



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

GENERÁTOR PRO LETECKOU APLIKACI HUMS

GENERATOR FOR AIRCRAFT APPLICATION HUMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Zeldá

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Jan Zeldá**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Generátor pro leteckou aplikaci HUMS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Monitorování a diagnostika konstrukčních prvků je především v leteckém průmyslu velmi důležitý aspekt z hlediska bezpečného a cenově efektivního provozu, či údržby. Jednotka "Health and Usage Management Systems", zkráceně HUMS, poskytuje informace o kondici a provozu dané konstrukce, přičemž její autonomní provoz je nezbytný. Úkolem práce je navrhnout autonomní zdroj energie pro HUMS jednotku, která nezávisle monitoruje konstrukci ocasu helikoptéry během letu.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše nezávislých zdrojů energie vhodných pro HUMS jednotku
2. Vytvoření modelu autonomního zdroje energie
3. Optimalizační studie parametrů zdroje vzhledem k velikosti a hmotnosti
4. Návrh výkonové elektroniky pro navržený zdroj

Seznam literatury:

Steingart, D.: Power Sources for Wireless Sensor Networks, Springer, 2009.

Priya S, Inman DJ: Energy Harvesting Technologies. Springer US, 2009.

Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures, Springer, 1999.

Měřička, J., Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje, SNTL, Praha, 1973.

Fiala, P., Kadlecová, E.: Modelování elektromagnetických polí, VUT v Brně, Brno, 2005.

Kurfürst J.: Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2014. Disertační práce.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem samostatného zdroje elektrické energie pro Health and Usage Monitoring Systems instalovaný v ocasní části vrtulníku. Na začátku práce byly stručně představeny systémy HUMS a poté byla provedena rešerše možností získání elektrické energie. Dále byly popsány magnetické vlastnosti materiálů se zaměřením na permanentní magnety. Na popis magnetů navázal rozbor návrhu rotačního generátoru se statickou cívkou. V návrhu je zahrnuta i tvorba modelu magnetického pole pomocí metody konečných prvků. Byl sestaven prototyp a zhodnoceny další konstrukční řešení. Hodnocení různých konstrukcí plynule přešlo v použití optimalizačního algoritmy SOMA. Na generátor navazuje návrh elektroniky, která usměrní a zreguluje napětí dodávané generátorem. Na závěr práce byl sestaven a otestován kompletní prototyp zdroje se dvěma různými řešeními regulace napětí.

Klíčová slova

Generátor, rotace, modelování, magnetické pole, simulace, SOMA, optimalizace, experiment

Abstract

Presented diploma thesis deals with development of the autonomous electric energy source for Health and Usage Monitoring Systems placed at the rear part of a helicopter. Firstly, the HUMS systems were described briefly and the research of available energy sources was made after that. After that, the magnetic properties of the materials were described with the special focus on the permanent magnets. The draft also includes the creation of model of the magnetic field using the final element method. Prototype was assembled and the other design solutions were evaluated. The evaluation of various designs passed in the use of SOMA optimization algorithms. The generator is followed by the draft of the electronics, which streamlines and regulates a voltage supplied by the generator. At the end of the thesis, the complete source prototype was assembled and tested with two different regulators

Keywords

Generator, rotation, modeling, magnetic field, simulation, SOMA, optimization, experiment

Bibliografická citace

ZELDA, J. *Generátor pro leteckou aplikaci HUMS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 64 s. Vedoucí diplomové práce
doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Generátor pro leteckou aplikaci HUMS“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a v seznamu literatury jsem uvedl všechny zdroje použité v této práci.

V Brně dne 27. 5. 2016

Bc. Jan Zeldá

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Hadašovi Ph.D. za trpělivost, odborné vedení a cenné rady. Také bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia stejně jako při psaní této práce

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Definice problému a cíl práce.....	2
3. HUMS.....	3
3.1. Definice.....	3
3.2. Vývoj.....	3
4. Možnosti napájení.....	5
4.1. Rotační generátor	5
4.2. Energy harvesting.....	6
4.2.1. Piezoelektrický jev.....	7
4.2.2. Seebeckův jev- Termoelektrický článek.....	8
4.2.3. Elektromagnetická přeměna	10
5. Vhodný typ zdroje	11
6. Magnetické vlastnosti materiálů	13
6.1. Permanentní magnety.....	14
7. Rotační generátor.....	15
7.1. Postup návrhu generátoru.....	15
7.2. Model magnetického pole	17
7.2.1. Tvorba modelu v Matlabu.....	18
6. Návrh generátoru	23
6.1. Výsledky prvního návrhu.....	26
6.2. Druhý návrh	28
6.2.1. Výsledky simulace druhého návrhu.....	30
7. Optimalizace	32
7.1. Optimalizační algoritmus	32
7.2. Optimalizace metodou SOMA - All To One	32
7.2.1. Popis struktury optimalizačního skriptu	32
7.2.2. Inicializační skript.....	33

7.2.3.	Vnořené funkce	35
7.2.4.	Ohodnocovací funkce	35
8.	Elektronika.....	39
8.1.	Usměrnění střídavého napětí.....	39
8.2.	Stabilizace usměrněného napětí	40
8.3.	Regulace stabilizovaného napětí na hladinu 3,3 V	41
9.	Experimentální prototyp	44
9.1.	Výsledky měření na prototypu	44
10.	Zhodnocení konstrukcí	48
11.	Závěr	50
12.	Literatura.....	51
13.	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	53

1. Úvod

Health and Usage Monitoring Systems (dále jen HUMS) jsou ve stále větším měřítku implementovány jak do vrtulníků a letadel, pro které byly navrženy, tak i do dalších průmyslových odvětví. To se děje proto, že tyto systémy zefektivňují rutinní údržbu a pomáhají předcházet nečekaným selháním strojů. V této práci bude řešena problematika návrhu generátoru pro napájení senzorického systému pro HUMS instalovaného v ocasní části helikoptéry. Nejprve bude proveden náhled do historie a současného stavu HUMS systémů a následně se práce zaměří na nalezení vhodného zdroje pro napájení senzorické soustavy. Výběr napájení a samotné provedení celé sítě je velmi aktuální otázkou, jelikož všichni výrobci se snaží snížit cenu svých výrobků a dopad jejich instalace na celý systém. To sebou nese eliminaci nutnosti použití kabeláže. Z tohoto důvodu nebude využit primární zdroj vrtulníku, ale výběr se zaměří na alternativní, pokud možno lokalizované, zdroje energie. Pro lokální zdroje nízkého výkonu se často využívá energy harvesting přímo v místě aplikace. Proto budou zběžně představeny možnosti a využití energy harvestingu. Pro napájení HUMS je však požadován výkon na hranici možností energy harvestingu a tak budou zváženy i konvenční možnosti generování elektrické energie.

Podle vybraného způsobu generování elektrické energie bude sestrojen funkční vzorek, na kterém bude ověřena správnost matematického modelu a zároveň na něj bude možno navrhnout a otestovat elektroniku pro zpracování získané energie. Ta je potřebná k zabezpečení stabilního napájení senzorické sítě.

Prvotní návrh bude následně optimalizován pomocí vybraného optimalizačního algoritmu tak, aby co nejlépe vyhovoval potřebám leteckého průmyslu, jinak řečeno aby byl při splnění zadaných parametrů co možná nejlehčí a nejmenší. Výstupem této práce pak bude kompletní návrh lokalizovaného zdroje elektrické energie pro zmíněnou senzorickou síť.

2. Definice problému a cíl práce

Zadáním této práce je vytvořit pokud možno malý, lehký a neporuchový zdroj elektrické energie, který by byl schopný kontinuálně napájet spotřebič výkonem 150 mW. Tento zdroj energie bude umístěn v ocasní oblasti helikoptéry a neměl by výrazněji zasahovat do její konstrukce, tak aby ho bylo možno naistalovat na již vyrobené helikoptéry různých typů. Důvodem pro hledání takového zdroje je snaha o omezení množství kabeláže instalované na vrtulníku a zajištění autonomního napájení čidel systému HUMS. Protože jde o aplikaci v leteckém průmyslu, jsou tak kladeny zvýšené nároky na spolehlivost, ale také na rozměry a hmotnost tohoto zdroje.

Výstupem práce bude funkční experimentální vzorek generátoru s výkonovou elektronikou, na kterém bude možno demonstrovat dosažení zadaných parametrů a návrh možných úprav pro konstrukci a výrobu finálního produktu.

3. HUMS

3.1. Definice

Existuje několik různých popisů a definic toho, co je HUMS a také toho, co se za něj už považovat nedá. Samotný akronym HUMS je interpretován jako Healthly and Usage Monitoring System, tedy jako systém na sledování stavu a použití daného mechanismu. Nejintuitivnější definice vychází právě z tohoto názvu [01]:

Health

Je měřítkem celkové provozuschopnosti mechanismu. Je založeno na výsledcích aktuálního měření stejně tak jako na vyhodnocení trendu z předchozích měření.

Usage

Udává, ve které části svého životního cyklu se nachází část mechanismu s omezenou životností a zároveň pomáhá určit vhodnou chvíli pro provedení generální opravy hlavních částí mechanismu.

Monitoring

Popisuje, které veličiny budou zaznamenávány a nadále zpracovány.

System

Představuje celou soustavu, tedy systém skládající se ze součástí, měřících a zaznamenávacích řetězců stejně tak jako s lidmi implementovaných procesů, jehož výsledkem je dosažení cílů HUMS.

Jinou definici, vycházející z prvních implementací HUMS, předkládá Ministerstvo obrany Velké Británie:

„Smyslem HUMS je zlepšování bezpečnosti létání, dostupnosti vrtulového stroje, údržby, schopnosti dokončit misi a snižování nákladů na provoz stroje. K plnému dosažení a zhodnocení přínosů HUMS by měla být údržba rotorových strojů sladěna s výsledky tohoto systému.“ [08]

3.2. Vývoj

Předchůdci systému HUMS se začali objevovat v šedesátých letech dvacátého století. Pro nové velkokapacitní typy dopravních letadel byl státními orgány vyžadován monitoring a následné zaznamenání různých parametrů a informací v průběhu letu a to tak aby záznamy přežily i případnou havárii letadla (tzv. černé skříňky). Brzy po zavedení těchto systému se jejich výstupy začaly využívat i při údržbě letadel. Takto vznikly systémy Aircraft Integrated Data System (AIDS) a následně Aircraft Condition Monitoring System and Aircraft DataAcquisition System (ACMWADAS), které je možno považovat za předchůdce HUMS. Jak napovídá definice Britského Ministerstva obrany, tak systémy HUMS jako takové se prvně začaly používat na vrtulnících a to především v oblasti Severního moře.

Nepřívetivé povětrnostní podmínky spolu se širokým využitím vrtulníkové dopravy v této oblasti vedly k vysokým nákladům na údržbu a nehodám. Po obzvlášť tragické nehodě v roce 1982 [01] byla ustanovena vyšetřovací komise. V jejím konečném vyjádření se objevil jasný požadavek na vytvoření další komise složené s akademiky, průmyslových a státních odborníků a úředníků, která by jasně definovala, které parametry při provozu vrtulníku a jeho údržbě jsou kritické, jak se budou měřit a jak bude nakládáno s výstupy měření. [17] Z popudu tohoto prohlášení vznikla Helicopter

Health Monitoring Advisory Group (HHMAG), tedy skupina pro poradenství pro kontrolu stavu vrtulníků.

První komerční nasazení systému HUMS v Severním moři se datuje do roku 1991. Statistiky dokazují rapidní zvýšení bezpečnosti letecké dopravy v této oblasti stejně jako snížení neletového času jednotlivých strojů a snížení nákladů. Tyto faktory vedly k celosvětovému rozšíření HUMS a k podpoře dalšího vývoje a to i přesto, že počáteční náklady na instalaci a zavedení systému HUMS jsou značné. Toto plyne z faktu, že pro správné fungování HUMS není zapotřebí jen instalace hardware, ale především změny v postupech údržby a v dalších standardních procedurách, stejně tak jako přeškolení personálu letové obsluhy. V dnešní době má prakticky každý létající dopravní prostředek zabudovanou nějakou formu systému HUMS, i když je často překrytá marketingovými názvy.

Přes veškerý pokrok a snahu bývají výsledky HUMS diskutabilní. Toto se zdá být způsobeno především představou, že HUMS je pouze jedna z dalších komponent letadla, která se do něj zabuduje a začne přinášet benefity. Jak by mohlo být patrné z předešlých odstavců, tak tomu tak není. HUMS by ideálně měl být systém, který bude zastřešovat jak všechny sub systémy zapojené do provozu vrtulníku, samotný stroj a jeho vybavení, posádku a pozemní personál, stejně tak všechny postupy které jsou využívány při údržbě a každodenním provozu. Nepochopení tohoto principu vede často k situaci, kdy HUMS tzv. Neškodí ani nepomáhá.

V dnešní době je hnací silou vývoje HUMS zvýšené používání kompozitních materiálů v letectví. Téměř polovina nosné konstrukce moderních letadel a vrtulníků je tvořena kompozitními materiály. [12] Ty vynikají především svou pevností při zachování velmi nízké hmotnosti. Na druhou stranu panují obavy o stabilitu a dlouhodobou životnost těchto materiálů, což způsobuje požadavky na jejich zvýšenou kontrolu.

Další věcí, na kterou se zaměřuje soudobý vývoj HUMS technologií je minimalizace hmotnosti a ceny těchto systému a s tím úzce související snížení množství používané kabeláže. [19] Tohoto cíle by mělo být dosaženo využitím bezdrátových technologií a také napájení pomocí lokálních druhotných zdrojů energie - energy harvesting.

4. Možnosti napájení

Pro napájení HUMS se nabízí několik různých způsobů získávání elektrické energie. Tyto zdroje mohou být rozděleny do dvou základních skupin. Jednou jsou klasické rotační generátory pracující na principu elektromagnetické přeměny a druhou energy harvestory využívající i jiné způsoby získávání elektrické energie.

4.1. Rotační generátor

Rotační generátory fungují na principu elektromagnetické přeměny. Ta je nejpoužívanějším a nejstarším jevem využívaným k výrobě elektrické energie již od jejího objevení v roce 1831. V tomto roce Michael Faraday objevil, že při průchodu závitů cívky magnetickým polem dochází k vytvoření elektrického potenciálu na jeho koncích. Tento jev je popsán prvním Faradayovým zákonem, který říká, že generované napětí je přímo úměrné rychlosti změny magnetického pole. [07] Můžeme tedy psát:

$$U = \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Kde ϕ je magnetický tok a U je napětí generované na koncích vodiče. Většina strojů pro elektromagnetickou přeměnu využívá cívky o více než jednom závitě. V tomto případě je vztah potřeba upravit do tvaru:

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Celkové indukované napětí U je přímo úměrné změně celkového magnetického toku Φ nebo-li N násobku napětí indukovaného na jednom závitě, kde N je celkový počet závitů v magnetickém poli. Pro indukci napětí na jednom závitě je v tomto případě uvažováno s průměrným magnetickým tokem.

Magnetický tok je definován jako:

$$\phi = \int B \, dA \quad (3)$$

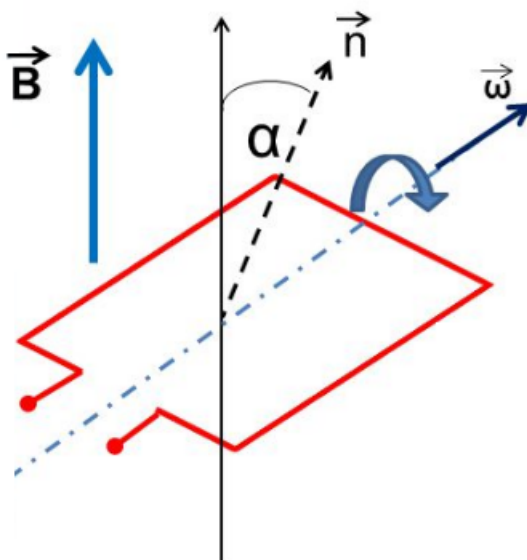
Kde B je normálová magnetická indukce k ploše závitu A . Pro více závitů se vztah upravuje obdobně jako vztah pro indukované napětí:

$$\Phi = \sum_{i=0}^N \int B \, dA \quad (4)$$

Tedy jako suma toků na jednotlivých závitěch cívky. Za předpokladu, že magnetická indukce je konstantní, můžeme vztah dále zjednodušit do tvaru:

$$\Phi = NBA \sin(\alpha) \quad (5)$$

Přičemž člen $\sin(\alpha)$ je sinem úhlu definovaného normálou na plochu závitu n a směrem magnetické indukce. Situace je znázorněná na obrázku Obr. 1



Obr. 1 Schéma závitu cívky v magnetickém poli

Pro indukované napětí při průchodu cívky magnetickým polem pak platí:

$$U = N \frac{dB}{dt} A \sin(\alpha) \quad (6)$$

4.2. Energy harvesting

Doslovně přeloženo „Sklízení energie“ je relativně mladý obor, který se zabývá získáváním zbytkové energie z okolí. Je založen na tom, že energie se nachází všude kolem nás. Motory, chůze, přepnutí vypínače atd. to vše jsou věci a děje, které jsou všední součástí našeho života a vnímáme je jako něco samozřejmého, co slouží k předem danému účelu.

Ale je známo, že energie nikdy nepřechází mezi svými formami beze ztrát a právě těchto ztrát využívá energy harvesting. Ať už jde o motor nebo lidskou chůzi, vždy dojde k disipaci určité části energie a právě tato část může být využita energy harvestorem.

Podle typu energie, která má být „sklízena“ dochází k využití různých fyzikálních jevů a jejich rozdílným aplikacím. Dále budou představeny jevy, které by mohly mít potenciál při řešení daného problému.

4.2.1. Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev byl poprvé pozorován bratry Couriery v roce 1880, i když teoreticky byl předpovězen dříve. Nejdříve byl ověřen při stlačování krystalu tulmarilínu a poté i křemene. K praktickému využití však došlo až s první světovou válkou, kdy byly piezoelektrické materiály využity v sonaru. Další rozvoj přišel s druhou světovou válkou a spočíval především v objevení syntetických materiálů s mnohem lepšími piezoelektrickými vlastnostmi. V dnešní době je masově používána piezokeramika, jíž se myslí tuhé roztoky převážně složené z PbZrO_3 (PZ) a PbTiO_3 (PT), proto jsou piezokeramiky často nazývány PZT. Alternativou k použití PZT jsou piezoelektrické polymery. Jde o polymery, které v sobě kombinují amorfni a krystalickou strukturu. Nejvýraznějším zástupcem je polyvinilidenefluorid (PVDF).

Ať už se jedná o piezoelektrické polymery nebo o keramiku, k vytvoření těchto materiálů je vždy potřeba silné magnetické pole. Toto pole způsobí polarizaci krystalové mřížky před ztuhnutím materiálu a tím pádem výrazné piezoelektrické vlastnosti v určitém směru. Důsledkem tohoto uspořádání jsou také anizotropní mechanické vlastnosti piezomateriálů. Díky anizotropnosti je nutné materiálové vlastnosti uvádět s informací o směru, pro který jsou platné. [03] Piezoelektrický materiál je popsán piezoelektrickou nábojovou a napět'ovou konstantou. Nábojová konstanta popisuje velikost elektrického náboje, který vznikne při mechanickém zatížení nebo také velikost napětí při působení elektrického náboje:

$$d = k\sqrt{\varepsilon^T s^E} \quad (7)$$

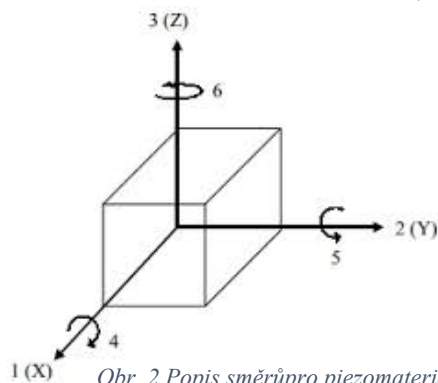
ε^T je permitivita daného materiálu při konstantním zatížení, s^E je hodnota elastické poddajnosti při konstantním elektrickém poli, což je vlastně obrácená hodnota Youngova modulu pružnosti. Účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou nebo, v opačném případě elektrické energie, na mechanickou je dána takzvaným piezoelektrickým Coupling faktorem k . Tento faktor závisí nejen na tvaru a rozměrech piezomateriálu, ale i na jeho vlastní frekvenci a frekvenci buzení.

Pomocí piezoelektrické nábojové konstanty je vyjádřena piezoelektrická napět'ová konstanta:

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T} \quad (8)$$

Tato konstanta popisuje jak velké elektrické pole bude vygenerováno piezomateriálem při jednotkovém mechanickém zatížení anebo při reverzním ději jak velké bude přetvoření vyvolané vnějším elektrickým polem.

Jak již bylo řečeno, piezomateriály jsou materiály anizotropními a proto je velmi důležitá prostorová konfigurace zatížení a odběru elektrické energie. Popisu směrů se využívá směrů a rotací pravotočivého kartézského souřadnicového systému XYZ. Určení směrů je popsáno v několika normách a standardech, například: IEEE/ANSI 176 [10]



Obr. 2 Popis směrů pro piezomateriál

4.2.2. Seebeckův jev- Termoelektrický článek

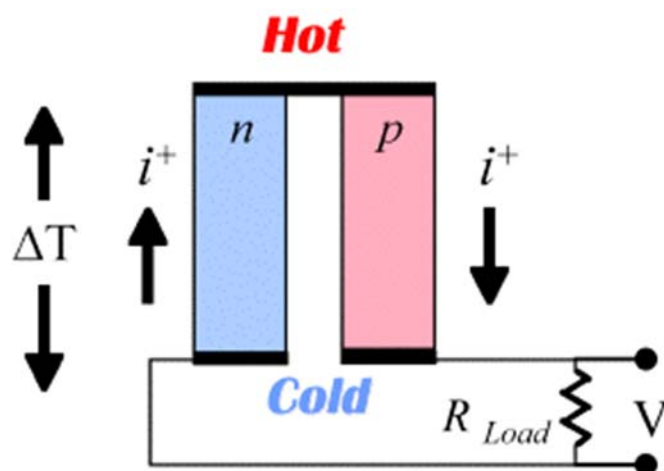
Seebeckův jev je protikladem jevu Peltierovému. V obou případech se jedná o přeměnu mezi tepelnou a elektrickou energií. Peltierův jev byl objeven francouzským fyzikem Jeanem C. Peltierem v roce 1834. Peltier zjistil, že pokud proud protéká sériově zapojenými vodiči z různých materiálů, tak se jedna strana tohoto spojení ochlazuje a druhá otepluje. Z hlediska energy harvestingu je mnohem zajímavější jev Seebeckův. Ten byl spíše náhodou objeven německým fyzikem Thomasem J. Seebeckem v roce 1821. Seebeck zjistil, že mezi konci kovové tyče se vytvoří elektrické napětí, pokud na této tyči bude existovat teplotní gradient.

Tento jev může vzniknout, protože nosiče náboje v kovech a polovodičích mají prakticky stejnou volnost pohybu jako molekuly plynů. Při svém prostupu materiálem však nenesou pouze náboj, ale i teplo. [02] Po vzniku teplotního gradientu se volné nosiče náboje přesouvají z teplejší na chladnější stranu materiálu. To způsobí změnu v rozložení náboje a následně kladné nebo záporné nabití chladnějšího konce v závislosti na tom, jestli jsou nosiči náboje elektrony nebo díry. Vznik elektrostatického náboje je ukončen dosažením rovnováhy mezi difusními silami a odpudivou silou vzniklého náboje. Velikost vzniklého napětí je přímo úměrná velikosti teplotního rozdílu:

$$U = \alpha \Delta T \quad (9)$$

Kde konstantou úměrnosti α je Seebeckův koeficient a ΔT je teplotní rozdíl mezi teplým a studeným koncem materiálu. Velikost proudu je pak dána velikostí tepelného toku procházejícího materiálem, Tím je jasně dáno, že studený konec musí být dobře chlazen.

Praktičtější než využití pouze jednoho materiálu je použití dvou různých typů materiálů. Zpravidla polovodičů typu P a N. Studené konce vodičů jsou připojeny na zátěž a teplé konce jsou vodivě spojeny. [9]



Obr. 3 Schéma termoelektrického článku

Pro takovou dvojice pak platí:

$$U = \alpha \Delta T - IR_c \quad (10)$$

Rovnice napětí je nyní oproti rovnici (9) ponížena o ztráty. Tyto ztráty vznikají při průchodu proudu přes odpor jednotlivých vodivých součástí. Termoelektrický generátor se tedy chová jako zdroj napětí s vnitřním odporem. A vnitřní ztráty jsou nejmenší,

pokud je odpor zátěže přibližně stejně velký jako vnitřní odpor generátoru. Celkový vnitřní odpor se dá zjednodušeně vyjádřit jako:

$$R_C = \sum_{i=0}^n R_i = \sum_{i=0}^n \rho_i \frac{l_i}{S_i} \quad (11)$$

Tedy jako součet odporů každého členu. l_i je délka daného členu, S_i je průřezová plocha a ρ_i je měrný elektrický odpor. Takto je však vyjádřen odpor při pokojové teplotě, pokud má být výpočet přesný, tak by mělo být, obzvlášť pro teplou stranu dvojice, uvažováno se zvýšením odporu dle vztahu [18]:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (12)$$

Hodnota teplotního součinitele odporu α je tabelována a lze ji dohledat pro jednotlivé materiály. Zařazení změny odporu na teplotě do výpočtu pak záleží na konkrétní aplikaci a nelze uvést žádné jednotné pravidlo kdy tak učinit.

Elektrický výkon tepelného generátoru je popsán jako:

$$P = UI = RU^2 = \eta Q \approx \Delta T^2 \frac{\alpha^2 S}{\rho l} \quad (13)$$

Účinnost generování elektrické energie pak v zásadě závisí na dvou faktorech. Prvním je Carnotova účinnost, jelikož podle zákonů termomechaniky žádný tepelný stroj nemůže překročit právě tuto hranici a druhým je takzvaný Merit. Merit je vyjádření termoelektrické účinnosti daného materiálu:

$$zT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa} \quad (14)$$

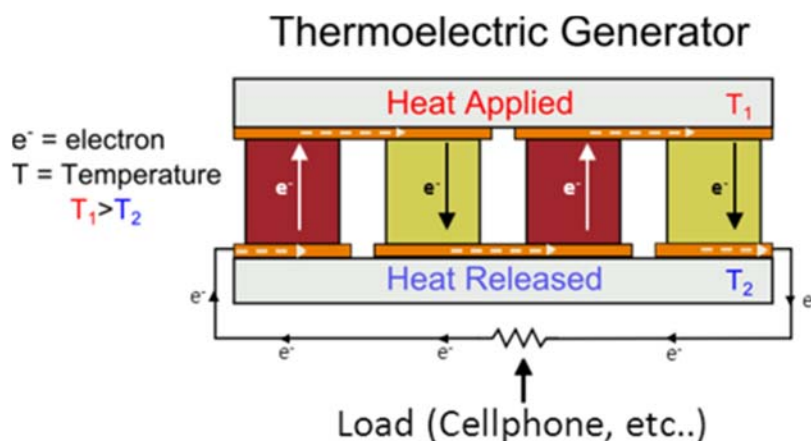
Termoelektrická účinnost tedy roste s rostoucím Seebeckovým koeficientem a naopak klesá s rostoucím elektrickým odporem, protože se zvyšují ztráty Joulovým teplem a s rostoucí tepelnou vodivostí, protože ta zvyšuje přímé tepelné ztráty.

Pro malé rozdíly teplot a tedy pro většinu aplikací při energy harvesting se pak celková účinnost vyjadřuje jako:

$$\eta_{max} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+zT}-1}{\sqrt{1+zT}+1} \quad (15)$$

První zlomek vyjadřuje Carnotovu účinnost, tedy teplotní rozdíl ku teplotě horkého konce a druhý pak materiálové charakteristiky zohledněné v termoelektrické účinnosti.

Pro praktické využití se jednotlivé přechody spojují do bloků a to tak, že elektricky jsou zapojeny sériově a tepelně paralelně. [09]



Obr. 4 Schéma termoelektrického generátoru

4.2.3. Elektromagnetická přeměna

Elektromagnetická přeměna je využívána k získávání energie z mechanických vibrací. Při popisu funkce generátoru je předpokládáno, že pohyb mezi cívkou a generátorem je realizován jen v jednom směru. V cívce se při průchodu magnetickým polem naindukuje elektrické napětí, které se při splnění předešlého předpokladu pohybu jen v jednom směru dá popsat jako:

$$U = \frac{d\Phi}{dx} \frac{dx}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (16)$$

Po připojení k zátěži začne cívkou téct proud, který vytvoří protichůdné magnetické pole. Velikost síly, která díky tomuto poli bude působit proti směru mechanického pohybu, udává, kolik mechanické energie bude třeba na její překonání, a tedy kolik mechanické energie bude přeměněno na energii elektrickou. Velikost síly je přímo úměrná velikosti proudu v cívce a rychlosti pohybu mezi cívkou a magnety:

$$F_e = b_e \frac{dx}{dt} \quad (17)$$

Maximalizací elektromagnetického tlumení b_e dosáhneme i maximalizace výkonu, protože výsledný výkon je dán jako:

$$P = F_e \frac{dx}{dt} \quad (18)$$

Elektromagnetická síla může být také popsána jako výkon na odporu zátěže R_z , vnitřním odporu cívky R_i a její indukčnosti L jako:

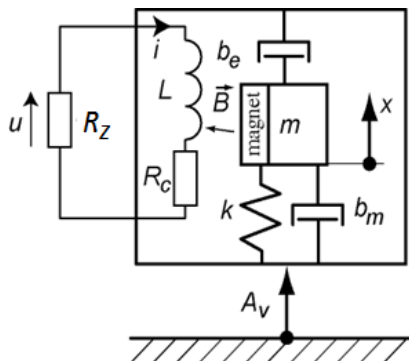
$$F_e \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{R_z + R_i + j\omega L} \quad (19)$$

Dosazením rovnice (16) vznikne vztah vyjadřující elektromagnetické tlumení jako:

$$b_e = \frac{1}{R_z + R_i + j\omega L} \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)^2 \quad (20)$$

Z rovnice je patrné, že elektromagnetické tlumení roste s klesajícím odporem cívky a zvětšujícím se gradientem magnetického toku. Gradient magnetického toku silně závisí na vlastnostech použitých materiálů a zvolené geometrii. Při frekvencích vyšších než 1 kHz se zvyšuje významnost indukčnosti cívky v celkové bilanci.

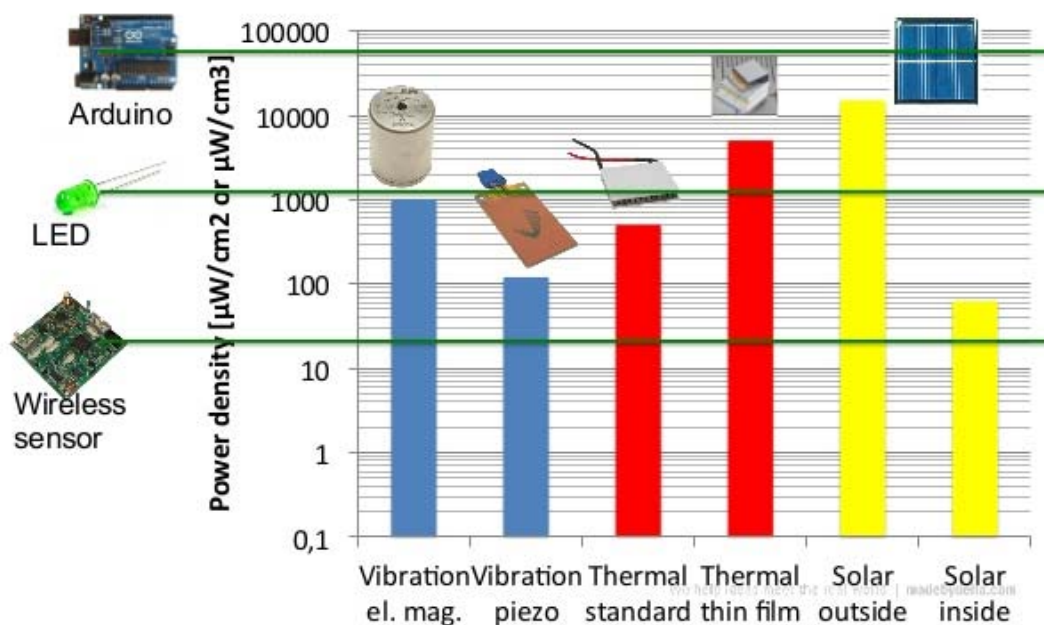
Uvedené rovnice řeší pouze elektrickou část vibračního generátoru. Pro použitelný energy harvester je důležité skloubit elektrickou částí návrh s návrhem rezonanční frekvence oscilátoru pro konkrétní aplikaci. Komplexnost celého problému je patrná se schématu na Obr. 5



Obr. 5 Komplexní schéma vibračního generátoru

5. Vhodný typ zdroje

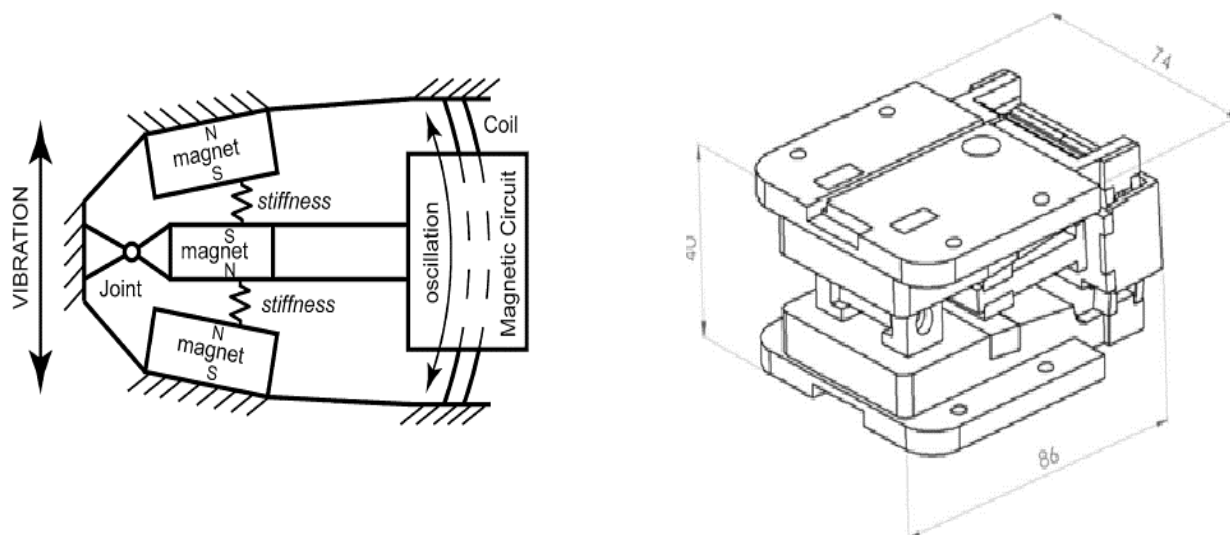
V předchozích odstavcích byly stručně představeny jevy využitelné pro generování elektrické energie. Pro zhodnocení využitelnosti jednotlivých jevů je důležitým faktorem jejich schopnost dodat požadované množství elektrické energie při zachování „rozumných“ rozměrů a hmotnosti zdroje. Energetická vydatnost jednotlivých energy harvesterů se liší podle konkrétní konstrukce a aplikace, ale pro obecné porovnání postačí průměrně dosahované hodnoty i přesto, že se liší podle použitého zdroje informací.



Obr. 6 Srovnání různých typů energy harvestingů

Obr. 6 demonstruje standardní výkonovou hustotu pro různé zdroje energie a pro srovnání zobrazuje také spotřebu některých běžně používaných zařízení. Z tohoto srovnání se nadějnými kandidáty pro získávání elektrické energie zdají být termální články na bázi tenkých vrstev a také vibrační generátory. Fotovoltaický jev je pro danou aplikaci nevhodný a to zejména pro svoji závislost na osvětlení, pro kterou se nehodí jako stálý a stabilní zdroj elektrické energie v jakoukoliv denní či noční dobu nezávisle na povětrnostních podmínkách.

Dalším kritériem je dostupnost dané formy energie v místě aplikace. Do ocasní oblasti vrtulníku se zcela jistě přenášejí vibrace vybuzečné motorem a rotujícími vrtulemi. Další vibrace jsou pak způsobeny aerodynamickými jevy. Ty se ovšem pro energy harvesting příliš nehodí pro svou nahodilost. Vibrační generátor již byl úspěšně využit pro podobnou aplikaci ve vrtulníku. Tento generátor měl při rozměrech 40x74x86 a hmotnosti 285 g maximální výkon 90 mW. Toho bylo dosaženo především využitím inovativního přístupu ke konstrukci pružného elementu, který byl vytvořen magnetickým polem. [14]



Obr. 7 Schematické znázornění magnetických pružin a rozměry skutečného generátoru

Nevýhodou získávání energie z vibrací je také přímý vztah mezi odebranou energií a tlumením samotných vibrací. Nemůžeme tedy odebírat vysoké výkony se součástí s malou hmotností i přesto, že tyto součástky při chvění dosahují vysokých hodnot zrychlení (typicky plechové kryty). [16]

Využitelný tepelný gradient pro použití termočlánků by mohl být v ložiskovém systému ocasní vrtule, jenže nebude přístupný bez větších zásahů do konstrukce ocasní části. Tyto zásahy by se pravděpodobně výrazně lišily podle typu stroje, na který by měl být energy harvester instalován, a proto tento zdroj elektrické energie není příliš vhodný.

Dalším potenciálním zdrojem energie je rotující hřídel ocasní vrtule. Tato hřídel má po uvedení do provozu konstantní rychlost otáčení 3000 ot.min^{-1} a musí být bezpodmínečně v provozu po celou dobu letu.

Pro danou aplikaci se jako jednoznačně nejlepší možnost jeví umístění klasického rotačního generátoru na hřídel ocasní vrtule. Díky bezpodmínečnému použití vrtule pro každý let a konstantním otáčkám bude zajištěn stabilní přísun elektrické energie. Navíc je konstrukce generátoru spolehlivá, jelikož neobsahuje žádné pružné elementy, a zároveň relativně prověřená. Především z těchto důvodů bylo zvoleno dané řešení.

6. Magnetické vlastnosti materiálů

Pro velikost magnetické indukce jsou jedním z určujících faktorů magnety. Obecnou vlastností určující magnetickou vodivost jakéhokoliv materiálu je jeho permeabilita. Permeabilita se značí μ_0 , pokud jde o permeabilitu vakua, μ pokud jde o permeabilitu daného materiálu a μ_r pokud jde o permeabilitu relativní, tedy bezrozměrnou veličinu udávající kolikrát je daný materiál magneticky prostupnější, než vakuum.

Podle hodnoty permeability se materiály dělí na:

1. Diamagnetické materiály ($\mu_r < 1$)

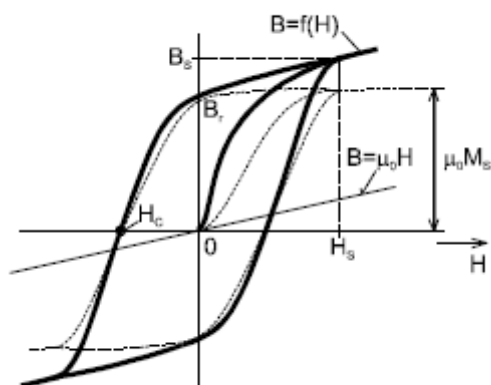
Tyto materiály oslabují vnější magnetické pole. Mezi diamagnetické materiály patří měď, olovo, voda aj.

2. Paramagnetické materiály ($\mu_r > 1$)

Jsou opakem materiálů diamagnetických, tím pádem vnější magnetické pole slabě zesilují. Paramagnetickými materiály jsou například kyslík, hliník, titan, chrom hořčík aj.

3. Feromagnetické materiály ($\mu_r \gg 1$)

Tyto materiály výrazně zesilují magnetické pole. To je dáno tím, že obsahují mnoho neorientovaných magnetických dipólů, které se ale působením vnějšího magnetického pole uspořádají a tím zesílí jeho účinky. Tato vlastnost se projevuje jen do určité teploty. Teplota, při které se z feromagnetických látek stanou paramagnetické a ty, které byly zmagnetovány, se odmagnetizují se nazývá Curieova teplota. Každý materiál má svou vlastní hodnotu této teploty. Zvláštním druhem feromagnetických materiálů jsou látky ferimagnetické. Magnetické momenty jednotlivých atomů těchto látek jsou opačně orientované, ale nestejně velké. To způsobuje vysoké hodnoty permeability a také vysoké hodnoty měrného elektrického odporu ve srovnání s feromagnetickými materiály. Nevýhodou ferimagnetických látek je relativně nízká Curieova teplota. Ferimagnetické materiály jsou většinou vyráběny práškovou technologií ze vzácných kovů a oxidu železitého.



Obr. 8 Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu

Feromagnetické materiály se nadále dělí dle tvaru své hysterezní smyčky, tedy závislosti magnetické indukce na změně magnetické intenzity (Obr. 8), na materiály takzvaně měkké a tvrdé. Materiály měkké mají úzkou hysterezní smyčku a po skončení

působení vnějšího magnetického pole ztrácí své magnetické vlastnosti, tím pádem dobře kopírují změny magnetického pole. Nejčastěji se používají na jádra cívek, transformátorů a v točivých strojích. [04]

Oproti tomu materiály magneticky tvrdé mají širokou hysterezní smyčku, a proto po vyjmutí z magnetického pole zůstávají zmagnetovány. To je doslova předurčuje jako vhodné kandidáty na materiály pro výrobu permanentních magnetů.

6.1. Permanentní magnety

Průsečíky BH křivky s jejími osami udávají hodnotu koercivity H_c a remanence B_r . Koercivita udává velikost intenzity magnetického pole působící proti směru spontánní magnetizace v případě, kdy je celková magnetická indukce v materiálu rovna nule. Tím pádem udává odolnost materiálu proti odsmagnetování.

Remanence je ustálená hodnota magnetické indukce po vyjmutí materiálu z magnetického pole.

Pro srovnávání trvalých magnetů je také využívána hodnota energetického součinu. Energetickým součinem se myslí součin B a H pro určitý bod na BH křivce v její odsmagnetovací části (druhý kvadrant), tato hodnota vyjadřuje dvojnásobek hustoty energie v materiálu. Jinak řečeno materiál s vyšší hodnotou energetického součinu je schopný ve stejném obvodu vygenerovat větší magnetickou indukci, než materiál s nižší hodnotou energetického součinu o stejném objemu.

Nejsilnější permanentní magnety se v dnešní době vyrábějí ze slitiny neodymu, železa a bóru. Tyto magnety vynikají vysokým energetickým součinitelem a dobrou koercivitou, ale jsou velmi náchylné ke korozi, křehké a mají nízkou Curieovu teplotu (od 80 do 230 °C).

Před nástupem neodymových magnetů byly za nejsilnější považovány magnety samarium – kobaltové. Ty mají podobné vlastnosti, ale jsou chemicky odolnější a jejich Curieova teplota je o něco vyšší. Na druhou stranu jsou velmi křehké.

Pro aplikace vyžadující vyšší teplotní odolnost se používají magnety vyrobené ze slitiny hliníku, niklu a kobaltu. Ty mají maximální pracovní teploty okolo 525 °C a velmi dobře snášejí kyseliny a louhy.

Nejrozšířenějším druhem magnetů jsou magnety feritové. Ty jsou vyrobeny asi z 85% oxidu železitého a 15% oxidu barnatého nebo oxidu strontnatého. Vzhledem ke keramické bázi jsou tyto magnety křehké a špatně snášejí ohybové síly. Chemicky jsou relativně stálé, i když reagují se silnými kyselinami. Jedná se o nejmasověji vyráběné a tedy nejlevnější permanentní magnety dostupné ve velkém množství tvarových modifikací.

7. Rotační generátor

Jako nejlepší zdroj energie pro dané zadání byl zvolen rotační generátor. Ten bude dodávat střídavé napětí, které bude následně usměrněno.

Oproti klasické konstrukci se stacionárními magnety byl zvolen opačný přístup. Na hřídel ocasní vrtule bude navlečena převlečka s rovnoměrně umístěnými permanentními magnety. Tyto se budou otáčet spolu s hřídelí 3000 ot.min⁻¹. Nad nimi pak bude připevněna pouze jedna cívka, ve které se bude indukovat napětí. Osa cívky bude kolmá na osu hřídele a funkční bude pouze jedna strana závitu tak, aby se zabránilo indukci napětí s opačnou orientací. Platí, že čím vyšší počet magnetů na hřídeli, tím „hladší“ průběh usměrněného napětí a menší nároky na filtraci. Dále pak, že sudý počet magnetů teoreticky znamená nezměněnou vyváženost hřídele a tedy nízké přidané vibrace. Přístup s rotujícími magnety a stacionární cívkou byl zvolen kvůli jednodušší konstrukci a s ní související snadnější montáži a údržbě.

7.1. Postup návrhu generátoru

Jak bylo zmíněno v kapitole Elektromechanická přeměna, při průchodu závitu homogenním magnetickým polem se na jeho koncích indukuje napětí podle vztahu:

$$U = N \frac{dB}{dt} A \sin(\alpha) \quad (21)$$

Změna elektromagnetické intenzity je v daném případě dána obvodovou rychlostí magnetů na hřídeli. Ta je vyjádřena ze známých vztahů a otáček hřídele:

$$v = \omega r \quad (22)$$

$$\omega = 2\pi n \quad (23)$$

$$v = 2\pi n \frac{D}{2} \quad (24)$$

Dosažením rovnice (23) do rovnice (22) a následným vyčíslením dostaneme obvodovou rychlost magnetů. Za D je dosazován průměr kružnice tečné na spodní hrany všech magnetů

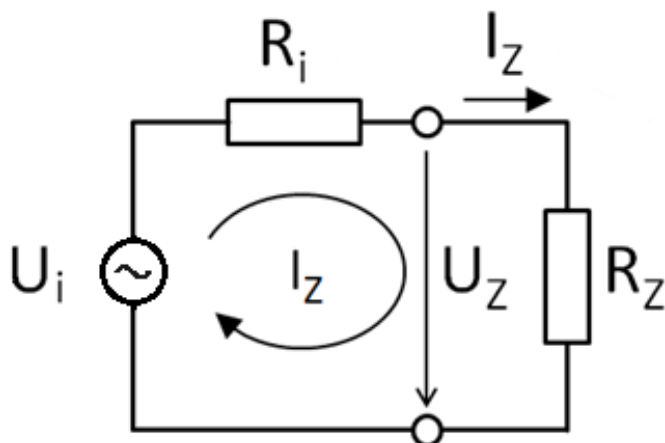
Plocha A je degradována pouze na funkční délku závitu - l a ta zůstává konstantní.

Výstupní napětí u zdroje je jedním ze vstupních parametrů, proto pro počet závitů cívky lze psát:

$$N = \frac{U}{vBl} \quad (25)$$

Po zaokrouhlení na celé číslo dostáváme počet závitů potřebných k dosažení daného napětí.

Lze předpokládat, že generátor se bude chovat jako ideální zdroj napětí se sériově zapojeným vnitřním odporem.



Obr. 9 Schéma ideálního zdroje napětí se sériově zapojeným vnitřním odporem a zátěží

Protože proud protékající zátěží protéká také sériově zapojeným vnitřním odporem, můžeme podle Ohmova zákona psát:

$$I_Z = \frac{U_i}{R_i + R_Z} \quad (26)$$

Napětí na zátěži je tedy rovno:

$$U_Z = \frac{R_Z U_i}{R_i + R_Z} \quad (27)$$

Pro výkon na zátěži pak platí:

$$P = U_Z I = R_Z \cdot I_Z^2 = \frac{U_Z^2}{R_Z} \quad (28)$$

Dosazením z rovnice (26) vznikne:

$$\begin{aligned} P &= R_Z \left(\frac{U_i}{R_i + R_Z} \right)^2 = U_i^2 \frac{R_Z \frac{1}{R_i^2}}{(R_i + R_Z)^2 \frac{1}{R_i^2}} = \frac{U_i^2}{R_i} \frac{R_Z \frac{1}{R_i}}{(R_i + R_Z)^2 \frac{1}{R_i^2}} \\ &= U_i I_k \frac{\frac{R_Z}{R_i}}{(R_i^2 + 2R_Z R_i + R_Z^2) \frac{1}{R_i^2}} = U_i I_k \frac{\frac{R_Z}{R_i}}{1 + 2\frac{R_Z}{R_i} + \frac{R_Z^2}{R_i^2}} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\rightarrow P_Z = U_i I_k \frac{\frac{R_Z}{R_i}}{\left(1 + \frac{R_Z}{R_i}\right)^2} \quad (30)$$

Z tohoto vztahu plyne, že výkon dodávaný na zátěž je největší pokud se $R_Z = R_i$, pro tento stav platí:

$$P_Z = U_i I_k \frac{1}{4} \quad (31)$$

I_k je proud zdroje nakrátko, tedy proud, který prochází zdrojem při zkratovaných svorkách.

Za vnitřní odpor zdroje je považován odpor cívky, který je popsán vztahem:

$$R_{iCu} = N \rho_{Cu} \frac{l}{S} \quad (32)$$

Kde Nl udává délku drátu navinutého na cívce, S je plocha průřezu drátu a ρ_{Cu} je měrný elektrický odpor mědi.

Průřez drátu se odvíjí od předpokládaného proudu, který jím bude protékat, velikosti cívky a od prostředí ve kterém bude cívka pracovat, jinak řečeno od jejího chlazení:

$$D_{Cu} = \sqrt{\frac{I_z}{J}} \cdot 10^{-3} \quad (33)$$

Proudová hustota J je vyjádřena jako proud ku ploše kterou prochází a její hodnota se volí v závislosti na použití.

Nyní jsou známy všechny veličiny ze vztahu (21) kromě hodnoty magnetické indukce. Ta bude určena numericky.

7.2. Model magnetického pole

K vypočtení hodnoty magnetické indukce pro model generátoru bylo využito metody konečných prvků - konkrétně software Femm. Femm je software, který je možno stáhnout ze stránek <http://www.femm.info> a je šířen pod licencí Aladdin Free Public License. Tato licence v podstatě říká, že neexistují žádné restrikce na používání výsledků jakožto i samotného programu pro jakékoliv účely s výjimkou případu, kdy by byla přímo část zdrojového kódu programu zahrnuta do jiného komerčně použitého programu. [05] Další výhodou tohoto software je možnost jeho propojení s Matlabem a díky tomu snadná tvorba parametrického modelu.

Průběh výpočtu se dá rozdělit na několik víceméně samostatných částí:

1. Výběr úlohy

Ve Femmu je možno řešit čtyři základní typy problémů: Magnetické, Elektrostatické, Proudové a Tepelné. I přesto, že se budeme zabývat pouze prostředím pro řešení magnetických problémů, většina postupů je aplikovatelná i na zbylé úlohy

2. Tvorba modelu

Tvorba modelu obnáší, vytvoření 2D náčrtu geometrie a jeho následné „vytažení“ do prostoru a přiřazení materiálu jednotlivým plochám, popřípadě jejich propojení do okruhů (cívek). Nutno předeslat, že tvorba geometrie přímo v programu Femm je značně zdlouhavá a ne příliš přesná, jelikož všechny tvořené body se dají přichytit pouze na jakousi síť, jejíž velikost si můžeme nastavit. Alternativou je vytvoření geometrie v CAD modeláři a její import ve formátu dxf. Tato možnost již je schůdnější, ale stále je potřeba vytvořit a přiřadit jednotlivé materiály a proto se jako nejlepší možnost jeví vytvoření mfile, ve kterém se dá vytvořit kompletní řešení úlohy od zadání vstupů až po zobrazení potažmo uložení výsledků.

3. Po vytvoření samotného modelu je potřeba vytvořit výpočtovou síť, Femm tvoří síť automaticky z trojúhelníkových elementů. Lze si upravit některé parametry síťování, ale tvar elementů je neměnný.

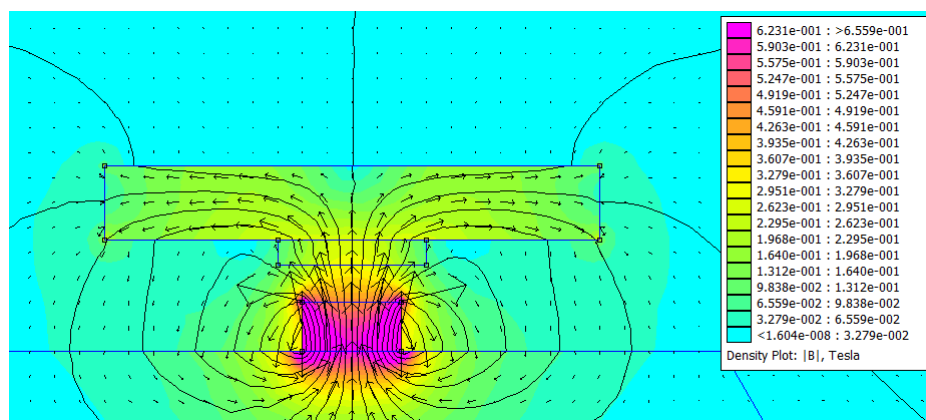
4. Výpočet řešení a vyhodnocení výsledků

Po spuštění řešiče je defaultně vytvořen soubor s řešením, která má stejný název jako model. Tento soubor je kdykoliv možné znovu otevřít a nadále s ním pracovat. Po otevření výsledkový soubor vypadá stejně jako náčrt, z kterého je vytvořen, chybí však názvy materiálů a jsou v něm zobrazeny magnetické siločáry.

Výsledky se dají interpretovat pomocí grafů s průběhem intenzity magnetického pole (H) anebo magnetické indukce (B), na průřezu určeném zadanou křivkou. U obou hodnot je možné si vybrat normálovou složku, tangentsní složku, anebo celkovou velikost vektoru dané veličiny.

Další možností je zobrazit hustotu magnetického toku, anebo intenzitu magnetického pole pomocí barevné škály.

Poslední možností vizualizace výsledků je zobrazení vektorů intenzity magnetického pole nebo magnetické indukce. V obou případech se vektory zobrazují v každém bodě mřížky vytvořené v náčrtu. Hustotu mřížky stejně jako měřítko vektorů je možno průběžně editovat. Poslední dvě možnosti je možné také kombinovat. [06]



Obr. 10 Ukázka zobrazovacích možností Femm

7.2.1. Tvorba modelu v Matlabu

Jak již bylo naznačeno, nejlepším způsobem vytvoření modelu a následného zpracování výsledků je použití mfile. Aby bylo možné používat příkazy z prostředí Femm v Matlabu je nejprve nutné v Matlabu přidat cestu k tomuto Toolboxu, to se provede pomocí série příkazů

```
addpath('c:\femm42\mfiles')  
savepath;
```

Cesta `c:\femm42\mfiles` vede do standartního umístění Toolboxu za předpokladu, že nebyla změněna při instalaci Femm. Po uložení cesty se dá s příkazy Femm pracovat tak jako s jakýmkoliv jinými příkazy v Matlabu.

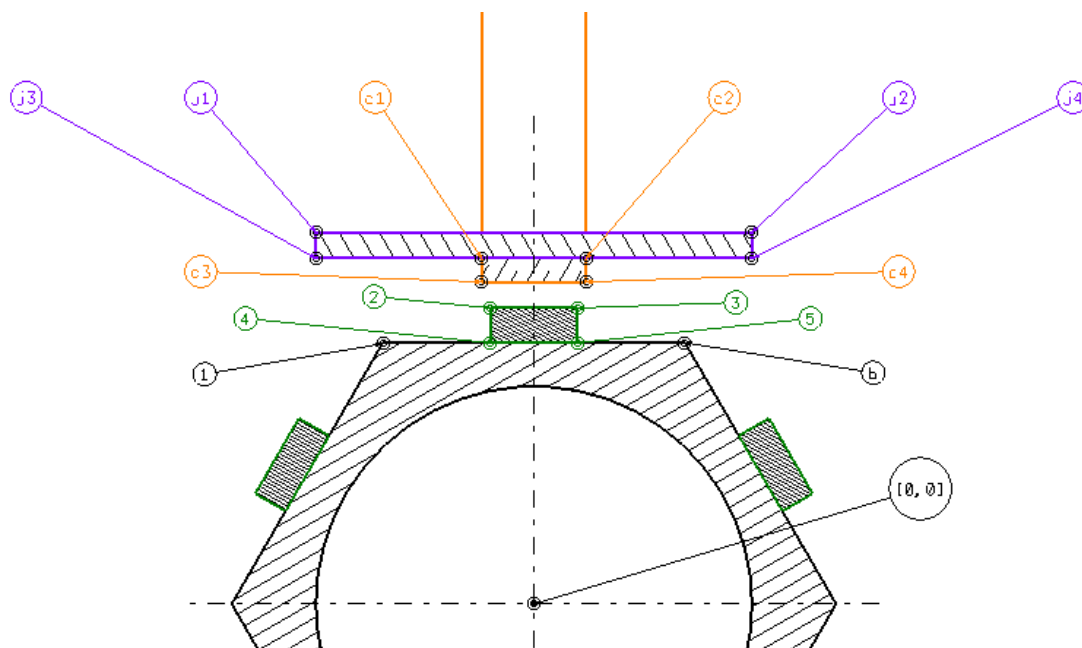
Mfile s modelem byl pro lepší přehlednost rozdělen do sekcí

1. Vstupní parametry

Do modelu vstupují rozměry zvoleného magnetu, rozměry cívky, průměr válce, na který budou usazeny magnety, rozměry „jádra“ cívky a velikost vzduchové mezery mezi magnety a cívkou.

2. Parametry modelu

Ze vstupních parametrů modelu jsou spočítány souřadnice jednotlivých bodů, které budou tvořit uzlové body 2D geometrie a také budou použity k přiřazení materiálů jednotlivým plochám.



Obr. 11 Zobrazení použitých bodů na 2D geometrii

3. Model

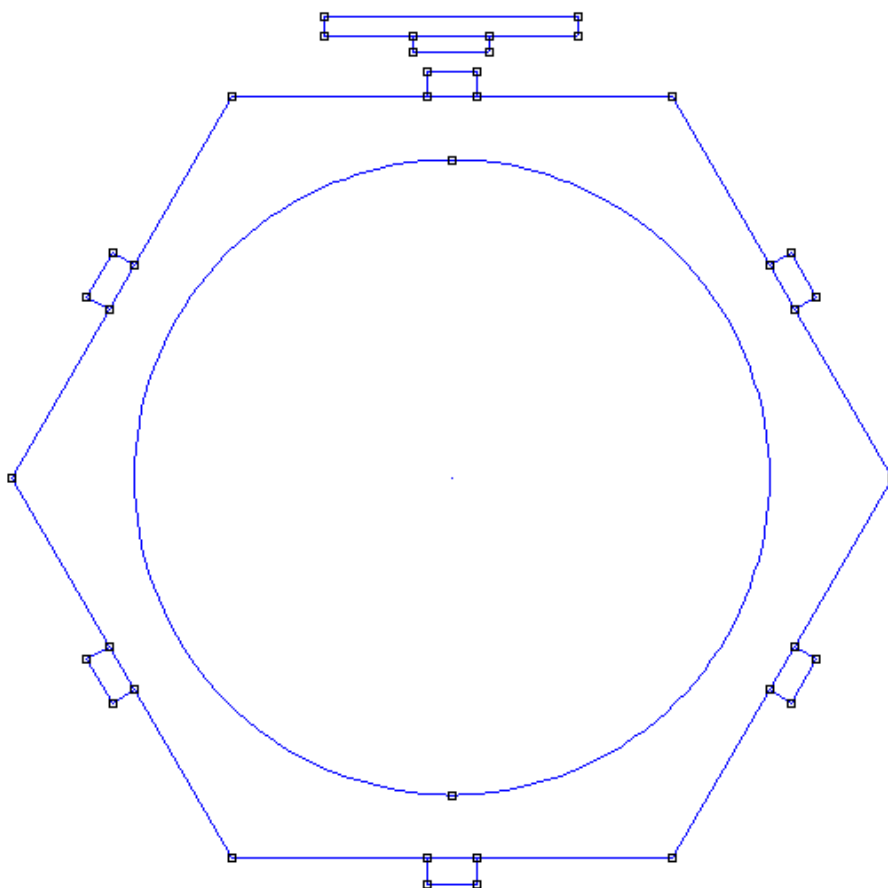
Až doposud byly používány standartní příkazy Matlabu, nyní se zaměříme na vlastní tvorbu modelu.

3.1. Obecné definice

Problém řešený v Femm je otevřen příkazem *openfemm*. Nová úloha je otevřena příkazem *newdocument(0)*, parametr 0 říká, že se jedná o magnetostatickou úlohu. Obecné parametry modelu (typ souřadného systému, jednotky, přesnost řešiče, minimální úhel sítě) se pak nadefinují příkazem *mi_probdef*. Poté budou nadefinovány materiály, které budou dále používány. Femm umožňuje definici vlastních materiálů, ale také obsahuje materiály předdefinované. Pro daný problém byly použity materiály předdefinované, konkrétně: Air, 1117 Steel, NdFeB32MGOe a měděný drát 0.2mm. Tyto materiály byly načteny z knihovny příkazem *mi_getmaterial*. U materiálu magnetu NdFeB32MGOe byla změněna koercivita pomocí příkazu *mi_modifymaterial*. Jako vnější prostředí pro daný problém byl stanoven válec vyplnění vzduchem o třicetkrát větším poloměru, než je poloměr kružnice opsané šestiúhelníku tvořenému magnety. Hranice válce jsou tvořeny dvěma oblouky pomocí příkazu *mi_drawarc*.

3.2. Tvorba geometrie

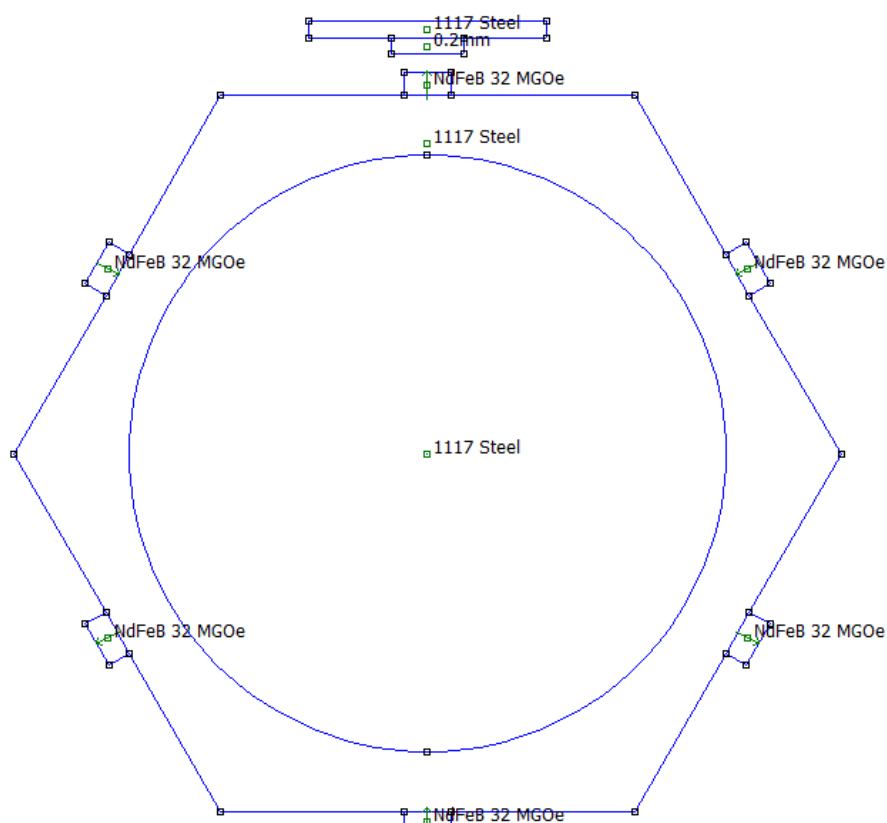
Obrys šestihranu spolu s obdélníky představující jednotlivé magnety byl vytvořen rotací a kopírováním jednoho základního elementu. Tento element může být vytvořen kombinací příkazu *mi_addnode*, který slouží k vytvoření koncových bodů úsečky a příkazu *mi_addsegment*, který tyto dva body spojí. Alternativou je použití příkazu *mi_drawline*, který vytvoří jak body, tak úsečku která je spojuje. V tomto případě jsou si oba příkazy rovny. Základní element je nejdříve natočen příkazem *mi_moverotate* a pak „rozkopírován“ příkazem *mi_copyrotate2*. Před samotným kopírováním či otáčením musí být vybrány elementy, kterých se bude tento příkaz týkat a po provedení kopírování se tyto elementy zase musí uvolnit. To je provedeno příkazy *mi_selectcircle* a *mi_clearselected*. Obdélník reprezentující aktivní část cívky a obdélník reprezentující její „jádro“ jsou vytvořeny příkazem *mi_drawrectangle*, který na základě dvou protilehlých rohů vytvoří obdélník s body v jeho vrcholech. Pro lepší představu je obdobně jako hranice vytvořena kružnice, která reprezentuje hřídel sekundární vrtule.



Obr. 12 Obrys geometrie vytvořený ve Femm

3.3. Přiřazení materiálů

Pro přiřazení materiálů je v každé ploše vytvořen jeden bod příkazem *mi_addblocklabel*, následně jsou vybrány body, které budou reprezentovat stejný materiál příkazem *mi_selectlabel*. Těmto bodům je přiřazen materiál příkazem *mi_setblockprop*. Body jsou pak uvolněny z výběru příkazem *mi_clearselected*. Tím, že vnitřní kruh i plocha mezi kružnicí a šestiúhelníkem mají přiřazený stejný materiál, dojde k tomu, že v rámci výpočtu bude uvažováno, jakoby v náčrtu žádná kružnice nebyla. Postup se liší jen pro přiřazení materiálu jednotlivým magnetům. U těch je důležité, aby byl správně zadán směr magnetizace, a proto jsou magnety rozděleny na sudé a liché a následně je label i s příslušným směrem magnetizace rozkopírován příkazem *mi_copyrotate2*



Obr. 13 Geometrie vytvořená ve Femm s přiřazenými materiály

4. Uložení a výpočet

Pro provedení výpočtu je nezbytné, aby byl model uložen. Uložení je provedeno příkazem *mi_saveas* se jménem souboru jako jediným parametrem. Příkazem *mi_analyze* je vytvořen soubor se stejným jménem jako model, ale s koncovkou *.ans* ve kterém je uloženo řešení. Řešení, které koresponduje s aktuálně otevřenou geometrií je otevřeno příkazem *mi_loadsolution*.

5. Vyhodnocení výsledku

Výstupem celé úlohy pro daný případ bude průměrná hodnota normálové magnetické indukce. Magnetická indukce bude spočtena pomocí příkazu *mi_blockintegral* a následně podělena objemem cívky, čím bude dosaženo průměrné hodnoty normálové magnetické indukce.

K určení hodnoty normálové magnetické indukce v určitých hladinách nad jádrem cívky byly vytvořeny tři sady sta x-y souřadnic bodů ležících na těchto hladinách. Krajními body všech tří sad jsou uzlové body x_{c1} a x_{c2} (viz Obr. 11), zbytek byl vytvořen příkazem *linspace*. Body y mají pro každou ze sad shodnou hodnotu rovnou $y_{j3} + 15 \text{ mm}$, $y_{j3} + 20 \text{ mm}$, $y_{j3} + 25 \text{ mm}$. Hodnota magnetické indukce ve směru x a y pro každý z těchto bodů je získána příkazem *mi_getb*. Průměrná hodnota je pak snadno určena použitím příkazu *mean*. Výsledkem je řádkový vektor o dvou členech. Prvním členem je průměrná magnetická indukce ve směru osy x = tangentská složka vektoru magnetické indukce neboli ve směru zadané úsečky. Druhým členem je průměrná hodnota ve směru osy y = normálová složka vektoru magnetické indukce a tedy hledaná hodnota.

6. Návrh generátoru

Ze zadání je známo, že generátor má poskytovat výkon 150mW a bude napájet senzorickou síť. Hřídel ocasní vrtule má 3000 ot.min⁻¹. Zadavatel po dotazu upřesnil, že průměr hřídele je 25 mm a vyhovovalo by mu, kdyby axiální rozměr generátoru byl také maximálně 25 mm.

Jak předesílá předešlá kapitola, návrh rotačního generátoru je iteračním procesem. Pro výpočet magnetické indukce musí být mimo jiné známy rozměry cívky, ale pro určení rozměrů cívky zase musí být známa hodnota magnetické indukce.

Dalšími vstupem je velikost magnetů, od které se následně odvíjí funkční délka závitu cívky a také šířka cívky. U magnetů hraje roli také materiál, ze kterého jsou vyrobeny a v neposlední řadě jejich dostupnost.

Pro prvotní návrh byly vybrány magnety VMM5UH-N35UH o rozměrech 4x2x20 mm polarizované ve směru nejkratší hrany. Tyto magnety mají teplotní odolnost do 180 °C a další výrobcem uváděné parametry těchto magnetů jsou: [13]

Tabulka 1 Vlastnosti magnetu VMM5UH-N35UH

Typ	Remanence (Br)		Koercivita (Hcb)		Vnitřní koercivita (Hcj)		Max. energetický součin (BH max)	
	mT	kGs	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m ³	MGOe
VMM5UH-N35UH	1170-1240	11.7-12.4	>=876	>=11.0	>=1990	>=25.0	263-295	

Šířka cívky byla zvolena $s_c = 6$ mm délka závitu o milimetr více než je délka magnetu, tedy $l_c = 21$ mm. tloušťka jádra cívky 2 mm a jeho šířka 25 mm. Proudová hustota byla zvolena 4,5 A.mm⁻², což je možné s ohledem na předpokládané proudění vzduchu okolo cívky. Jelikož se jedná o napájení senzorické sítě, tak jako vhodná napěťová hladina pro návrh bylo zvoleno napětí na zátěži 5 V, což dává dostatek prostoru pro následné zregulování na standartní napětí 3,3 V.

Předpokládaný odpor zátěže a proud, který bude odebírán, byl odvozen z požadovaného výkonu:

$$P = U_z I_z \rightarrow I_z = \frac{P}{U_z} = \frac{0,15}{5} = 0,03 \text{ A} \quad (34)$$

$$U_z = R_z I_z \rightarrow R_z = \frac{U_z}{I_z} = \frac{5}{0,03} = 167 \text{ } \Omega \quad (35)$$

Podle schématu na Obr. 9 pak bylo určeno indukované napětí na cívce:

$$I_z = \frac{U_i}{R_c + R_z} \quad (36)$$

$$\rightarrow U_i = (R_c + R_z) I_z = (100 + 167) \cdot 0,03 = 8,01 \text{ V} \quad (37)$$

Pro první iteraci byl zvolen odpor cívky 100 Ω .

Rychlost změny vektoru intenzity magnetického pole odpovídá obvodové rychlosti magnetů a byla určena z otáček podle vztahu (24) :

$$v = 2\pi n \frac{D}{2} = 2\pi \frac{3000}{60} \cdot \frac{30}{2} \cdot 10^{-3} = 4,712 \text{ ms}^{-1} \quad (38)$$

Počet závitů cívky byl určen vyjádřením ze vztahu (21):

$$U_i = NBvl_c \rightarrow N = \frac{U_i}{vBl_c} = \frac{8,01}{4,712 \cdot 0,2 \cdot 0,021} = 405 \quad (39)$$

Aby bylo možno určit odpor cívky, nejprve je potřeba určit nejmenší průměr drátu. Ten byl určen ze vztahu (33) jako:

$$D_{cumin} = \sqrt{\frac{I_z}{J}} = \sqrt{\frac{0,03}{3,5}} = 0,092 \text{ mm} \quad (40)$$

Jako nejbližší dostupná alternativa byl zvolen drát o průměru 0,1 mm.

Nyní je možno určit přesněji odpor cívky podle vztahu (32):

$$R_i = N\rho_{Cu} \frac{l}{S} = N\rho_{Cu} \frac{4l_c}{\pi\left(\frac{D_{Cu}}{2}\right)^2} = 405 \cdot 1,72 \cdot 10^{-8} \frac{4 \cdot 0,021}{\pi\left(\frac{0,0001}{2}\right)^2} = 74,5 \Omega \quad (41)$$

Pro spočtený odpor cívky je přepočítáno indukované napětí:

$$U_i = (R_c + R_z)I_z = (74,5 + 167) \cdot 0,03 = 7,2 \text{ V} \quad (42)$$

A potřebný počet závitů:

$$N = \frac{U_i}{vBl_c} = \frac{7,2}{4,712 \cdot 0,2 \cdot 0,021} = 364 \quad (43)$$

Tento počet závitů má odpor:

$$R_i = N\rho_{Cu} \frac{4l_c}{\pi\left(\frac{D_{Cu}}{2}\right)^2} = 364 \cdot 1,72 \cdot 10^{-8} \frac{4 \cdot 0,021}{\pi\left(\frac{0,0001}{2}\right)^2} = 67 \Omega \quad (44)$$

Mezi čtvrtou a pátou iterací je změna napětí tak malá, že počet závitů cívky zůstane nezměněn. Pro tuto iteraci platí, že $U_i = 6,95 \text{ V}$, $N = 352$ a $R_i = 65 \Omega$.

Za předpokladu, že izolační vrstva laku na drátu zvětší jeho průměr o 0,05mm je možno vyjádřit počet závitů ve vrstvě cívky jako:

$$N_{zv} = \frac{s_c}{D+0,05} = \frac{6}{0,1+0,05} = 40 \quad (45)$$

Počet vrstev pak je:

$$N_v = \frac{N}{N_{zv}} = \frac{352}{40} = 8,8 \sim 9 \quad (46)$$

Z počtu vrstev a průměru drátu vyplývá tloušťka cívky:

$$h_c = N_v(D + 0,05) = 9 \cdot (0,1 + 0,05) = 1,35 \text{ mm} \quad (47)$$

Tato hodnota může být ovlivněna způsobem navíjení cívky na jádro, ale pro potřeby návrhu prototypu je i přes ruční navíjení možno ji brát jako směrodatnou. Tato úvaha může být provedena především s ohledem na zaokrouhlení celkového počtu vrstev na nejbližší vyšší celé číslo.

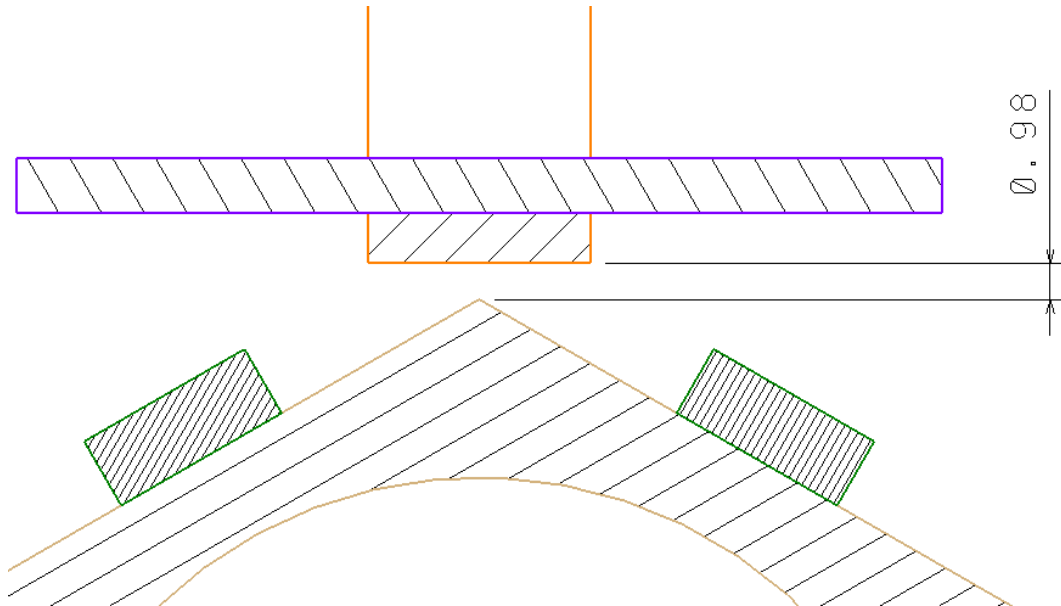
V této fázi výpočtu jsou známy všechny rozměry potřebné pro vytvoření v modelu v Femm. Ten je vytvořen tak, jak bylo popsáno v předešlé kapitole. Jediným dalším parametrem, který musí být zvolen, je velikost vzduchové mezery mezi magnetem a cívkou. Ta byla zvolena 1,3mm. Tato vzdálenost zajišťuje, že nedojde ke kontaktu mezi cívkou a rohem šestihránného profilu, protože platí:

$$D_{opsaná} = \frac{D}{\cos(30^\circ)} = \frac{30}{\cos(30^\circ)} = 34,64 \text{ mm} \quad (48)$$

A pokud přičteme k vepsané kružnici tloušťku magnetů a velikost vzduchové mezery, tak dostaneme:

$$D_{magsvuli} = D + 2b_m + 2v_m = 30 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 1,3 = 36,6 \text{ mm} \quad (49)$$

$$vule = \frac{D_{magsvuli} - D_{opsaná}}{2} = \frac{36,6 - 34,6}{2} = 0,98 \text{ mm} \quad (50)$$



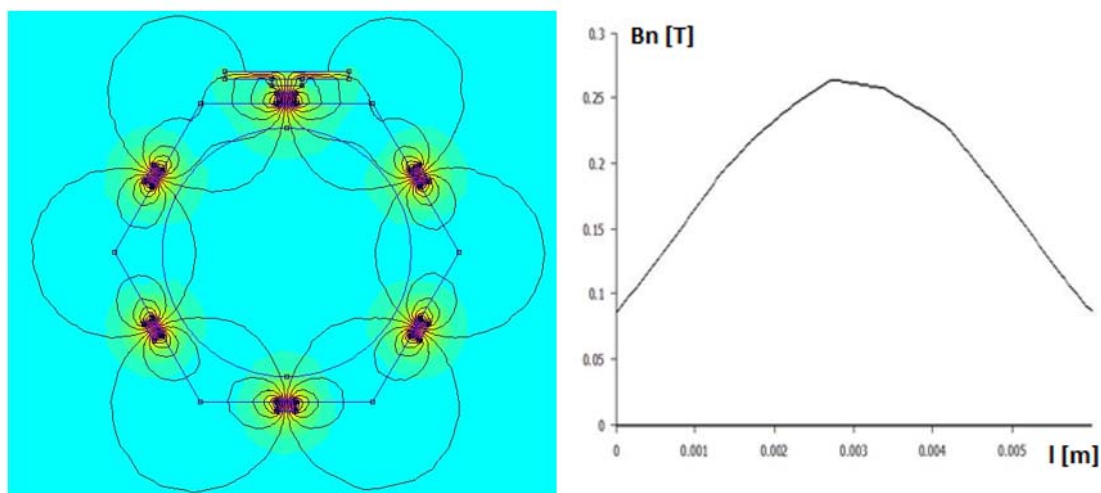
Na závěr návrhu byla provedena kontrola odtrhové síly. Na magnet při rotačním pohybu působí odstředivá síla o velikosti?

$$F_o = ma_d = m \frac{v^2}{r} = m \omega^2 r = 0,0012 \cdot 314^2 \cdot 0,032 = 3,8 \text{ N} \quad (51)$$

Odtrhová síla magnetu udávaná výrobcem je 13,8 N, což znamená, že magnet by po roztočení měl na tyči vydržet i bez nanesení lepidla. Kvůli zajištění polohy magnetu a také pro větší bezpečnost byl ale magnet nalepen.

6.1. Výsledky prvního návrhu

Výsledky z takto nastaveného modelu jsou následující:

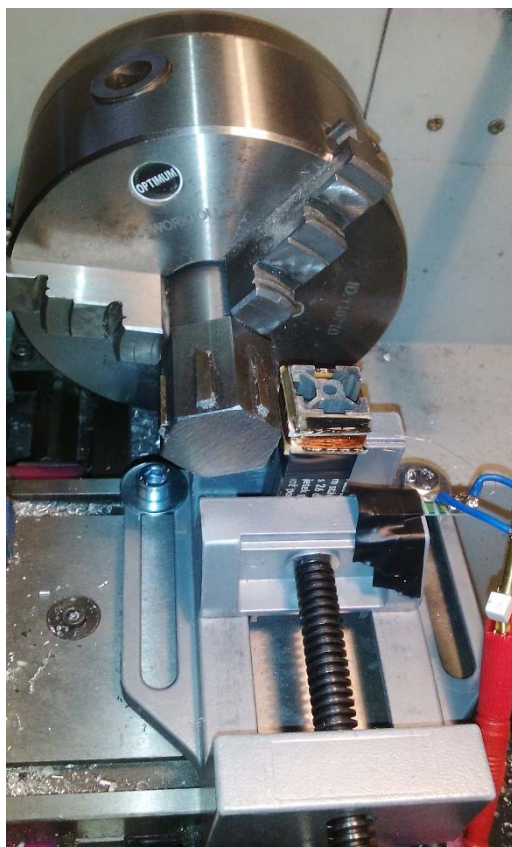


Obr. 14 Výsledky simulace prvního návrhu

V Levé části obrázku Obr. 14 je znázorněno, jak se magnetické siločáry uzavírají mezi jednotlivými magnety. Je zřejmé, že jádro cívky výrazně napomáhá usměrnění magnetického pole tak, aby vektor jeho magnetické indukce byl při průchodu cívkou co možná nejvíce normálový na rovinu určenou vektorem rychlosti a funkční částí závitů. To zvyšuje podíl normálové složky magnetické indukce použitelné pro elektromagnetickou indukci.

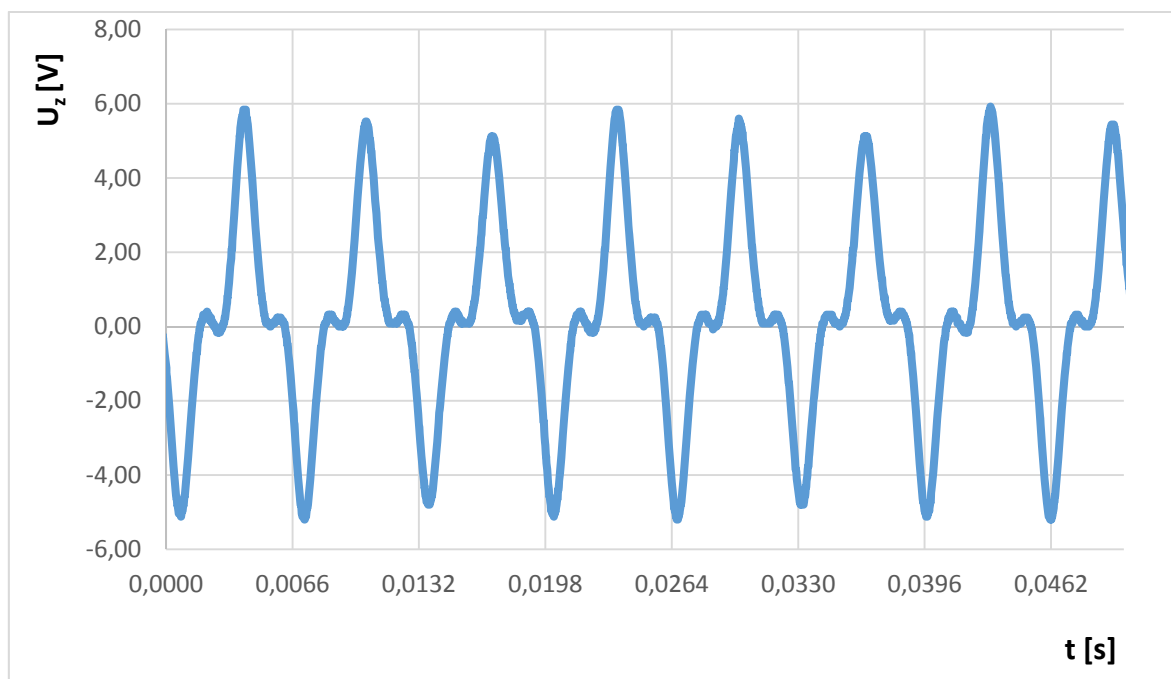
Pravá část obrázku Obr. 14 zobrazuje průběh normálové složky magnetické indukce. Hodnoty pro graf jsou brány z řezu vedeného středem tloušťky cívky. Průměrná normálová magnetická indukce na celé cívce pak je 0,21 T. Hodnota indukovaného napětí na zátěži 100 Ω přepočtená pro tuto hodnotu magnetické indukce je 4,32 V, což je přijatelná hodnota.

Pro tento první návrh byl sestaven funkční vzorek a ten byl následně testován.



Obr. 15 První prototyp generátoru

Na Obr. 15 je vidět rotor s magnety upnutý v hlavě soustruhu a cívka namotaná na hliníkovém nosníku, na který bylo nalepeno ocelové jádro dle modelu. Nosník s cívkou byl upnut do svěráku přišroubovaného k pojezdu nožové hlavy.



Obr. 16 Průběh napětí na zátěži pro první prototyp

Na Obr. 16 je naměřený průběh napětí. Napětí bylo měřeno osciloskopem Teledyne LeCroy WaveAce 212 při vzorkovací frekvenci 7680 Hz.

Je patrné, že matematický model odpovídá relativně přesně naměřeným datům. Teoretickou frekvenci napětí je možné spočítat z otáček hřídele je jako:

$$f_h = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ Hz} \quad (52)$$

Bylo použito šest magnetů, proto se polarita změní šestkrát a tak budou vytvořeny tři sinusové vlny. Frekvence výstupního napětí je:

$$f_i = 3f_h = 150 \text{ Hz} \quad (53)$$

$$\rightarrow T_i = \frac{1}{f_i} = \frac{1}{150} = 0,006\overline{6} \quad (54)$$

To odpovídá naměřeným datům. Na průběhu výstupního napětí je evidentně superponována další sinusová funkce. Velikost amplitud napětí se periodicky mění s frekvencí přibližně třikrát menší než je frekvence napětí. To odpovídá frekvenci hřídele. Proto je nejpravděpodobnější, že tento šum má původ v nepřesném lepení magnetů, popřípadě nesouososti obrábění s neobrobenou plochou šestihránné tyče.

Tvar tyče způsobující přebytky materiálu a potřebu větší vzduchové mezery, stejně tak jako určení počtu a typu použitých magnetů, byly popudem pro vytvoření jiných konstrukčních řešení.

6.2. Druhý návrh

První změnou bylo zavrhnutí šestihránného tvaru tyče, ten je sice dostupný jako polotovár, ale zbytečně zvětšuje potřebnou vzduchovou mezeru a také hmotnost převlečky.

Dále pak byly zvoleny větší magnety a to 20x5,5x2,5 VMM8SH-N45SH. Ty mají teplotní odolnost do 150 °C a výrobce u nich uvádí tyto vlastnosti [13]:

Tabulka 2 Vlastnosti magnetu VMM8SH-N44SH

Typ	Remanence (Br)		Koercivita (Hcb)		Vnitřní koercivita (Hcj)		Max. energetický součin (BH max)	
	mT	kGs	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m ³	MGOe
VMM8SH-N44SH	1310-1370	13.1-13.7	>=979	>=12.3	>=1592	>=20.0	326-358	

Pro daný problém je zajímavá především vyšší koercivita, která spolu se zvětšením objemu přímo ovlivní velikost magnetické indukce.

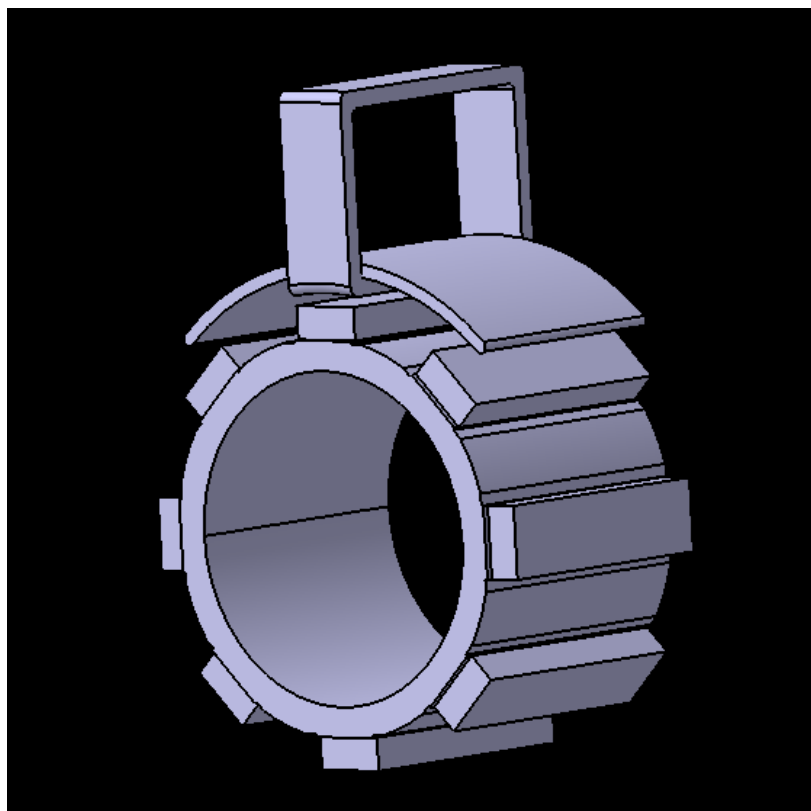
Pro větší magnety byla znovu provedena kontrola odtrhové síly.

$$F_o = ma_d = m \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r = 0,00206 \cdot 314^2 \cdot 0,032 = 6,5 \text{ N} \quad (55)$$

Odtrhová síla magnetu udávaná výrobcem je 26 N, takže magnety by měli po roztočení na tyči držet i bez nanesení lepidla, ale stejně jako v předchozím případě byly nalepeny.

Poté byly zkoušeny různé počty magnetů. Propočítány byly konfigurace s 6, 8 a 10 magnety.

Změněno bylo také „jádro“ cívky z prvotního plochého designu na tvar odpovídající výseku z trubky.



Obr. 17 Výsledné řešení

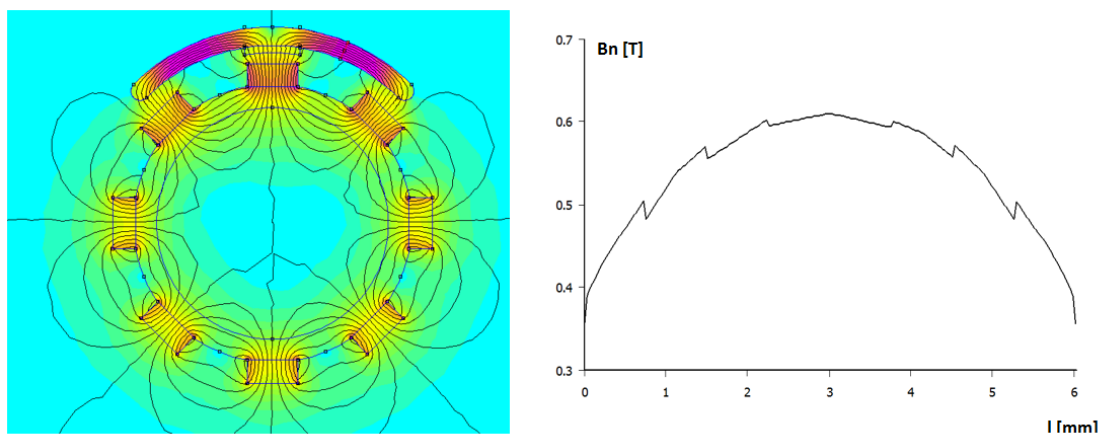
Pro větší přehlednost byly výsledky zpracovány do tabulky:

Tabulka 3 Srovnání jednotlivých konstrukčních řešení

Tvar	Počet magnetů	jádro	B [T]	Hmotnost [g]	Velikost vzduchové mezery [mm]
Šestihran	6	Ploché	0,208	55,2	1,30
Válec	6	Ploché	0,3465	47,36	1,2
	8		0,3744	50,48	
	10		0,3908	54,6	
	6	Výseč	0,4089	47,36	
	8		0,4584	50,48	
	10		0,4596	54,6	
Vystouplé póly	6	Výseč	0,4095	47,36	1,2
	8		0,4591	50,48	
	10		0,4595	54,6	

Jako nejvhodnější byla vybrána konstrukce s osmi magnety umístěnými na válcové ploše s ploškami navrženými přesně na velikost magnetů. Takto vytvořený rotor byl zkombinován s jádrem cívky ve tvaru devadesátistupňové výseče z trubky o vnitřním průměru 40 mm a tloušťce 2 mm. Tloušťka jádra byla zvolena tak, aby nedošlo k jeho přesycení a následnému vzniku velkého magnetického odporu, který by negativně ovlivnil celý magnetický obvod a v podstatě by snížil velikost magnetické indukce na cívkce. Při tloušťce jádra 2 mm je velikost magnetické indukce v něm rovna 1,28 T, což je přijatelná hodnota pro běžnou ocel.

6.2.1. Výsledky simulace druhého návrhu



Obr 18 Výsledky simulace druhého návrhu

Výsledky simulace jsou zobrazeny v Obr. 18 stejně jako pro předchozí návrh. Pro takto navrženou konstrukci, po dosazení všech parametrů do vytvořeného modelu, jako při prvním návrhu, byla spočtena hodnota průměrné normálové magnetické indukce na cívkce $B_n = 0,59 \text{ T}$ při vzduchové mezeře 1 mm, tloušťce cívky 0,75 mm a šířce cívky 6 mm. Při zachování tloušťky drátu a plnění jako při prvním návrhu může být na cívkce navinuto 200 závitů v pěti vrstvách.

Při použití jádra a cívky ve tvaru kruhové výseče by mělo být uvažováno s celkovou magnetickou indukcí a ne jen s její normálovou složkou. Kvůli relativně velkému poloměru křivosti a malé délce cívky je však tangentská složka zanedbatelně malá. Tangentská složka není uvažována i s ohledem na nepřesnosti při výrobě jádra a cívky.

Zuby viditelné na průběhu magnetické indukce jsou pouze nedokonalostí zobrazovací metody programu a reálně neexistují.

Na takto navinuté cívkce bude teoreticky indukováno napětí o amplitudě $U_{ii} = 10,2 \text{ V}$ a cívkka bude mít vnitřní odpor 35Ω .

Horní část cívky musí být vedena ideálně zcela mimo dosah magnetického pole, aby se v ní neindukovalo žádné napětí opačné polarity. To však vzhledem k omezeným zástavbovým rozměrům není možné. Byly provedeny simulace pro ověření velikosti ztrátového napětí v různých výškách.

Výsledky jsou zapsány do následující tabulky:

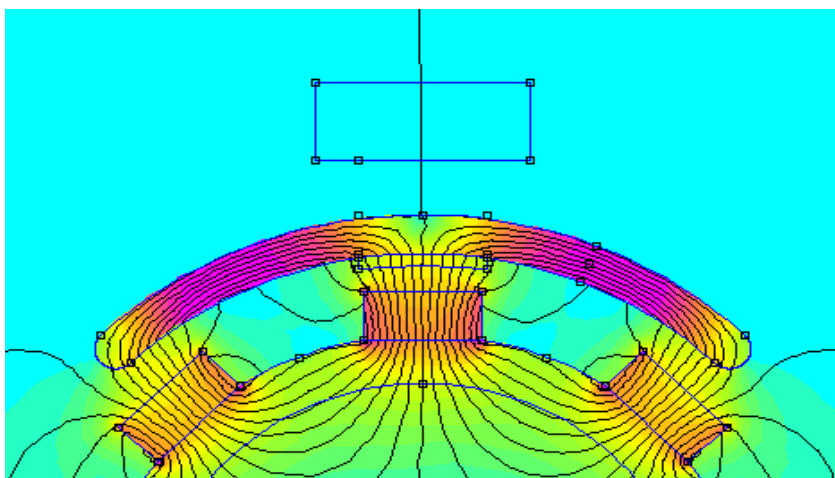
Tabulka 4 Hodnoty magnetické indukce nad jádrem cívky

Vzdálenost od jádra [mm]	Magnetická indukce [T]	Indukované napětí [V]
15	0,0042	0,0778
20	0,0031	0,0575
25	0,0025	0,0463
30	0,0020	0,0371
35	0,0016	0,0297
40	0,0013	0,0241

Za přijatelnou byla zvolena vzdálenost 20 mm od vrchní hrany „jádra“ cívky. V této vzdálenosti je velikost průměrné normálové magnetické indukce rovna 0,0031 T. Ta na cívce o 200 závitů generuje protichůdné napětí $U_{iz} = 0,0575$ V. Výsledné indukované napětí na cívce bude tedy:

$$U = U_{ii} - U_{iz} = 10,2 - 0,0575 = 10,14 \text{ V} \quad (55)$$

Byla zvážena i varianta s dodatečným odstíněním magnetické indukce za pomoci přidaného robustního ocelového jádra.



Obr. 19 Magnetické pole rotoru se stíněním

Tato koncepce však nepřinesla žádné zlepšení, naopak pokud se jádra spojí, tak dojde k většímu rozptylu magnetického pole a k nárůstu magnetické indukce v měřených vzdálenostech. Proto od ní bylo upuštěno.

Spočtená hodnota napětí je však jen amplituda napětí ideálního zdroje, v té není uvažováno s vnitřním odporem zdroje. Na tomto odporu dojde při stanoveném proudovém odběru k úbytku napětí podle Ohmova zákona:

$$U_{cz} = R_i I_z = 35 \cdot 0,046 = 1,61 \text{ V} \quad (56)$$

$$U_{ic} = U_i - U_{cz} = 7,17 - 1,61 = 5,56 \text{ V} \quad (57)$$

Výsledné střídavé napětí bude dále zpracováno výkonovou elektronikou.

7. Optimalizace

Model generátoru je komplexní úloha, proto aby bylo dosaženo co nejmenších rozměrů a hmotnosti bylo přistoupeno k použití optimalizačního algoritmu.

7.1. Optimalizační algoritmus

Z možných optimalizačních algoritmů byl vybrán Samo Organizující se Migrační Algoritmus – SOMA a to ve variantě All To One, tedy s migrací k jednomu vůdci. Tato metoda byla vytvořena Prof. Ing. Ivanem Zelinkou v roce 1999. Jedná se o deterministicko-stochastickou metodu, ve které náhodně vytvořená populace jedinců kooperativně prohledává daný prostor a na základě migrace k vůdci se snaží najít extrém ohodnocovací funkce.

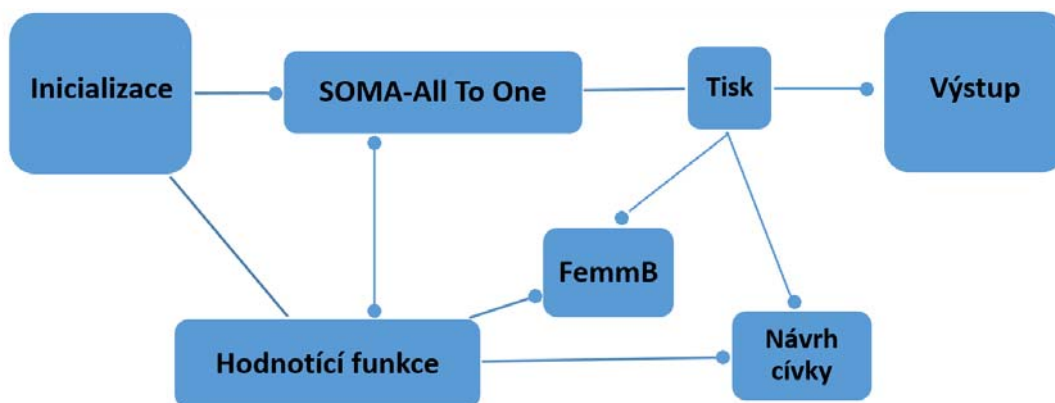
7.2. Optimalizace metodou SOMA - All To One

Před každou optimalizací je nutné provést citlivostní analýzu. Citlivostní analýza byla v tomto případě spojena s výběrem vhodného konstrukčního řešení. Při zkoušení různých kombinací bylo zjištěno, že nejzásadnější vliv na výkon generátoru má velikost magnetické indukce na cívce. Ta je přímo ovlivněna magnety a vzdáleností, potažmo tvarem cívky. Pro optimalizační úlohu bude tedy uvažováno pouze se změnou rozměrů zvolené konstrukce. Zvolenou konstrukcí se myslí válec osazený osmi magnety s jádrem cívky ve tvaru kruhové výseče o tloušťce 2 mm. Tato konstrukce byla zvolena z důvodů popsanych v kapitole Návrh generátoru.

7.2.1. Popis struktury optimalizačního skriptu

Pro optimalizaci byl použit algoritmus navržený Jiřím Kurfürstem v rámci jeho závěrečné práce. [15] Bylo využito především samotného algoritmu SOMA - All To One. Inicializační skript stejně jako ohodnocovací funkce a vykreslení výsledků byly z větší části přepsány.

Schéma optimalizačního skriptu je znázorněno na Obr. 20



Obr. 20 Struktura optimalizačního skriptu

Body na koncích spojníc reprezentují posloupnost jednotlivých oddílů. Hlavní optimalizační cyklus probíhá mezi algoritmem Soma a hodnoticí funkcí.

Pro použití optimalizačního algoritmu je třeba, aby všechny oddíly byly funkce, které bude možno aktivovat dle potřeby. Proto bylo třeba přetvořit skripty pro tvorbu magnetického modelu a návrh cívky do plně parametrické podoby. Dále z nich byly vytvořeny funkce.

7.2.2. Inicializační skript

Inicializační skript je možno rozdělit na čtyři oddíly.

Prvním je deklarace globálních proměnných a definice zadání. Jako globální proměnná je zaveden ukazatel se jménem ohodnocovací funkce a proměnná pro definiční obory optimalizovaných proměnných. Zadáním se myslí určení váhy jednotlivých kritérií hodnotící funkce uložené v proměnné *additionalParameters* a popis pracovních podmínek generátoru. Těmi jsou otáčky, výkon na zátěži a požadované napětí na zátěži. Z těchto hodnot je dopočítán proud na zátěži, předpokládaný odpor na zátěži a úhlová rychlost hřídele. Na závěr je vytvořena proměnná *Vstupy*. Tento řádkový vektor obsahuje úhlovou rychlost hřídele, proudové plnění, odpor zátěže a proud na zátěži.

Druhým oddílem je definice konstant a optimalizovaných proměnných. Definovanými konstantami jsou hustota mědi 8960 kg.m^{-3} , hustota oceli 7850 kg.m^{-3} , hustota NdFeB magnetu kg.m^{-3} , měrná rezistivita mědi $0,0175 \text{e}^{-6} \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$ a průměr hřídele rotoru $0,0025 \text{ m}$. Konstanty jsou uloženy v proměnné *Konstanty*. Kromě výběru proměnných pro optimalizaci je nutné určit i jejich definiční obory, tedy hranice vy kterých se mohou pohybovat. Pro optimalizaci byly zvoleny tyto proměnné: délka magnetu *lm*, výška magnetu *bm*, šířka magnetu *sm*, šířka cívk *sc*, výška cívk *hc*, úhel výseče pro jádro cívk *beta*, počet závitů cívk *N*, průměr převlečky *d*, průměr drátu *prumerCu* a velikost vzduchové mezery *vm*. Hodnoty definičních oborů jsou zapsány v následující tabulce:

Tabulka 5 Definiční obory optimalizovaných proměnných

Proměnná	Definiční obor	jednotky
lm	[0,010; 0,030]	m
bm	[0,001; 0,005]	
sm	[0,002; 0,008]	
sc	[0,003; 0,010]	
hc	[0,0005; 0,002]	
beta	[15; 90]	°
N	[100; 300]	-
d	[0,030; 0,045]	m
prumerCu	[0,0008; 0,0015]	
vm	[0,0008; 0,002]	

Definiční obory byly nastaveny na základě zkušeností získaných při tvorbě modelů pro výběr vhodného konstrukčního řešení. Při jejich překročení se model dostává do extrémních případů, které nemají reálné využití. Definiční obory jsou uloženy v globální proměnné *bounds*.

Třetím oddílem je deklarace parametrů optimalizačního algoritmu. V tomto oddílu je deklarován maximální počet migrací *migrations* a velikost jedné populace *popSize*, což jsou parametry, které zásadně ovlivňují délku výpočtu a šanci na nalezení hledaného řešení. Dále jsou deklarovány parametry pro migraci. Těmi jsou délka kroku *step*, velikost posunu jedince během jedné migrace *pathLength* a výchylka od

původního směru *přt*. Posledním deklarovaným parametrem je minimální rozdíl mezi stávající a předchozí migrací *minDiv*. Tento parametr ukončí algoritmus, pokud bude rozdíl ohodnocovacích funkcí menší než jeho hodnota. Z toho vyplývá, že při záporné hodnotě tohoto parametru proběhne plný počet migrací určený proměnou *migrations*.

Hodnoty parametrů jsou uloženy v proměnné *DeklaraceP*.

V posledním, čtvrtém oddílu je spuštěna optimalizační funkce *soma_all_to_one*. Jejím výstupem je pole *vysledky*. Toto pole obsahuje tři matice. První pro hodnotu hodnotící funkce, druhý pro hodnoty optimalizovaných veličin a třetí pro hodnoty výstupních parametrů dosažené s těmito hodnotami. Struktura proměnné *vysledky* je znázorněna v tabulce:

Tabulka 6 Struktura proměnné *vysledky*

vysledky									
vysledky.costFunction									
Hodnota ohodnocovací funkce									
vysledky.historyVstupy									
lm	sm	bm	Sc	hc	beta	N	d	prumerCu	vm
vysledky.historyVystupy									
Bn	Ui	Uz	V	N	Rc	Bjm	J		

Každá ze tří matic, jejichž názvy jsou zvýrazněny bleděmodrou barvou, obsahuje tolik řádků, kolik migrací bylo provedeno. Pro orientační zobrazení výsledků je použit příkaz *disp*. Hodnoty proměnných jsou stejným příkazem nadepsány jmény, tak jako v tabulce.

7.2.3. Vnořené funkce

Inicializační skript volá funkci `soma_all_to_one`. Jejími vstupy jsou všechny proměnné z inicializačního skriptu. Samotný algoritmus byl, jak už bylo řečeno, převzat. [15] Algoritmus volá dvě funkce *ohodnocení* a *tisk*. Do funkce *ohodnocení* vstupují hodnoty proměnné *parameters* pro aktuální populaci, dále pak *additionalParameters*, *Vstupy* a *Konstanty*. Jelikož ve funkci dochází k používání různých prvků ze všech těchto proměnných, tak byly znovu vytvořeny jednotlivé proměnné z řádkových vstupních parametrů. Ve funkci jsou pak spočteny hmotnosti rotační a statické části, moment setrvačnosti rotační části a objem cívky. Pak je aktivována funkce *femmB*, která je vytvořena ze skriptu pro tvorbu magnetického modelu. Jejími jediným vstupním parametrem je proměnná *parameters*. Na výstupu pak poskytuje hodnotu normálové magnetické indukce na cívce a maximální hodnotu magnetické indukce v jádře cívky. Hodnota magnetické indukce je pak spolu s uhlovou rychlostí, průměrem drátu, proudem, délkou magnetu, šířkou cívky, průměrem převlečky, počtem závitů a odporem zátěže vstupním parametrem pro funkci *navrhgen*. Na závěr je spočtena hodnota ohodnocovací funkce pro dané vstupní parametry, ta je také jediným výstupem této funkce.

Funkce *tisk* je v podstatě obdobou funkce *ohodnocení*, s tím rozdílem, že jako vstupní hodnoty slouží parametry vítězné migrace a jako výstupní hodnoty obdržíme hodnoty magnetické indukce na cívce, indukované napětí, napětí na zátěži, objem funkční části cívky, počet závitů cívky, odpor cívky, hodnotu magnetické indukce v jádře cívky a hodnotu momentu setrvačnosti rotačních částí.

7.2.4. Ohodnocovací funkce

Srdcem optimalizačního algoritmu je vždy ohodnocovací funkce. Tato funkce zastupuje konstruktéra, který by řekl, jestli je dané řešení lepší nebo horší, než řešení ostatní.

Skládá se z váhových koeficientů a parametrů popisujících optimalizovaný stroj. Váhové koeficienty C_n určují citlivost funkce na jednotlivé parametry a je třeba je nastavit již před začátkem optimalizace. Z toho vyplývá, že jsou po celou dobu běhu algoritmu neměnné. Naopak parametry optimalizovaného stroje se přepočítávají pro každou sadu vstupních proměnných, tak aby bylo možno ohodnotit každou migrační vlnu.

To, jak bude ohodnocovací funkce reagovat na změnu daného parametru, je plně v rukou programátora. Jelikož vítězí ta sada vstupních parametrů, která obdrží nejnížší hodnotu ohodnocovací funkce *val*, pak platí:

Pro maximalizaci parametru X

$$val = C_n \frac{1}{X} \quad (58)$$

Pro minimalizaci parametru X

$$val = C_n X \quad (59)$$

A pro držení stálé hodnoty parametru X

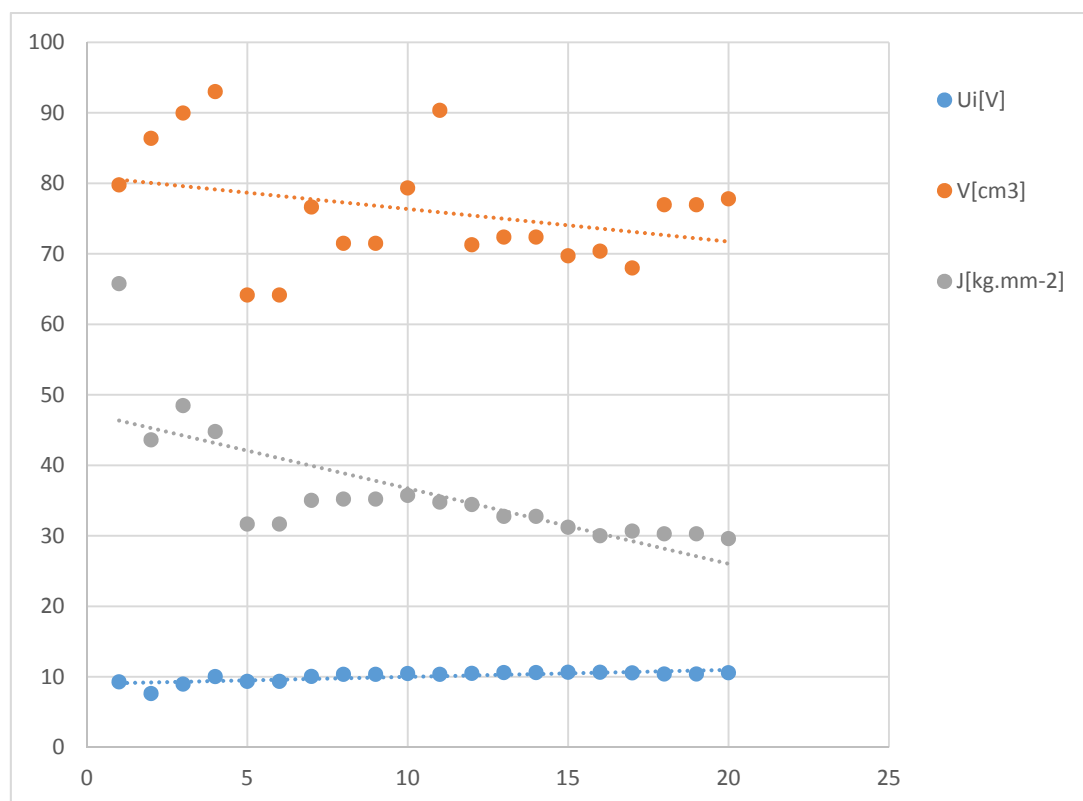
$$val = \left| \frac{X_d}{X_r} - \frac{X}{X_r} \right| \quad (60)$$

V tomto případě je X_d požadovaná hodnota parametru a X_r je zvolená referenční hodnota. Pro takto zapsanou funkci nejlépe vychází hodnota ohodnocovací funkce v případě, kdy jsou si zlomky rovny.

Pro optimalizaci dané úlohy byla zvolena tato ohodnocovací funkce:

$$val = 5 \left| \frac{10,5}{12} - \frac{spocitaneU}{12} \right| + 0,1 \cdot minimalniVc \cdot 10^6 + 0,4 \cdot minimalniJ \cdot 10^6 \quad (61)$$

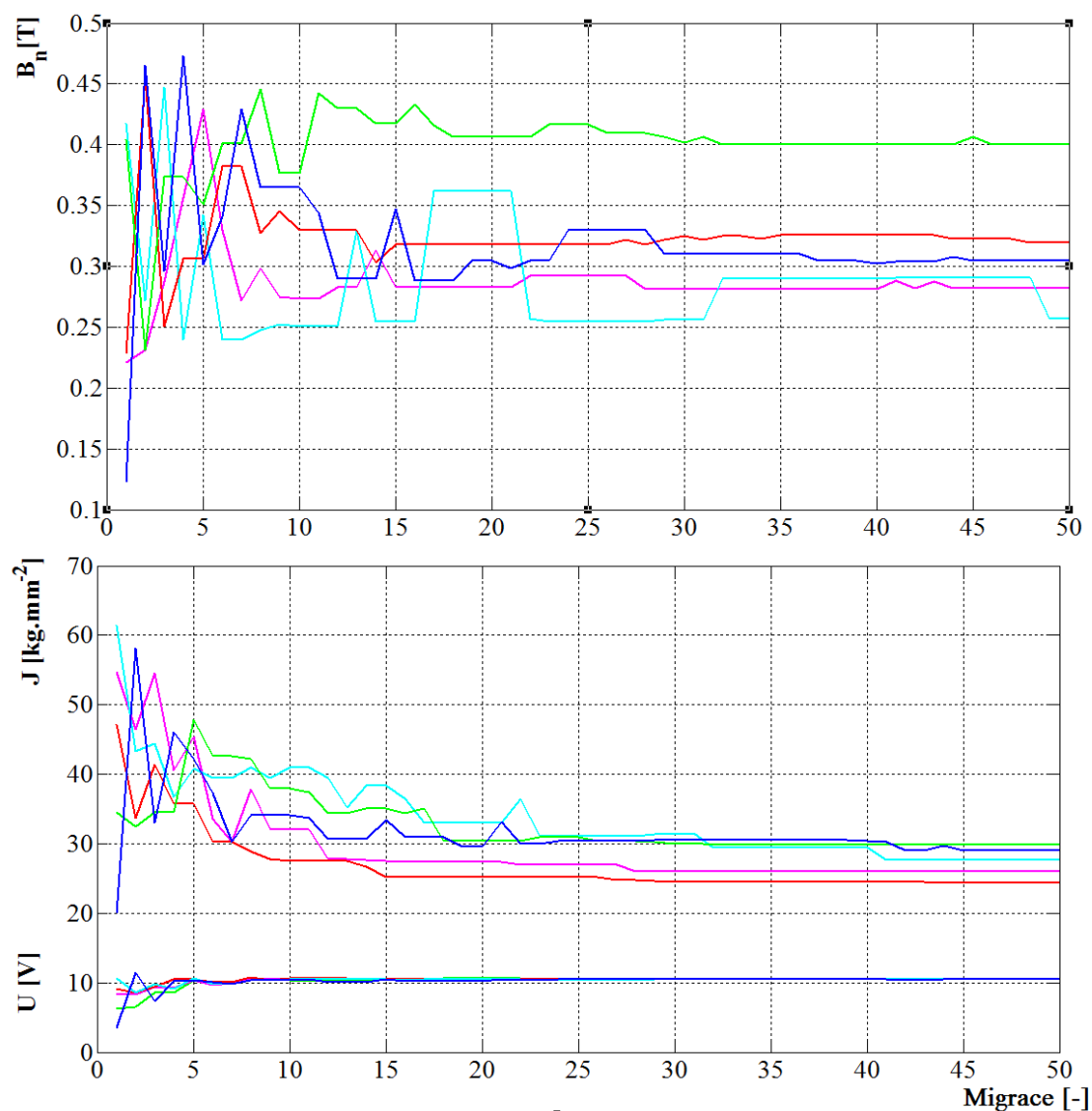
Hodnoty takto nastavené funkce se pohybují v řádu jednotek, což usnadňuje představu o vlivu váhových koeficientů. Váhové koeficienty jsou zvoleny tak, aby nejvyšší důraz byl kladen na zachování indukovaného napětí a nejnižší na minimální objem cívky. Napětí zvolená jako referenční a požadované byly odhadnuty podle výsledků přechozích simulací a experimentu. Stejně tak jako hodnoty váhových koeficientů byly odhadnuty na základě opakovaného spouštění algoritmu s různými hodnotami



Obr. 21 Vývoj hodnot parametrů ohodnocovací funkce

Po vynesení parametrů z patnácti migrací do grafu, kde na ose x je pořadové číslo migrace a osa y představuje hodnoty jednotlivých parametrů je patrné, že ohodnocovací funkce funguje podle předpokladů, jelikož po proložení jednotlivých bodů přímkami vidíme konstantní nebo klesající trend. Je také patrné, že napětí a moment setrvačnosti mají při optimalizaci větší prioritu, než objem cívky.

Parametry byly následně doladěny tak, že by spuštěn cyklus, který začal na hodnotě o 50 % nižší, než byla původní hodnota všech váhových koeficientů a v pěti cyklech je postupně zvyšoval po 10 %, takže na konci cyklu byla optimalizace vyhodnocována s váhovými koeficienty odpovídajícími výchozí hodnotě. Následně byla zhodnocena velikost indukovaného napětí, magnetické indukce a momentu setrvačnosti podle Obr. 22.



Obr. 22 Změny v hodnotě B_n , J a U v průběhu optimalizace

Z grafů je vidět, že přesně podle předpokladů všechny hodnoty konvergují k určitému řešení. Barvy určují hodnoty váhové funkce v pořadí dle tabulky

	C_U	C_{Vc}	C_J
fialová	2,5	0,05	0,2
bledě modrá	3	0,06	0,24
červená	3,5	0,07	0,28
zelená	4	0,08	0,32
modrá	4,5	0,09	0,36

Tabulka 7 Koefficienty ohodnocovací funkce

Je zřejmé, že nuance v indukovaném napětí jsou nevýznamné. Z hlediska momentu setrvačnosti je nejlepší červené řešení, ale z hlediska velikosti magnetické indukce vede řešení zelené. Červené řešení se ale zdá být univerzálnější.

Tabulka 8 Vstupy a výstupy vybraných řešení optimalizace

vysledky										
vysledky.costFunction										
	Hodnota ohodnocovací funkce									
červená	0,7203									
zelená	1,0615									
vysledky.historyVstupy										
	lm	bm	sm	sc	beta	N	d	Prumer Cu	vm	
červená	0,0273	0,0028	0,0021	0,0041	50,7231	290,4794	0,0301	0,0001	0,0010	
zelená	0,0196	0,0038	0,0022	0,0058	49,0814	299,5044	0,0325	0,0001	0,0010	
vysledky.historyVystupy										
	Bn	Ui	Uz	V	N	Rc	Bjm	J		
červená	0,3197	10,5016	4,1414	73,8097	290,4794	111,4966	0,5672	24,2790		
zelená	0,4002	10,5021	5,5203	62,9710	299,5044	65,5171	0,8439	29,7841		

Nevýhodou červeného řešení je prakticky hraniční hodnota napětí na zátěži, která by nemusela stačit pro napájení regulátoru. Zelené řešení je v tomto ohledu mnohem robustnější. Překvapivá je nižší hodnota úhlu beta, která je pro obě řešení velmi podobná a lze ji tak prohlásit za ideální. Dle očekávání obě řešení zvolily nejmenší možnou vzduchovou mezeru a průměr drátu. Zajímavá je však rozdílná délka magnetů a tím pádem i funkční délka závitu. Z tabulky vyplývá, že pro vysokou magnetickou indukci je volen spíše čtvercový půdorys magnetu, kdežto pro nízký moment setrvačnosti jde spíše o obdélník. Pro další optimalizaci by bylo vhodné jasně specifikovat požadavky zákazníka, jelikož výpočty jsou relativně časově náročné a základní souvislosti byly již odhaleny.

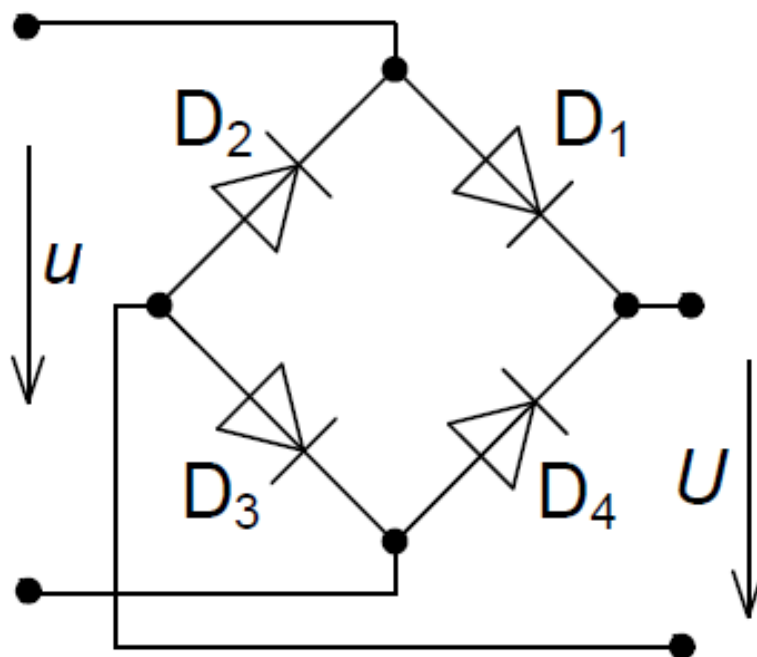
8. Elektronika

Cílem je obdržet stejnosměrné ustálené napětí. Rotační generátor ale dodává střídavé napětí. Proto musí být střídavé napětí nejprve usměrněno.

8.1. Usměrnění střídavého napětí

Prvním prvkem jednoduchého usměrňovače je diodový můstek. Můstek může být v provedení jednopulzním (jedna dioda) nebo dvoupulzním (čtyři diody). Jednopulzní můstek využívá pouze jednu část sinusové vlny a tím pádem jen polovinu energie v ní obsažené. Oproti tomu dvoupulzní usměrňovač umožňuje využití obou částí sinusového průběhu napětí.

Hlavní nevýhodou čtyř diodového můstku je to, že v každém okamžiku jsou aktivní dvě diody a díky tomu dochází oproti dvou diodovému můstku k dvojnásobnému úbytku napětí.



Obr. 23 Schéma zapojení dvoupulzního usměrňovače

Z tohoto důvodu bylo pro sestavení můstku využito Schottkyho diod.

Schottkyho dioda se skládá z přechodu kov – polovodič. Kov velmi rychle odsává volné náboje. To vede k velmi rychlé době zotavení. Použité diody BAT 42 mají ztráty pouze 0.4 V při maximálním proudu 0.2 A.

Frekvence střídavého napětí byla určena z jednoduchým převodem z otáček hřídele za minutu na otáčky za sekundu:

$$f_h = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ Hz} \quad (62)$$

Na hřídeli je osm magnetů, tím pádem se polarita indukovaného napětí změní osmkrát za jednu otáčku, což způsobí vznik čtyř sinusových vln. Pro frekvenci napětí tedy platí:

$$f_i = 4f_h = 200 \text{ Hz} \quad (63)$$

8.2. Stabilizace usměrněného napětí

Po usměrnění na Greatzově můstku je napětí sice kladné, ale zůstane zvlněné. Vlnitost má dvakrát větší frekvenci, než mělo usměrňované napětí, tedy 400 Hz. Pro vyhlazení napětí je použit jednoduchý filtr typu dolní propust. Filtr byl vytvořen vložením dvou kondenzátorů. První elektrolytický s velkou kapacitou a tudíž časovou konstantou větší než jedna perioda napětí čímž dojde k vyhlazení napětí. Druhý keramický s malou kapacitou sloužící k zachycení případného vnějšího rušení o vyšších frekvencích.

Kapacita elektrolytického kondenzátoru byla spočtena podle vztahů pro RC člunek.

RC člunek je jedním z nejjednodušších příkladů filtru typu dolní propust. Kapacita v tomto případě ovlivňuje časovou konstantu obvodu a tím pádem mezní frekvenci filtru. Pokud je doba, za kterou se kondenzátor nabije na 63% ustálené hodnoty, považována za časovou konstantu τ pak platí:

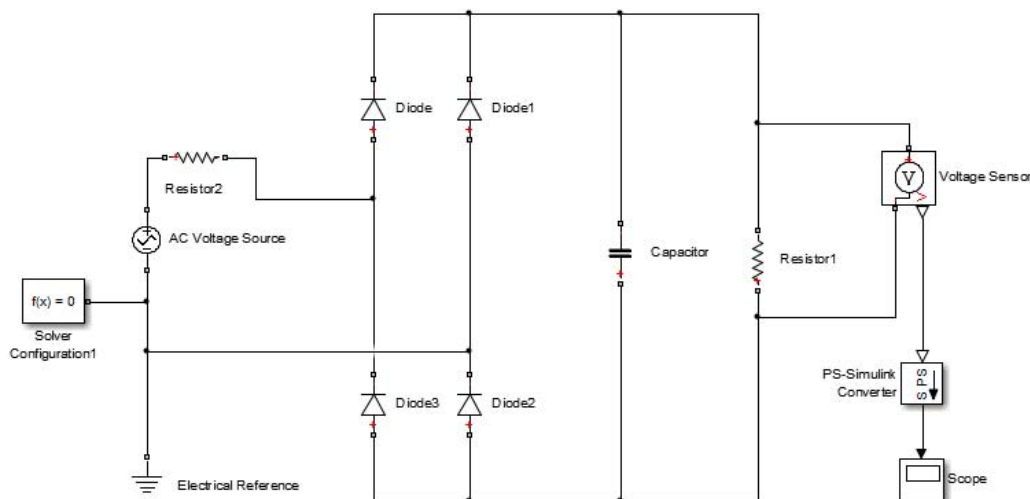
$$\tau = RC \quad (64)$$

a dále pak:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (65)$$

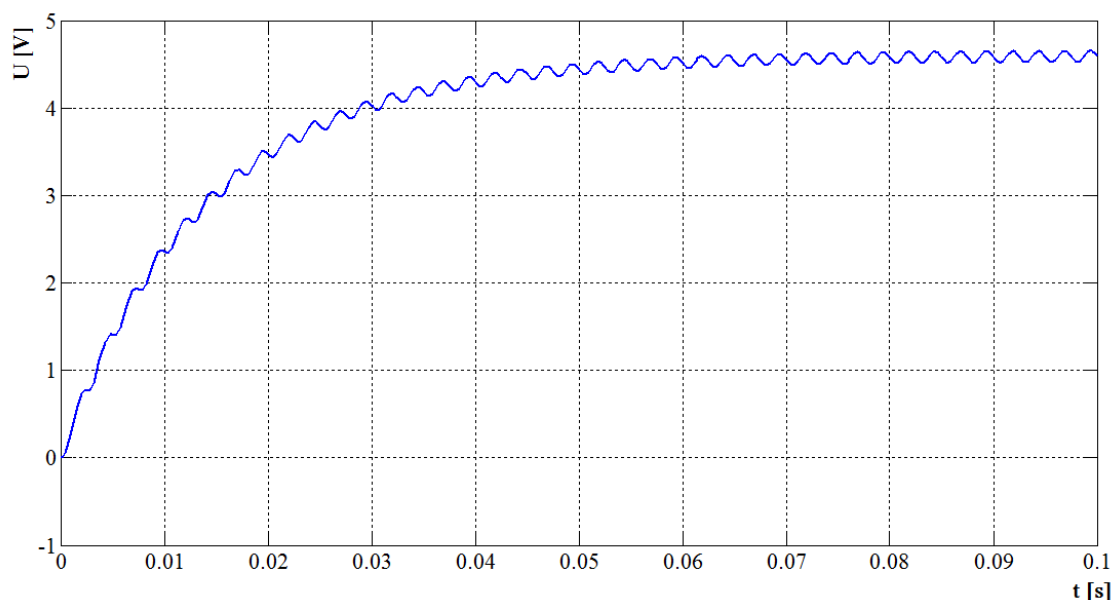
$$\rightarrow C = \frac{1}{2\pi R f_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 400} = 400 \mu F \quad (66)$$

Odpor $R = 1 \Omega$ byl zvolen, protože zavedením dalšího odporu do obvodu by se zvýšily ztráty a při poměrně vysoké frekvenci usměrněného napětí není třeba odpor zvyšovat. Nejbližší kondenzátor z výrobní řady má kapacitu $C = 470 \mu F$. Byl zvolen kondenzátor s maximálním napětím 20 V. Tento návrh byl otestován na jednoduchém modelu v prostředí Simscape Electronics.



Obr. 24 Schéma zapojení usměrňovače s filtrem v Simscape

Model byl sestaven z ideálního zdroje střídavého napětí, ke kterému byl sériově připojen odpor o hodnotě odpovídající odporu navinuté cívky. Střídavé napětí pak bylo usměrněno na můstku složeném ze čtyř diod. Vlastnosti diod byly dosazeny z katalogového listu reálně použitých diod. Takto usměrněné napětí bylo vyhlazeno sériově zapojeným kondenzátorem o dané kapacitě a přivedeno na odpor představující zátěž. V tomto případě byla zvolena hodnota odporu podle hodnoty požadovaného výkonu na 72 Ω . Na tomto odporu pak byl odečten časový průběh napětí.



Obr. 25 Výstupní napětí filtru

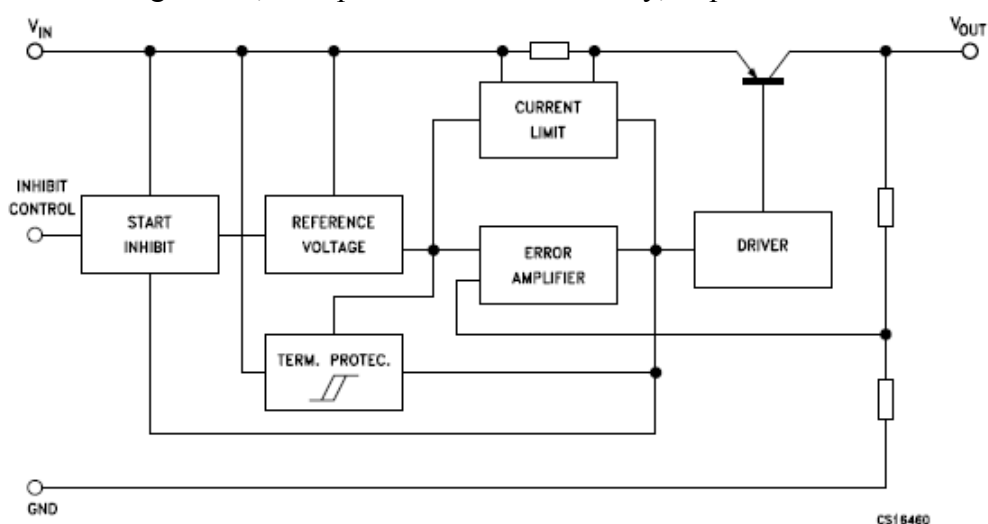
Napětí se ustálí okolo hodnoty 4,6 V, což je hodnota postačující pro použití regulátoru k zredukování napětí na 3,3 V. Regulátor zároveň ještě více sníží vlnitost získaného napětí, které je v tomto okamžiku rovno:

$$\varphi_w = \frac{U_w}{U_0} \cdot 100 = \frac{0,1}{4,6} \cdot 100 = 2,17 \% \quad (67)$$

U_w je přibližná hodnota amplitudy střídavé složky. Tato hodnota byla odečtena z grafu.

8.3. Regulace stabilizovaného napětí na hladinu 3,3 V

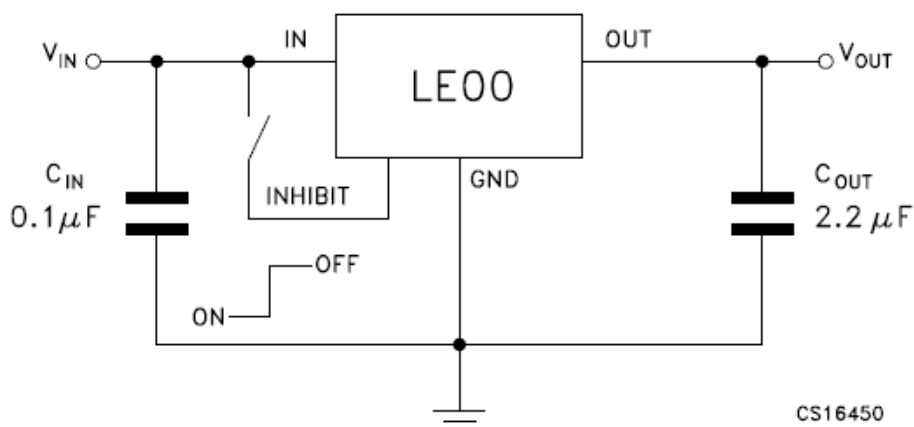
Za standartní napěťovou hladinu je považováno napětí 3,3V. Proto bude použit regulátor k dosažení této hodnoty. Ze škály různých typů regulátorů byl zvolen jednoduchý lineární regulátor. Hlavními kritérii při výběru byla cena, jednoduchost, a to jak samotného regulátoru, tak i potřebné okolní zástavby, a spolehlivost.



Obr. 26 Vnitřní struktura regulátoru LE33CD

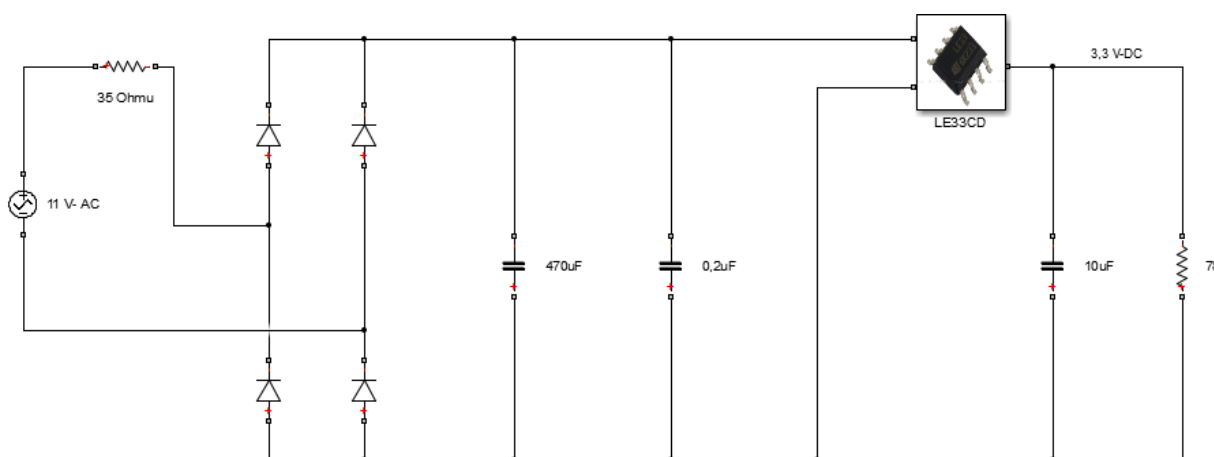
Lineárních regulátorů je na trhu obrovské množství. Byl zvolen lineární regulátor LE33CD. Jedná se o regulátor s pevným výstupním napětím. Který obsahuje tepelnou pojistku a zároveň má zpětnou vazbu na výstupní napětí, která zabrání kolísání výstupního napětí.

Regulátor může být spínán, ale tato funkce nebude využita. Proto bude její pin dle katalogového listu uzemněn. Výrobce pro tento regulátor uvádí i standartní zapojení:



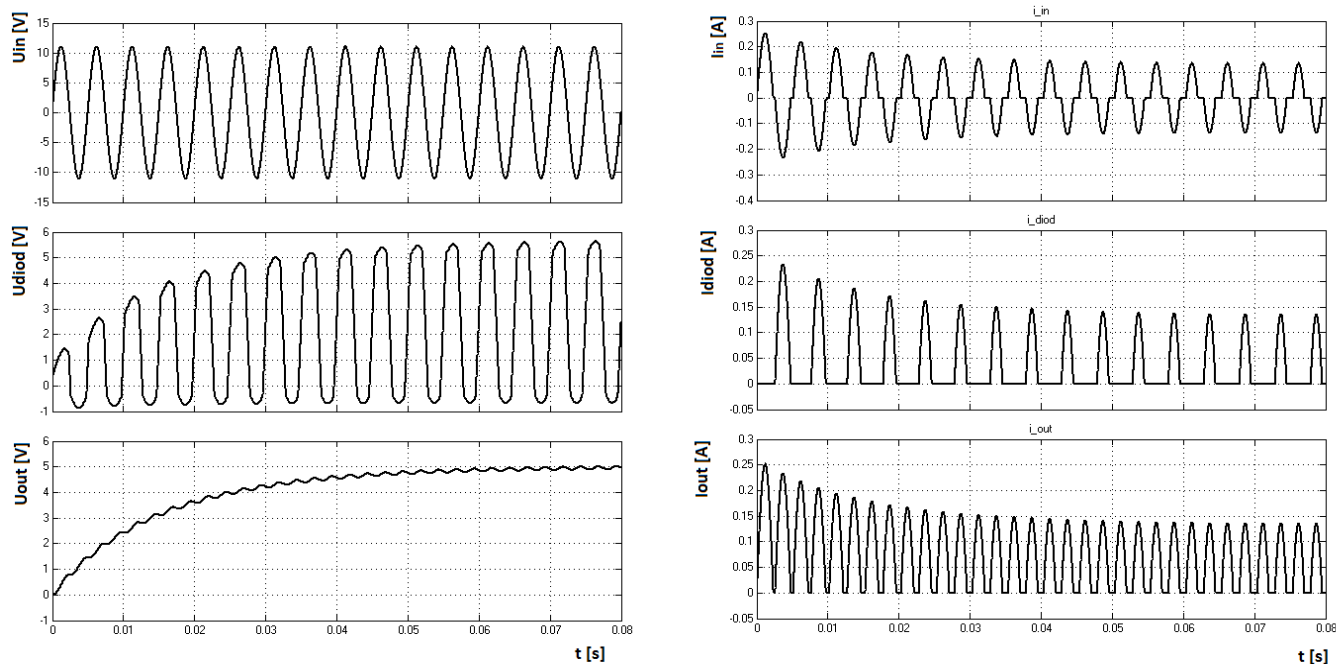
Obr. 27 Standartní zapojení regulátoru LE33CD

Výrobce uváděné schéma standartního zapojení obsahuje také dva kondenzátory sloužící k odfiltrování vysokofrekvenčního šumu. První kondenzátor má stejnou funkci jako přídavný kondenzátor avizovaný u dolní propusti a proto budou tyto dva kondenzátory nahrazeny jen jedním dle daného schématu:



Obr. 28 Schéma kompletního zapojení elektroniky

V schématu se pod maskou lineárního regulátoru skrývá pouze jednoduchý obvod, který slouží k přibližnému namodelování chování celého systému. Obvod, který je složen ze Zenerovy diody, tranzistoru a odporu, byl navržen podle standartního modelu obsaženého v Simulinku pod příkazem *elec_voltage_regulator_thermal*. Obvod je nastaven tak, aby na výstupu byla hodnota přibližně 3,3 V.



Obr. 29 Průběhy napětí a proudu při simulaci elektroniky

Na Obr. 29 jsou vidět průběhy napětí a proudu v obvodu. Levá část zobrazuje průběh napětí a pravá průběh proudu. První znázorňuje výstupy měřené na teoretickém zdroji střídavého napětí. Napětí v druhém řádku je měřeno za druhým filtračním kondenzátorem, což znamená, že jde o napětí vstupující do usměrňovače. Proud v druhém řádku je měřen před pravou horní diodou a zobrazuje proudové špičky v okamžicích kdy je dioda otevřená. Poslední řádek zobrazuje průběh napětí a proudu na zátěži. Z grafu je patrné, že hodnoty na zátěži přibližně odpovídají zadání a souhlasí s matematickým modelem použitým k návrhu v Matlabu. Použití lineárního regulátoru nicméně přineslo i vedlejší benefit. Primárním účelem regulátoru je držet na svém výstupu stabilní napětí 3,3 V. Benefitem je, že došlo i k dodatečnému vyhlazení vlnitosti až na hodnotu blízkou 0,2%.

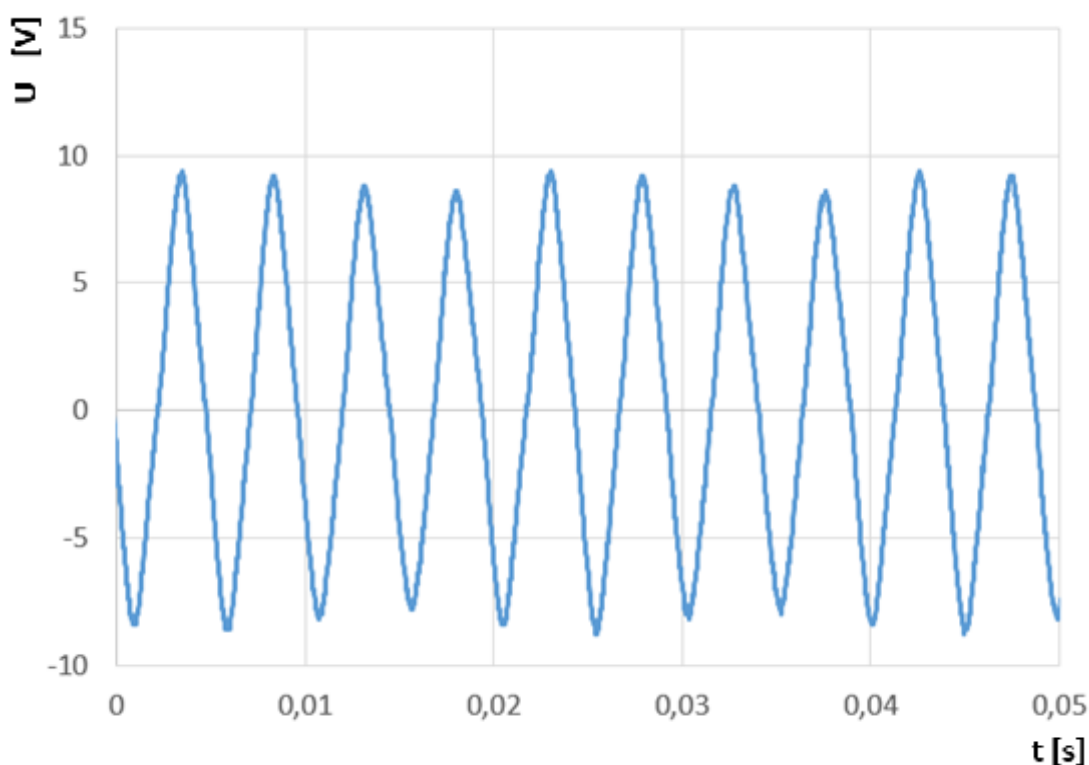
9. Experimentální prototyp

Bylo vyrobeno druhé experimentální zařízení. Místo hřídele s převlečkou byla použita kruhová tyč odpovídajících rozměrů. Jako pohon byl využit soustruh s plynule nastavitelnými otáčkami vřetene. Byla použita cívka se 140 závitů navinutá na hliníkovém nosníku, který byl následně připevněn na pojezd nožové hlavy pomocí k tomuto účelu vyrobeného přípravku. Požadovaná poloha cívky vůči magnetům byla v horizontálním směru nastavena pomocí mikrometrického posuvu. A ve vertikálním směru posunutím nosníku na upínacích prvcích. Soustruh byl roztočen na 3000 ot.min⁻¹. Elektronika byla připájena na univerzální integrovaný spoj a zakrytována.

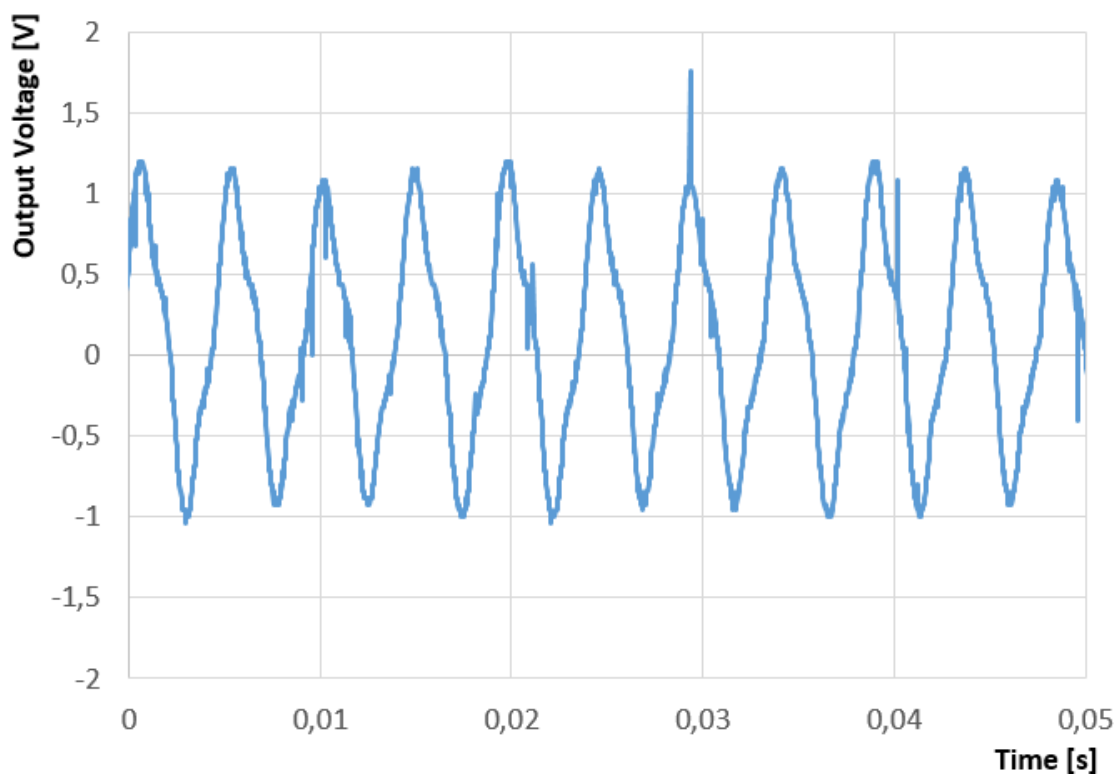
Funkčnost elektroniky byla částečně ověřena (především funkce regulátoru a správnost konfigurace spolu s kvalitou pájení) na regulovaném zdroji stejnosměrného napětí. Bylo zjištěno, že dochází k poměrně výrazným ztrátám na lineárním regulátoru, jelikož celým obvodem teče stejný proud 0,046 A a rozdíl napětí na vstupu a výstupu je přetvořen ve ztrátový výkon. Proto bylo jako alternativní řešení navrženo použití spínaného regulátoru TPS62175. Tento integrovaný obvod má 90% teoretickou účinnost při daném proudu 0,05A. Maximální proud na výstupu z regulátoru je tak 0,5 A. Výstupní napětí je nastavitelné pomocí odporového děliče na zpětné vazbě. Oproti předchozímu řešení, se tento obvod navenek jeví jako „mrtvý“ dokud nedosáhne minimální hodnoty napětí 4,75 V na vstupu, pak drží nastavené konstantní napětí na výstupu. Tento regulátorem byl osazen plošný spoj dle zapojení navrhnutého Ing. Janem Chalupou.

9.1. Výsledky měření na prototypu

Nejprve byla měřena cívka naprázdno a pak s připojenou zátěží. Zátěž je tvořena sériově zapojenými rezistory o celkovém odporu 72 Ω .

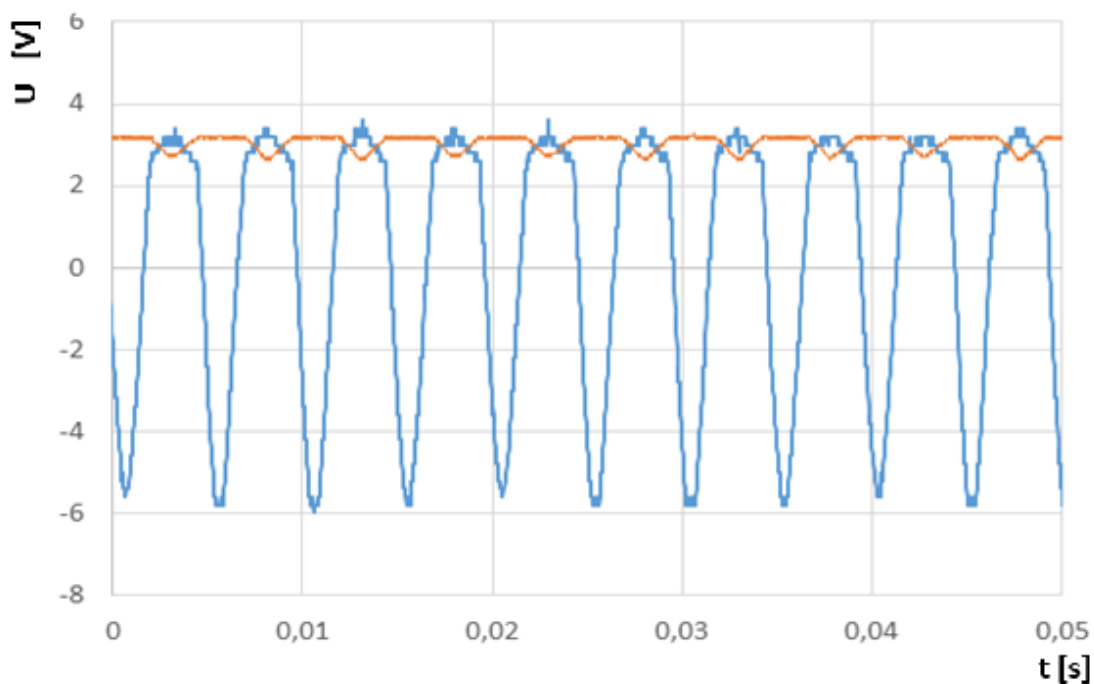


Obr. 30 Napětí na generátoru naprázdno

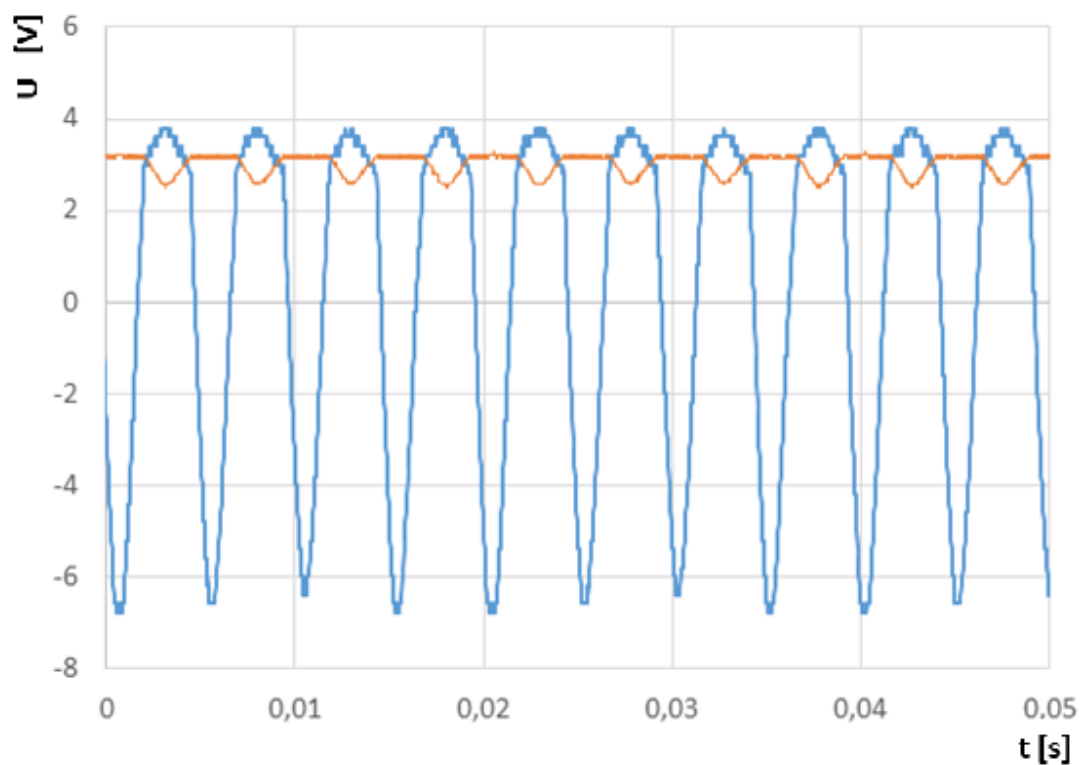


Obr. 31 Napětí dodávané generátorem po připojení zátěže

I přesto, že se měření bez zátěže se zdá být v pořádku, tak po připojení zátěže dojde k velmi výraznému poklesu napětí. Při amplitudě střídavého napětí oscilující okolo hodnoty 1,3 V. To značí, že nebude dostatečné napětí pro napájení výkonové elektroniky a také to evokuje podezření na částečný zkrat cívky. Výkonová elektronika byla nejprve připojena na generátor bez zátěže.



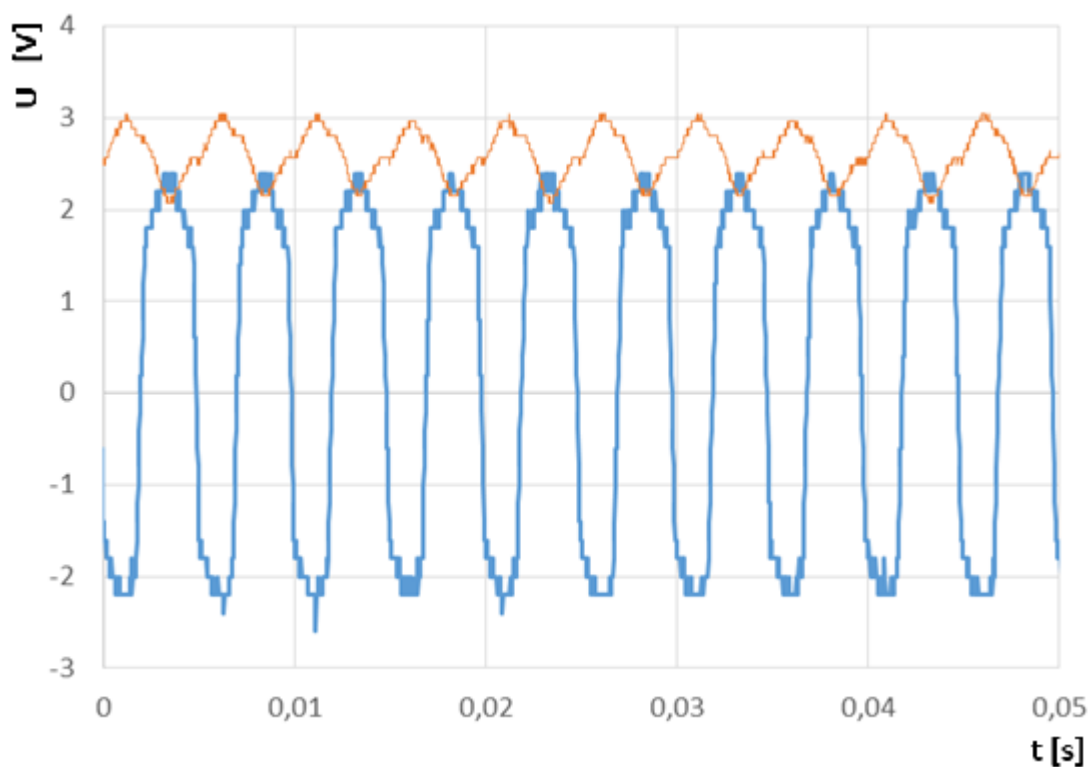
Obr. 32 Průběh napětí na výstupu z elektroniky (oranžová) a za generátorem (modrá) s lineárním regulátorem



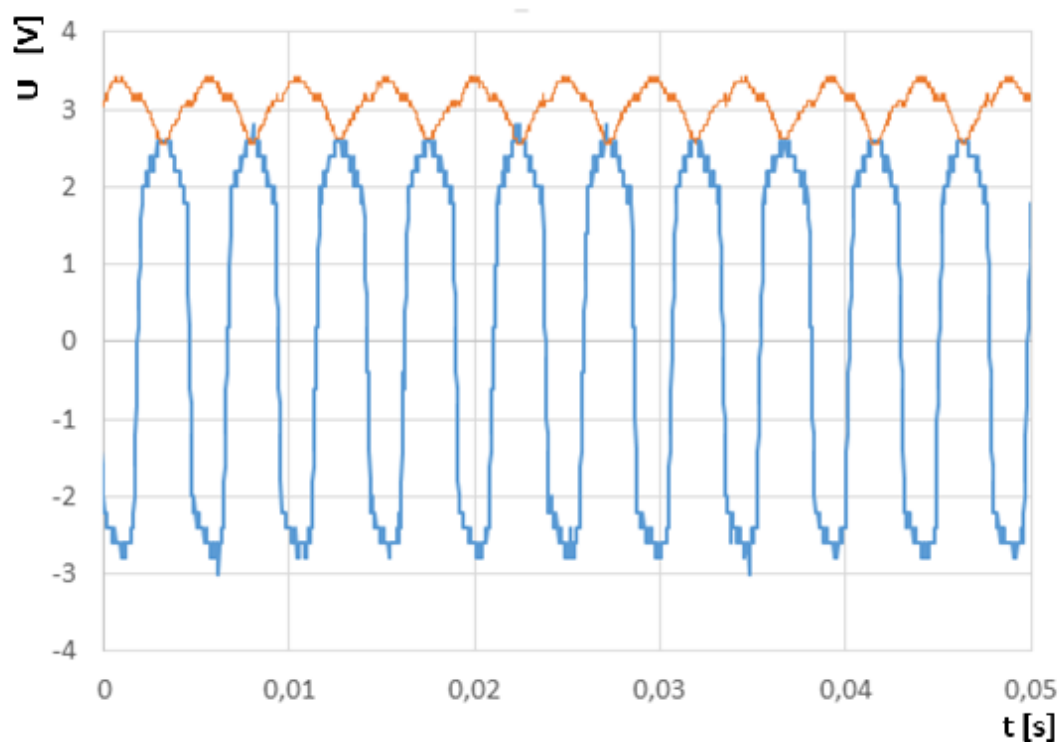
Obr. 33 Průběh napětí na výstupu z elektroniky (oranžová) a za generátorem (modrá) se spínaným regulátorem

Porovnání obou dvou navržených regulací vychází velmi podobně, u obou je patrné podobné zvlnění výstupního signálu spolu s patrným poklesem amplitudy vstupního napětí. Zdroj se tak jeví jako velmi měkký.

Při poslední etapě měření byla připojena zátěž.



Obr. 34 Průběh napětí na zátěži (oranžová) a za generátorem (modrá) s lineárním regulátorem



Obr. 35 Průběh napětí na zátěži (oranžová) a za generátorem (modrá) se spínaným regulátorem

Na měření se zátěží je patrné, že generátor není schopný poskytnout potřebnou energii pro nabití kondenzátoru a tím pádem správné fungování filtrace a regulátorů. I přesto je vidět, že byla dosažena hranice 3 V usměrněného napětí s částečně vyhlazeným průběhem. Také je patrné zlepšení oproti měření bez elektroniky se zátěží.

10. Zhodnocení konstrukcí

Při tvorbě modelu rotačního generátoru byly v podstatě aplikovány dva různé přístupy k řešení problému. Jedním bylo vyhodnocení simulací a pokusu na základě zkušeností a úvahy a druhým pak byl čistě matematický přístup optimalizace na základě zvolených kritérií. Oba tyto postupy byly iterační a oba poskytly přijatelné návrhy na řešení daného problému.

První zmíněný postup směřoval k výsledku, který je charakteristický cívkou s méně závitů a silnými magnety. K tomuto řešení bylo směřováno s myšlenkou toho, že rozdíly na rotačních částech generátoru v řádech několika gramů jsou pro celkový výkon motoru zanedbatelné a je výhodnější zaměřit se na konstrukci cívky s menším počtem závitů. Použití menšího počtu závitů by mělo mít pozitivní přínos na rychlost výroby cívky, a co je důležitější tak na její chlazení, jelikož je plánováno relativně vysoké proudové plnění. Při aplikaci tohoto přístupu bylo zjištěno, že nejvlivnějším parametrem s velkým dopadem jak na konstrukci, tak na výsledné parametry je hodnota normálové magnetické indukce na cívce a ta je určena především čtyřmi faktory. Těmito faktory jsou velikost a druh/síla magnetů, vzdálenost od horní hrany magnetu k horní hraně cívky a kvalita magnetického obvodu – podíl normálové složky magnetické indukce v celkové hodnotě magnetické indukce.

Tvar a druh magnetů je třeba volit s ohledem na nabídku výrobce, která i přesto, že je relativně pestrá, tak nepokrývá všechny možnosti. Rozměry magnetu jsou voleny prakticky jen na základě citu a dostupnosti magnetu v daném rozměru s co možná největší koercivitou a remanentní magnetickou indukcí.

Geometrie a uspořádání magnetického obvodu jsou pak plně v rukou konstruktéra. Velký pozitivní vliv na velikost magnetické indukce má použití jádra obloukového tvaru, který zajišťuje stálou mezeru mezi magnety a jádrem. Velikost jádra je zvolena tak, aby se magnetický obvod magnetu pod cívkou vždy uzavřel s dvěma sousedními magnety. Dalším přínosem jádra je absorpce prakticky celého magnetického toku a tím pádem odstínění horní části cívky, která proto nemusí být příliš vysoko nad funkční částí cívky

Dalším parametrem majícím dopad na celkovou konstrukci je tloušťka převlečky. Ta ovlivňuje vzdálenost magnetů od středu otáčení a tedy hodnotu obvodové rychlosti magnetů potažmo rychlost změny magnetického pole. Tento parametr by ale měl být co nejmenším, kdy spodním limitem je vyrobitelnost a únosnost převlečky. Při zvětšování vnějšího poloměru totiž dochází ke zbytečnému přidávání materiálu, na druhou stranu obvod převlečky určuje maximální počet a šířku magnetů, které se na ni vlezou.

Tím se dostáváme k počtu magnetů, který nemá přímý vliv na amplitudu generovaného napětí, ale určuje jeho frekvenci a tím ovlivňuje nejen velikost filtračního kondenzátoru a částečně i velikost vyfiltrovaného napětí za kondenzátorem. Řešení s osmi magnety bylo zvoleno jako kompromis popsanych parametrů. Při průměru neobrobené převlečky 30 mm se na ni vleze maximálně osm magnetů průřezu 5,5x2,5, které byly zvoleny především pro svou vysokou energetickou hustotu. Šířka cívky byla zvolena tak, aby jen lehce přesahovala šířku magnetu a byla na ní tak dosažena vysoká magnetická indukce, při které je potřeba výrazně méně závitů k dosažení požadované amplitudy napětí.

Amplituda napětí okolo 10V byla zvolena, tak aby vytvořila dostatečnou rezervu pro použití lineárního regulátoru a zajistila tak stabilní hodnotu výstupního napětí.

Oproti tomu přístup na základě optimalizace byl nastaven tak, aby byl minimalizován moment setrvačnosti rotačních částí při udržení amplitudy napětí na hodnotě deseti

voltů a na objem cívky tak byl kladen mnohem menší důraz. Při takto zvolených parametrech řešení inklinuje k magnetům se skoro čtvercovým průřezem a k cívice s výrazně menším poměrem výšky ku šířce s větším počtem závitů. Řešení díky tomu nedosahuje tak vysokých hodnot magnetické indukce, jako při předchozím přístupu, ale tento handicap je kompenzován větším počtem závitů a jejich rozložením do menšího počtu vrstev (nižší cívka). Je těžké objektivně posoudit, který z těchto přístupů je výhodnější a v konečném důsledku bude záležet na konkrétní aplikaci, anebo spíše na konkrétním zákazníkovi, které řešení upřednostní.

Pro oba přístupy byly zvolena vzduchová mezera 1 mm. Její velikost je závislá především na přesnosti výroby, předpokládaných vibracích a přesnosti montáže. Nutno podotknout, že při výrobě prototypu a následné montáži nebyla dosažena dobrá přesnost a to negativně ovlivnilo výsledky.

Přesnost výroby a montáže byla hlavním problémem při sestavování a experimentálním ověřování prototypu. Zatím co první prototyp generátoru byl relativně jednoduchý a jeho návrh nepočítal s velkou přesností výroby, druhý prototyp díky výběru z různých řešení a snaze o optimalizaci vykazuje velké nároky na výrobu a montáž. Příkladem může být právě velikost vzduchové mezery, nebo výška cívky a uspořádání závitů ve vrstvách. Problematickou se ukázala být také výroba cívky, kdy při ručním namotávání dochází k přeskokování závitů a porušování izolace drátu na obloukové hraně jádra. Cívka byla několikrát přemotávána. Proto, aby se předešlo prodírání, byl použit polyuretanový nátěr jádra i jednotlivých vrstev. Z výsledků experimentu je ale vidět, že pravděpodobně došlo k částečnému průrazu cívky. Tato skutečnost se špatně odhaluje, jelikož chování cívky při přeměření nemusí odpovídat jejímu chování v zátěži při experimentu, což je způsobeno pouze zeslabením nebo jen částečným poškozením izolačního laku. Zvýšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tím pádem i zvýšení magnetické síly mezi jádrem a magnety způsobovalo samovolné pohyby mikrometrického posuvu, který se proto musel aretovat šroubem a to v kombinaci se špatnou dostupností vzduchové mezery pro přeměření vedlo k pravděpodobnému zvýšení velikosti vzduchové mezery. Všechny tyto faktory měly vliv na zhoršení výsledků experimentu, podle kterých by se mohlo zdát, že první prototyp je lepší než druhý. Bohužel průraz cívky byl odhalen až při zpracování výsledků a nebylo možno opakovat měření.

I přesto mají naměřené hodnoty vypovídající hodnotu. Je zřejmé, že daný koncept generátoru funguje a při použití elektroniky je patrná snaha regulátoru a kondenzátoru udržet stabilní napětí na požadované úrovni. Proto je možné považovat experiment za důkaz funkčnosti celého systému i přesto, že je potřeba vylepšit technologii výroby a montáže.

11. Závěr

Byla provedena rešerše zdrojů energie a na základě dostupnosti různých forem energie v ocasní části vrtulníku a především na základě požadovaného výkonu 150 mW byl jako nejlepší řešení vybrán rotační generátor s permanentními magnety. Bylo zvoleno řešení s větším počtem rotujících magnetů a jednou statickou cívkou s jádrem. Toto řešení bylo vybráno především kvůli menší složitosti celé konstrukce a jednodušší montáži ve srovnání s klasickým řešením, při kterém jsou permanentní magnety statické a v jejich magnetickém poli rotuje cívka.

Dále byl sestaven model magnetického pole daného problému v software Femm a poté vytvořen analytický návrh cívky v programu Matlab. Tyto modely byly použity k simulaci výsledných vlastností generátoru pro různé konstrukční řešení. Při simulaci různých konstrukcí byly demonstrovány základní vazby mezi jednotlivými parametry generátoru. Těchto poznatků bylo následně využito při optimalizační studii, která si kladla za cíl ještě více ozřejmit tyto vztahy a najít řešení, které by co nejméně zatěžovalo hřídel sekundárního rotoru při zachování vyhovujících parametrů generátoru.

Jelikož generátor dodává střídavé napětí a požadován byl stejnosměrný výstup, byla tak v další části práce navržena elektronika pro usměrnění a regulaci výstupního napětí generátoru. Prvotní návrh elektroniky byl proveden s důrazem na jednoduchost řešení za použití minima elektronických prvků. Jako alternativa k tomuto návrhu byl posléze zvolen sofistikovanější přístup s menšími ztrátami, ale za použití komplikovanější elektronické struktury.

V průběhu práce byly sestaveny dva prototypy generátoru. První měl prokázat správnost zvoleného postupu a použitelnost rotačního generátoru pro tuto aplikaci. Druhý byl pak sestaven pro demonstraci celkového řešení i s usměrněním a regulací.

Bylo zjištěno, že je důležité dodržet navrhnuté rozměry, což se především pro velikost vzduchové mezery a cívky ukázalo jako velmi problematické. Při navíjení cívky došlo několikrát k částečnému prodření izolace drátu a obtížné bylo i dosáhnout přesného rozložení drátů do vrstev. Pro vzduchovou mezeru je kritická souosost statoru a rotoru a také přesnost rozložení magnetů. V neposlední řadě hraje roli i nastavení mezery pomocí mikrometrického posuvu, které díky magnetickým silám mezi rotorem a jádrem cívky není tak přesné jak by bylo potřeba. Při špatném zapojení elektroniky, anebo při přílišném snížení velikosti vzduchové mezery pak dochází k okamžité destrukci cívky potažmo magnetů. I přes zmíněné problémy měření prokázala, že zvolené řešení je velmi variabilní a splňuje všechny požadavky. Pro budoucí komerční využití je však třeba specifikovat způsob výroby jednotlivých komponent a upravit postup montáže.

12. Literatura

- [01] LAND, James E. *2001 IEEE Aerospace Conference: HUMS - The Benefits - Past, Present and Future*. Piscataway, N.J: IEEE, 2001. ISBN 07-803-6599-2.
- [02] SNYDER, G. Jeffrey a Eric S. TOBERER. Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*. 2008, **7**(2), 105-114. DOI: 10.1038/nmat2090. ISSN 1476-1122. Dostupné také z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nmat2090>
- [03] BIRKHOLZ, Mario. Crystal-field induced dipoles in heteropolar crystals I: Concept. *Zeitschrift fur Physik B Condensed Matter*. 1995, **96**(3), 325-332. DOI: 10.1007/BF01313054. ISSN 0722-3277. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF01313054>
- [04] IVÁNEK, Lubomír a Stanislav ZAJACZEK. *Elektromagnetismus*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1486-5.
- [05] *Finite Element Method Magnetism* [online]. Waltham: QinetiQ North America, 1998 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [06] MEEKER, David. *Finite Element Method Magnetism: OctaveFEMM*. Waltham, 2013. Dostupné také z: <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>
- [07] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [08] DEF STAN 00-970. *Health and Usage Monitoring Systems*. United Kingdom: Ministry of Defence, 1988.
- [09] HOW DO THERMOELECTRICS WORK? *Power practical* [online]. Salt Lake [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <https://powerpractical.com/pages/how-do-thermoelectrics-work>
- [10] 176-1987. *IEEE Standard on Piezoelectricity*. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society, 1988.
- [11] IEEE Standard on Piezoelectricity. In: *ANSI/IEEE Std* [online], 1988, s. 176-1987 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1109/IEEESTD.1988.79638. ISBN 0-7381-2411-7. ISSN. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/opacstd.jsp>
- [12] KAZEMI, Alex A., Bernard C. KRESS, Edgar A. MENDOZA, Cornelia KEMPEN, Sunjian SUN a Yan ESTERKIN. Light weight, high-speed, and self-powered wireless fiber optic sensor (WiFOS) structural health monitor system for avionics and aerospace environments. In: *Photonics Applications for Aviation, Aerospace, Commercial, and Harsh Environments*. San Diego: Redondo Optics Inc., 2014, 92020L-. DOI: 10.1117/12.2064343. Dostupné také z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2064343>
- [13] Magsy, s. r. o.: Vše o magnetech. *Magsy* [online]. Zlín: Magsy, 2015 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://e-shop.magsy.cz/>
- [14] HADAS, Zdenek, Vojtech VETISKA, Rostislav HUZLIK a Vladislav SINGULE. Model-based design and test of vibration energy harvester for aircraft application. *Microsystem Technologies*. 2014, **20**(4-5), 831-843. DOI: 10.1007/s00542-013-2062-y. ISSN 0946-7076. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00542-013-2062-y>

- [15] KURFURST, J. *Optimalizace stroje s permanentními magnety na rotoru pomocí umělé inteligence*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 132s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [16] FIALA, P. a P. DREXLER. Power supply sources based on resonant energy harvesting. *Microsystem Technologies*. 2012, **18**(7-8), 1181-1192. DOI: 10.1007/s00542-012-1474-4. ISSN 0946-7076. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00542-012-1474-4>
- [17] *Review of helicopter airworthiness*. London: Civil Aviation Authority, 1984. ISBN 0-86039-213-9. ISSN.
- [18] VLACH, Radek. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4.
- [19] *Wireless Sensor Units for HUMS Data Acquisition* [online]. Brno: Honeywell Aerospace Advanced Technology, 2015 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.honeywellonramp.com/TechnicalResources/Pages/default.aspx>

13. Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Popis	Jednotka
.dxf	Univerzální CAD formát	-
.mfile	Formát skriptů pro Matlab	-
A	Plocha závitu	m ²
ACMWADAS	Aircraft Condition Monitoring System and Aircraft DataAcquisition System	-
ad	Dostředivé zrychlení působící na magnet	m.s ⁻²
AIDS	Aircraft Integrated Data System	-
B	Magnetická indukce	T
b _e	Elektromagnetické tlumení	-
b _m	Tloušťka magnetu	m
B _n	Normálová složka magnetické indukce	T
B _r	Remanence	T
C	Kapacita	F
CAD	Computer aided design	-
C _n	N-tý váhový koeficient	-
d	piezoelektrická nábojová konstanta	m.V ⁻¹
D	Průměr kružnice vepsané magnetům	m
D _{Cu}	Průměr drátu cívky	m
F _e	Magnetická síla	N
Fem	Metoda konečných prvků	-
Femm	Program pro řešení modelů pomocí Fem	-
f _h	frekvence otáčení hřídele	Hz
f _i	frekvence indukovaného napětí	Hz
F _o	odstředivá síla působící na magnet	N
g	piezoelektrická napěťová konstanta	V.m.N ⁻¹
H _c	Koercivita	H
h _c	Tloušťka cívky	m
HHMAG	Health Monitoring Advisory Group	-
HUMS	HEALTH AND USAGE MONITORING SYSTEM	-
I	Proud	A
I _k	proud nakrátko	A
I _z	Proud protékající zátěží	A
J	Proudové plnění drátu cívky (všechny případy vyjma str. 36-38)	A.mm ⁻²
J	Moment setrvačnosti (str. 36 - 38)	kg.m ⁻²
k	Coupling faktor	-
L	Indukčnost cívky	H
lc	Délka funkční části závitu cívky	m
li	Délka i-tého členu	m
lm	Délka magnetu	m
m	Hmotnost	kg
N	Počet závitů	-
n	Otáčky	s ⁻¹
N _v	Počet vrstev cívky	-

Nzv	Počet závitů v jedné vrstvě cívky	-
P	Elektrický výkon	W
P _z	Elektrický výkon na zátěži	W
PVDF	polyvinilidenefluorid	-
PZT	piezokeramika na bázi oxidů zirkonu a titanu	-
r	poloměr kružnice rovný součtu poloměru kružnice vepsané magnetům s tloušťkou magnetu	m
R ₀	Odpor při pokojové teplotě	Ω
R _c	Odpor vodivé části termoelektrického generátoru	Ω
R _i	Vnitřní odpor cívky	Ω
R _T	Změna odporu při změně teploty	Ω
R _z	Odpor zátěže	Ω
s _c	Šířka cívky	m
s ^E	Elastická poddajnost při konstantním elektrickém poli	m ² .N ⁻¹
S _i	Plocha průřezu i-tého členu	m ²
s _m	Šířka magnetu	m
SOMA	Samo Organizující se Migrační Algoritmus	-
t	Čas	s
T _h	teplota horkého konce termoelektrického generátoru	°C
T _i	perioda indukovaného napětí	s
U	Amplituda napětí	V
U _{cz}	Ztrátové napětí na cívce při průchodu daného proudu	V
U _i	Efektivní hodnota napětí ideálního zdroje	V
U _{ic}	Efektivní napětí dodávané generátorem při průchodu daného proudu	V
U _{iz}	Ztrátové napětí generované na cívce	V
U _w	Odečtená amplituda střídavé složky usměrněného napětí	V
U _z	Napětí na zátěži	V
v	obvodová rychlost	m.s ⁻¹
val	Hodnota ohodnocovací funkce	-
X	Parametr ohodnocovací funkce	-
X _d	Požadovaná hodnota parametru	-
X _r	Referenční hodnota parametru	-
zT	Merit	-
α	úhel mezi normálou plochy A a vektorem magnetické indukce B (všechny případy vyjma str. 8 a 9)	°
α	Seebeckův koeficient (str. 8, rov. 9, 10; str.9 rov. 13, 14)	V.K ⁻¹
α	Teplotní součinitel odporu (str. 9, rov. 12)	-
ΔT	Teplotní rozdíl	-
ϵ^T	Permitivita materiálu při konstantním zatížení	F.m ⁻¹
η	Účinnost	-
κ	Tepelná vodivost	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

μ	Permeabilita materiálu	$F \cdot m^{-1}$
μ_0	Permeabilita vakua	$F \cdot m^{-1}$
μ_r	Relativní permeabilita	-
π	Ludolfovo číslo	-
ρ_{Cu}	Měrný elektrický odpor mědi	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$
ρ_i	Měrný elektrický odpor i-tého členu	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$
τ	Časová konstanta	s
φ	Magnetický tok	Wb
Φ	Celkový magnetický tok	Wb
ϕ_w	Vlnitost usměrněného napětí	-
ω	úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$

