.5;         %indukce v Jhu stroje v T
apm=0.8;          %koeficient ztrát
kfe=0.97;         %koeficient plnění železa
sigmaftan=21000; %tangenciální napětí v Pa
kw=0.933;         %koeficient poměrů toku ve vinutí

b1=0.003;          %zvolené rozměry drážky
h1=0.001;
h2=0.001;
h3=0.0002;
h6=0.0002;
hx=0.0002;

%% Výpočet %%
M=P/(2*pi*(f/(p))) %moment Nm
Vr=M/(2*sigmaftan); %objem v m3
x=(pi*sqrt(p))/(4*p); %poměr mezi rotorem a státorem
Dr=((4*Vr)/(pi*(x)))^(1/3) %Průměr stroje
l=x*Dr %délka stroje
vzduchme=(0.18+0.006*p^0.4)/1000 %velikost vzduchové mezery menší
jak 1mm volíme 1mm mezery
vzduchmez=0.001;
D=Dr+2*vzduchmez; %vnitřní průměr stroje
ns=(60*f)/p %otáčky stroje

%% Vinutí statoru %%
Q=2*p*m*q %počet drážek
```



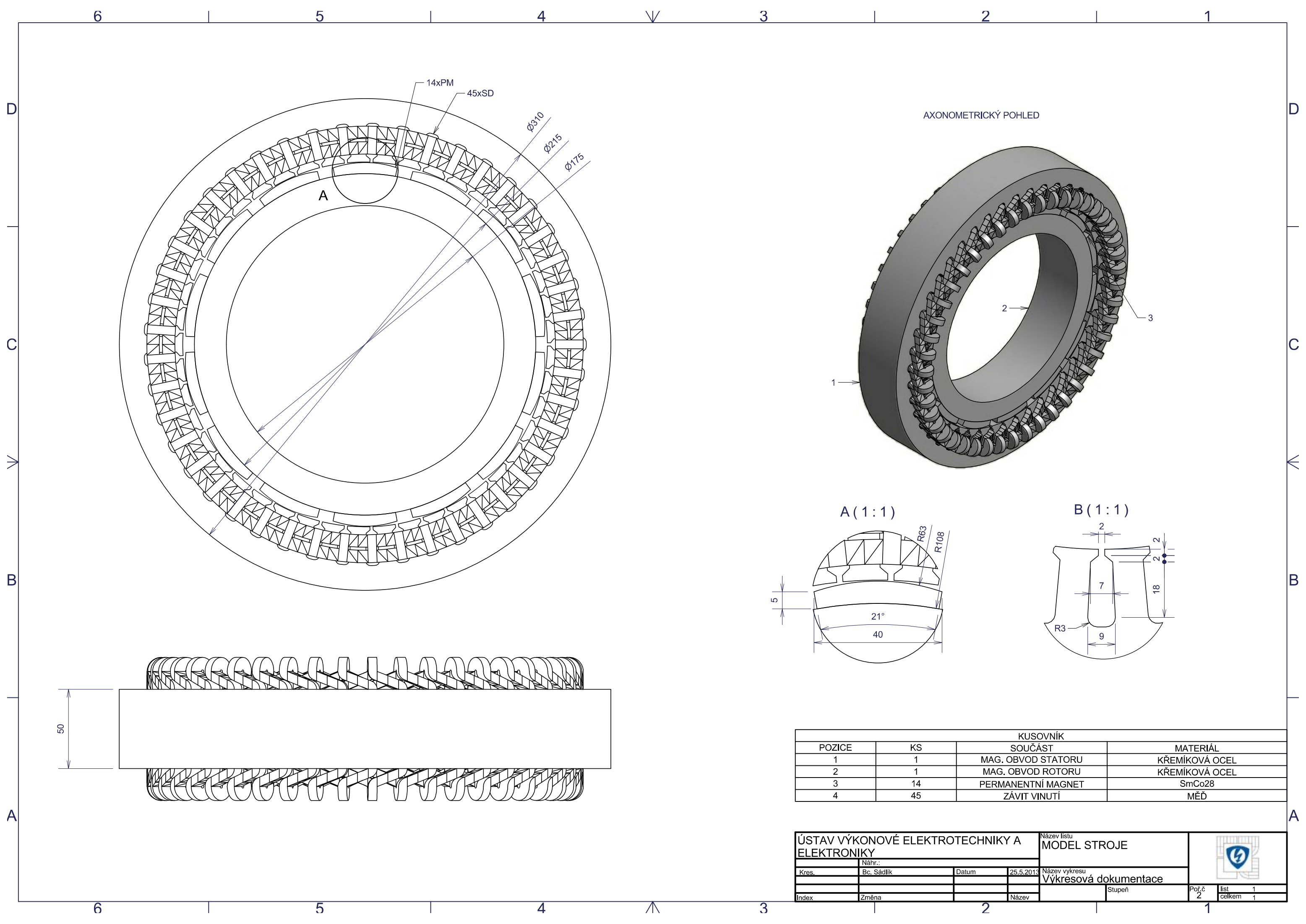
```
td=(pi*D)/Q; %Drážková rozteč v m
tp=(pi*D)/(2*p); %Pólová rozteč
Bdelta=(pi*Blspic)/(4*sin(apm*(pi/2))); %magnetická indukce ve
vzduchové mezeře
Nv2=(sqrt(2)*(U/sqrt(3)))/(2*pi*f*kw*apm*Bdelta*tp*1); %Počet
závitů ve vinutí
Nv=(sqrt(2)*(U))/(2*pi*f*kw*apm*Bdelta*tp*1); %Počet závitů ve
vinutí
Vd=2*a*m*(Nv2/Q); %Počet vodiču(cívek) v drážce musí být sudé
Vdz=round(Vd); %zaokrouhlení na celé číslo
Nz=(Q*Vdz)/(2*a*m); %Počet závitů cívky na jedné fáze
N=round(Nz); %zaokrouhlení na celé číslo
Bmaxn=(Vd/Vdz)*Bdelta; %nová indukčnost ovlivněna původní
bz=((1*((pi*D)/Q))/(kfe*1))*(Bmaxn/Bz); %minimální šířka zubu
In1=P/(m*ni*(U/sqrt(3))) %jmenovitý proud
Sv=In1/(a*Ja); %Plocha vodiče
Dv=sqrt((4*Sv)/(pi)); %Průměr vodiče
Sdrcu=(Sv*Vdz)/0.45 %Potřebný prostor v drážce

%% Výpočet drážky %%
b4=((pi*(D+2*(h1+h2)))/Q)-bz; %velikost drážky
b4c=b4+((2*pi*h3)/Q)-(2*h6); %velikost drážky
h5=(Sdrcu/b4c); %velikost drážky
h4=h5+(b5c/2); %velikost drážky
b5c=b4c+((2*pi*h5)/Q); %velikost drážky
Sd=((b4c+b5c)/2)*h5+(pi/8)*b5c^2; %plocha drážky

%% výpočet vyšky rotoru %%
Um=(Bmaxn/(4*pi*1e-7))*(2*vzduchmezzad); %napětí na vzduchové
mezeře

%% Výška rotorového, statorového jha a magnetů %%
fi2=(apm*Bmaxn*tp*1); %mag. tok vypočtený přesněji
fi=(Bmaxn*D*1)/p; %magnetický tok
hj1=fi/(2*Bz*1*kfe) %výška statorového jha

%% Výpis výsledků %%
kdr=Sdrcu/Sd; %koeficient plnění drážky kolem 0,45
otacky=ns; %otáčky
Dos=D+2*(h1+h2+h4+hj1) %vnější průměr statoru
Stator=[Dos,D,l,Q,hj1]; %výsledky statoru
vinuti=[Vdz,N]; %výsledky vinuti
prumer_vodce=Dv; %průměr vodiče
drazka=[h1,h2,h5,b1,b4,b5c] %výpočet drážky
```



AXONOMETRICKÝ POHLED

1

2

3

A (1:1)

B (1:1)

50

KUSOVNÍK			
POZICE	KS	SOUČÁST	MATERIÁL
1	1	MAG. OBVOD STATORU	KŘEMÍKOVÁ OCEL
2	1	MAG. OBVOD ROTORU	KŘEMÍKOVÁ OCEL
3	14	PERMANENTNÍ MAGNET	SmCo28
4	45	ZÁVIT VINUTÍ	MĚĎ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY			Název listu MODEL STROJE		
Kres.	Návrh:	Datum	Název vykresu		
	Bc. Sádlik	25.5.2013	Výkresová dokumentace		
Index	Změna	Název	Stupeň	Poř.č.	list
				2	1
					celkem 1