VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VIBRAČNÍ GENERÁTOR PRO LETECKÉ APLIKACE

VIBRATION HARVESTER FOR AIRCRAFT APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — ONDŘEJ RUBEŠ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Rubeš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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 bakalářské práce:

Vibrační generátor pro letecké aplikace

v anglickém jazyce:

Vibration Harvester for Aircraft Applications

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pracoviště spolupracuje v rámci projektu ESPOSA na zdroji energie pro bezdrátový senzor v leteckém průmyslu. S tímto projektem vzešel požadavek na vývoj pokud možno nevyčerpatelného zdroje elektrické energie pro tuto aplikaci. Jednou z možností napájení je využití energie vibrací ke generování elektrické energie a autonomnímu napájení tohoto systému.

Cíle bakalářské práce:

1. Vypracujte analýzu současného stavu autonomních elektronických aplikací v leteckém průmyslu.
2. Navrhněte parametry vhodné koncepce konstrukčního řešení generátoru dle požadavků na aplikaci.
3. Využitím simulačního modelování analyzujte množství generované energie a analyzujte výkonové požadavky na aplikaci.
4. Navrhněte konstrukci finálního funkčního vzorku generátoru.

Seznam odborné literatury:

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

Hadaš, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.

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

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na úpravu konstrukčního návrhu vibračního generátoru pro autonomní letecké aplikace. Vibrační generátor je zařízení pro přeměnu energie vibrací na elektrickou energii. Jeho hlavní části jsou kmitající hmota, magnety a cívka pro elektromagnetickou indukci. Součástí práce je modelování magnetických obvodů generátoru, vytvoření 3D modelu generátoru a modelování kmitů generátoru s parametry získanými z 3D modelu, magnetických simulací a se zadaným vzorkem budících vibrací.

Abstract

This thesis is focused on modification of a design proposal of a vibration energy harvester for autonomous aircraft applications. Vibration energy harvester is mechanism, which converts vibration energy to electric energy. Its main parts are oscillating mass, magnets and coil for electromagnetics induction. The thesis is consisted of simulations of magnetics circuits, creating 3D model of harvester and simulations of oscillations with parameters from 3D model, magnetics simulations and with input sample of exciting vibrations.

Klíčová slova

Vibrační generátor, energy harvesting, magnetický obvod, elektromagnetická indukce, kinematické buzení, Femm, Matlab, Simulink, 3D CAD model;

Key words

Vibration energy harvester, energy harvesting, magnetic circuit, electromagnetics induction, kinematics excitation, Femm, Matlab, Simulink, 3D CAD model;

RUBEŠ, O. *Vibrační generátor pro letecké aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Já, Ondřej Rubeš, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Vibrační generátor pro letecké aplikace vypracoval samostatně, s radami vedoucího práce Ing. Zdeňka Hadaše, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré použité zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2014

……...
Ondřej Rubeš

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D., za vstřícný přístup v průběhu tvorby této práce a za jeho cenné rady a připomínky. Rovněž bych chtěl poděkovat svojí drahé manželce, se kterou jsme se vzájemně podporovali při tvorbě našich bakalářských prací.

Obsah

1 Úvod 9
2 Motivace a cíle práce 10
3 Autonomní elektronické aplikace v leteckém průmyslu 11
3.1 Projekt WISE – Integrated wireless sensing 11
3.1.1 Stanovené cíle 11
3.1.2 Výsledky 12
3.2 Projekt ADVICE – Autonomous damage detection and vibration control systems 13
3.2.1 Stanovené cíle 13
3.2.2 Výsledky 13
3.3 Projekt ESPOSA 15
3.3.1 Stanovené cíle 15
3.4 Problematika autonomních aplikací v leteckém průmyslu 15
3.4.1 Zařazení do kontextu leteckého průmyslu 15
3.4.2 Bezdrátová komunikace 16
3.5 Získávání energie z okolí 18
4 Koncepce vibračního generátoru 19
4.1 Podstata elektromagnetického vibračního generátoru 19
4.1.1 Elektromagnetická indukce 19
4.1.2 Kmitání hmoty 21
4.1.3 Proces přeměny energie 22
5 Nástroje pro návrh generátoru 24
5.1 Femm 24
5.2 Matlab 25
5.3 Simulink 25
5.4 SolidWorks 25
6 Úprava konstrukčního řešení generátoru 26
6.1 Torzní tuhost 26
6.1.1 Původní řešení 27
6.1.2 Nová koncepce torzní tuhosti 27
6.1.3 Model magnetů torzní tuhosti 28
6.1.4 Volba magnetů dle požadavků na torzní tuhost 30
6.2 Magnetický obvod pro elektromagnetickou indukci 31
6.3 Postup návrhu celého magnetického obvodu 32

6.3.1 Model magnetů pro tuhost ... 32
6.3.2 Model magnetů pro elektromagnetickou indukci ... 33
6.3.3 Model celého magnetického obvodu ... 34
6.4 Návrh konstrukce ... 36
7 Simulace generátoru se zadaným buzením ... 38
7.1 Model generátoru v programu Simulink ... 38
7.2 Vstupní parametry ... 39
7.2.1 Počet závitů cívky a její odpor ... 40
7.3 Simulace jednotlivých cívek ... 41
8 Finální návrh konstrukce pro výrobu ... 43
8.1 Konstrukční alternativy ... 43
8.1.1 Úprava pro obrábění ... 43
8.1.2 Kombinace obrábění a lepení ... 43
8.1.3 Uzavření magnetického obvodu pouze pro budicí magnety ... 44
8.1.4 Volba vhodné alternativy ... 44
8.2 Finální úpravy konstrukce ... 44
8.2.1 Model pohyblivého ramene ... 45
8.2.2 Model pevného rámu ... 46
8.3 Simulace finální konstrukce se zadaným buzením ... 47
8.4 Porovnání navržených konstrukcí ... 48
9 Závěr ... 49
10 Seznam použitých zdrojů ... 50
11 Seznam obrázků ... 53
12 Seznam příloh ... 54

1 Úvod

Alternativní zdroje energie - [1], rekuperace - [2], energy harvesting - [3]. To jsou pojmy, které v posledních letech zaznívají stále častěji. Je vyvíjen neustálý tlak na zvyšování efektivity a snižování ekologické zátěže. Společnosti se předhání v promile účinnosti, státy se zavazují k plnění emisních norem.

Ne vždy se ovšem jedná o krok správným směrem. Článek [4] například ukazuje, jak solární elektrárny způsobují problémy s kolísáním napětí v síti. Jak taková plantáž panelů dokáže zohyzdit přírodu, už se nejspíš každý přesvědčil sám. Jistě je potřeba hledat alternativní zdroje energie, avšak vždy s ohledem na okolí, aby opravdu přispívaly ke zlepšení životního prostředí.

Obdobným příkladem je rekuperace v automobilech. Ve městě jistě sníží spotřebu, ale není spíše problém v tom, že lidé jezdí autem zbytečně mnoho? Tráví hodně času v práci, aby si vydělali na nové auto, kterým potom všude jezdí, jinak by nestíhali práci. Paradox, který zatěžuje přírodu a ničí nám zdraví. Jistě lze namítnout, že toto zamyšlení by patřilo spíše do sociologického či psychologického přemítání, avšak i technik by se měl zamyslet, čím má jeho práce přispět společnosti.

Energy harvesting, tedy jakýsi sběr okolní energie, se od předchozích dvou liší zpravidla tím, že není výkonové povahy. Jedná se často o výkony v řádu miliwattů, které mají za cíl napájení zařízení, pro které bychom měli těžko dostupný konvenční zdroj napájení, jako jsou například různé mikrosenzory v těžko přístupných místech nejrůznějších strojů a zařízení. Do této kategorie spadá také vibrační generátor, jehož návrhu je věnována tato práce.

Vibrační generátor je tedy zařízení pro přeměnu energie vibrací na energii elektrickou. Jeho součástí je pevný rám, kterým je generátor připevněn k okolní konstrukci. Dále má generátor kmitající hmotu, zpravidla rotačně uložené rameno. Tato kmitající hmota je buzena okolními vibracemi a díky přítomnosti cívky v magnetickém poli zde probíhá elektromagnetická indukce. Mezi pevným rámem musí být rotační vazba, vazba vytvářející tuhost, magnety a cívka. Návrhem těchto částí se budeme v této práci zabývat.

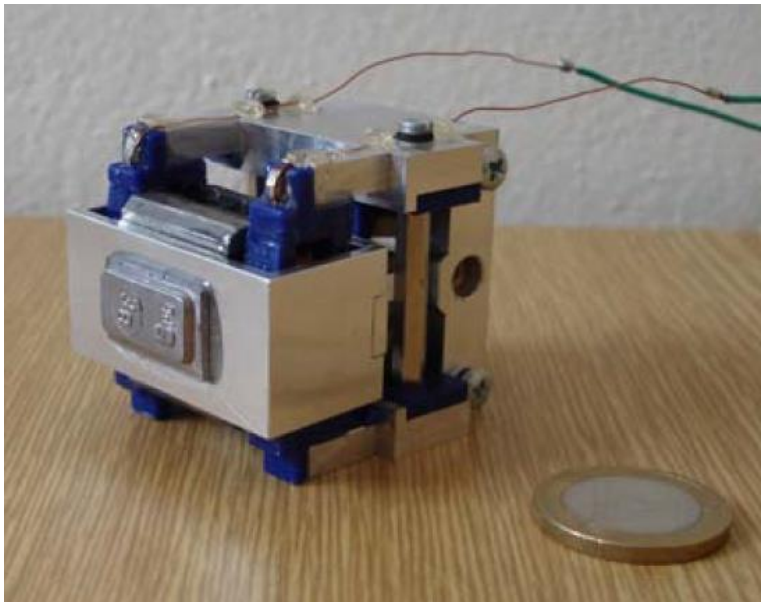
2 Motivace a cíle práce

Na VUT jsou již několik let vyvíjeny vibrační generátory, a to jak elektromagnetické, tak i piezoelektrické. Od zveřejnění prvního článku [5] vzniklo mnoho měření, prototypů a dalších článků. Na generátorech se pracovalo v rámci projektu WISE [6] a v současné době v rámci projektu ESPOSA [7]. Vývoj stále nedosáhl pomyslného vrcholu, ze kterého se již nejeví další cesta, ale stále nabízí mnoho zlepšení. Stále se nabízí možnosti odlehčování, lepšího využití hmoty, tedy hledání synergie v konstrukci.

Cílem této práce je pokračovat ve vývoji generátoru až ke konečnému návrhu funkčního prototypu. Zadání stěžejních parametrů generátoru vzešlo z projektu ESPOSA a jsou jimi:

- Hmotnost maximálně 150g.
- Zadaný vzorek budících vibrací, ze kterého byla vybrána frekvence 31,2Hz.
- Co největší výstupní výkon.

Návrh vychází z generátoru, vytvořeného v rámci projektu WISE, který měl vlastní frekvenci kmitů 17 Hz a hmotnost 140 g [8].



Obr. 1: Výchozí 17Hz generátor [8]

Hmotnost je tedy odpovídající, avšak zásadní bude změna vlastní frekvence. Ta je dána tuhostí i momentem setrvačnosti. Návrh tedy bude muset probíhat paralelně – jedná se tedy o mechatronický přístup. Navíc se bude muset ověřit vhodná volba cívky a jejích budicích magnetů, které taktéž zasahují do tuhosti – bude se tedy jednat o velice komplexní úlohu.

3 Autonomní elektronické aplikace v leteckém průmyslu

Autonomní elektronické aplikace se v leteckém průmyslu začaly rozvíjet až v posledních letech. V tomto odvětví je kladen zvýšený důraz na spolehlivost, takže nové systémy se zde zavádí s velkou opatrností. Autonomní elektronická aplikace je systém, který musí využívat lehké nízkopříkonové součásti, u kterých často není zaručena dostatečná spolehlivost. Je tedy logické, že takový systém je potřeba dovést na vysokou úroveň a podrobit dlouhému testování, pokud má obsluhovat nějakou důležitou funkci. Na druhé straně je v dnešní době stálý tlak na automatizaci, zvyšování efektivity, komfortu nebo prodlužování servisních intervalů. To všechno jsou aspekty, které tlačí vývoj takovýchto systémů kupředu.

V této kapitole se zaměříme na významné projekty, které se problematikou autonomních elektronických aplikací zabývaly, ať už přímo, nebo jen okrajově. Pro dobrý přehled budou vždy uvedeny základní informace o projektu (období výzkumu, zasazení projektu do prostředí, vedoucí organizace a další zapojené organizace), stanovené cíle a výsledky projektu.

Dobré pojednání o vývoji problematiky v posledních letech přináší publikace [9], jejímž poznatkům se budeme věnovat dále. Pro celkový přehled o situaci doplníme další dílčí výzkumy, zkoušky nebo pokusy o realizaci autonomních elektronických aplikací.

3.1 Projekt WISE – Integrated wireless sensing

- 2005 - 2008
- Tento projekt probíhal v rámci 6. rámcového programu EU.
- Probíhal pod vedením Dessault Aviation a bylo do něj zapojeno několik evropských firem a univerzit, včetně brněnského VUT.

3.1.1 Stanovené cíle

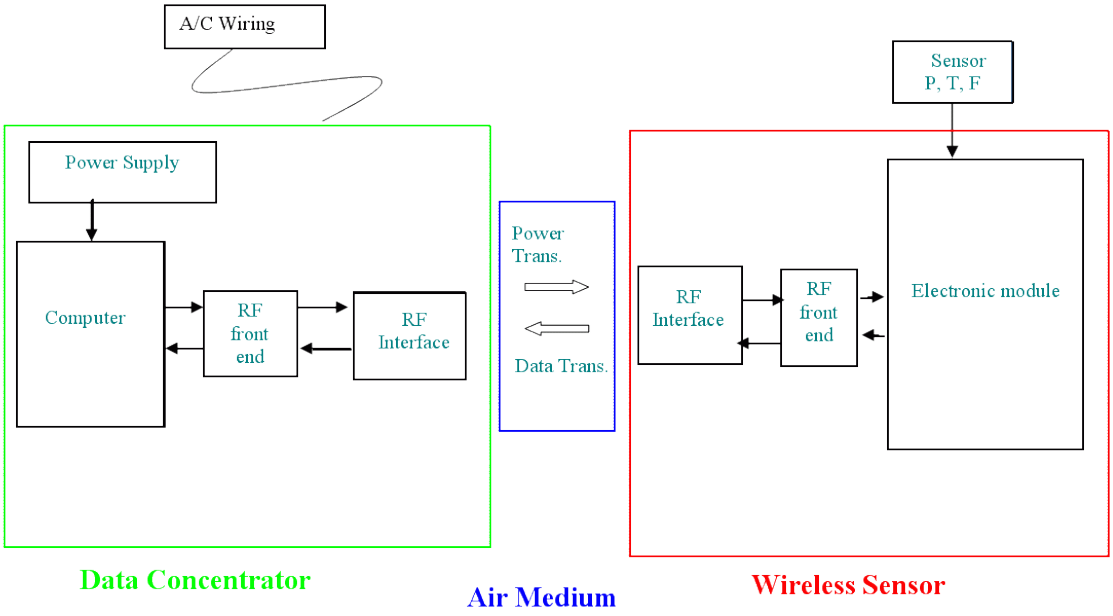
Projekt WISE [10] vycházel z aktuální situace, kdy jsou všechny senzory připojeny pomocí kabelů. Toto spojení je principiálně jednoduché a spolehlivé, ovšem při větším množství senzorů začneme narážet na problémy. Jedním z nich je množství kabelů, které s sebou nese zvýšení hmotnosti a také určitou nepřehlednost. Nabízí se sice využití uzlových bodů, ve kterých by se stýkaly kabely vedoucí od skupiny senzorů a dále by byl signál veden jen jedním kabelem (stejně tak napájení). Toto řešení je však jen částečné a vůbec neřeší problém prostorů, v nichž bychom rádi provedli měření, ovšem není možné sem kabeláž z nejrůznějších důvodů přivést.

Stávající bezdrátová řešení byla taktéž omezena. V první řadě to byla energetická soběstačnost – senzor a vysílač musí být napájeny kabelem, což prakticky zcela kazí zamýšlené odstranění kabelů, na jejich pouhou redukci na kabely napájecí. Další

možnost napájení je z baterie, která však musí být dobíjena, což by kladlo vysoké požadavky na údržbu po každém letu, nemluvě o těžko přístupných místech.

Vznikl tedy cíl vytvořit elektronickou jednotku senzoru a vysílače, která by s palubním systémem komunikovala bezdrátově. Napájení by bylo realizováno bezdrátově, pomocí krátkých vln, nebo s využitím energy harvesting, a jednotka by tedy byla zcela autonomní. Vznikly 3 základní problémy, které si projekt kladl za cíl vyřešit:

- Napájení zařízení pomocí elektromagnetických vln na krátkou vzdálenost v otevřeném prostředí spolu s bezdrátovou komunikací, viz Obr. 2
- Vysílání informací na bázi elektromagnetických vln uvnitř celého letadla. V rámci tohoto bodu se také uvažovalo o vlastním zdroji napájení.
- Vysílání informací s využitím skeletu letadla – např. ultrazvukové vlny přenášené za pomoci kovového pláště letounu



Obr. 2: Bezdrátové napájení senzoru a jeho komunikace s přístupovým bodem [6]

3.1.2 Výsledky

Zlepšení monitorování letounu za pomoci bezdrátového přenosu a autonomních senzorů s menší spotřebou: této nižší spotřeby lze samozřejmě využít i u stávajících systémů. Díky těmto senzorům bude možné monitorovat i místa, u kterých to dříve nebylo možné. Odstraní se, nebo alespoň zredukuje množství kabelů. To jsou ostatně výsledky, které si projekt kladl za cíl. V konkrétních problémech bylo dosaženo těchto výsledů:

- Bezdrátové napájení fungovalo bez problémů s výjimkou vysokých teplot (testovaný extrém 125°C) nebo prudkých výkyvů teplot. Autoři projektu se domnívají, že tento problém by se dal lehce odstranit dalším vývojem.
- Bezdrátový přenos informací se ukázal jako použitelný, bez závislosti na teplotě. Testování vlastního zdroje napájení z okolních vibrací bylo taktéž úspěšné.

- Přenos pomocí ultrazvukových vln v konstrukci letadla byl funkční, ovšem s mnoha dalšími omezeními.

Z tohoto projektu lze vyvodit závěr, že použití bezdrátových technologií je jistě dobrou cestou, avšak stále je zde množství problémů, které je potřeba řešit.

3.2 Projekt ADVICE – Autonomous damage detection and vibration control systems

- 2006 – 2009
- Tento projekt probíhal v rámci 6. rámcového programu EU.
- Vedení projektu bylo svěřeno Belgickému leteckému ústavu a na projektu spolupracovala desítka evropských firem a univerzit.

3.2.1 Stanovené cíle

Projekt ADVICE [11] si kladl za cíl vytvořit systém, který by sloužil zároveň pro tlumení vibrací a vyhodnocování poškození konstrukcí letadel a vrtulníků. Z pohledu této bakalářské práce je důležitý fakt, že nešlo pouze o vytvoření samostatného kusu, ale o záměr vytvořit celou síť, komunikující pomocí bezdrátové technologie a s vlastním zdrojem energie. Na celou problematiku bylo navíc pohlíženo velice komplexně. Dalo by se v tomto případě hovořit o dobré ukázce mechatronického přístupu k problematice. Projekt byl strukturován do 4 pracovních celků:

- Určení měřených veličin a vyvození požadavků na autonomní měřící systém, stanovení hodnotících kritérií a testovacích podmínek.
- Návrh měřících zařízení a návrh struktury sítě.
- Zprovoznění komunikačního systému a systémová integrace.
- Podrobné analýzy.

3.2.2 Výsledky

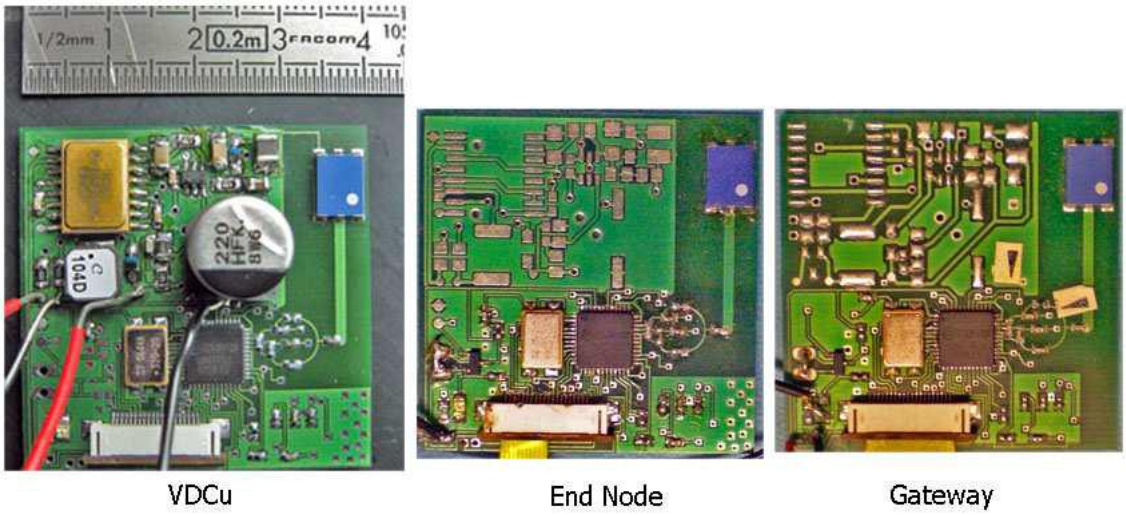
Projekt musel být prodloužen o 9 měsíců z důvodu komplikace při vývoji elektroniky, a během testování se navíc vyskytly problémy v komunikaci. Tato skutečnost ukazuje na fakt, že zvládnutí správné konfigurace sítě není lehké. Více o této problematice bude řečeno v kapitole 3.4.2.

Závěrečná zpráva [12] popisuje vytvořený systém komponentů pro autonomní komunikaci na palubě letadla. Hlavní komponenty jsou tyto:

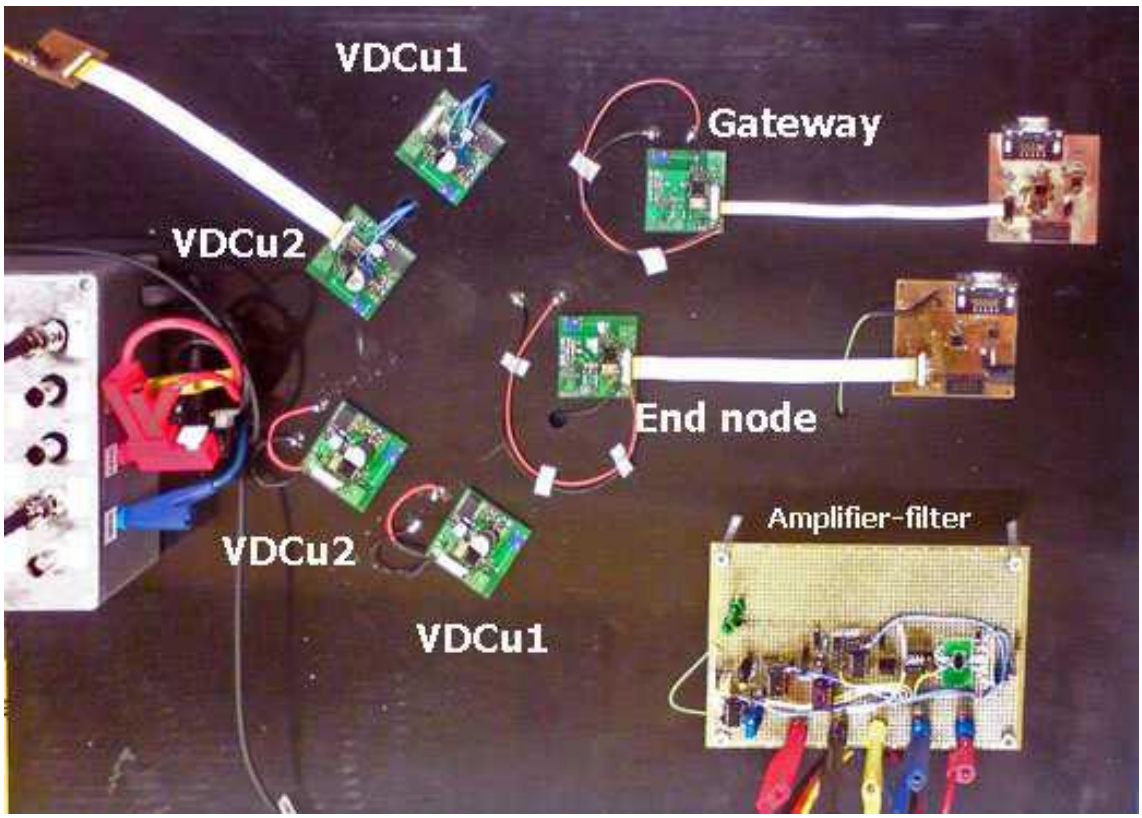
- Mikrogenerátor – byl zvolen piezogenerátor
- Snímací a vysílací jednotka – VDCu
- Sběrný bod signálů od jednotlivých snímacích jednotek – End Node
- Centrální komunikační bod – Gateway

VDCu a End Node jsou napájeny z mikrogenerátoru (každá má svůj) a Gateway z palubního systému letadla. Architektura sítě je zamýšlená tak, že jedna Gateway

komunikuje s několika End Node a ty potom každý komunikují se svojí skupinou VDCu.



Obr. 3: Elektronické komponenty vyvinuté v rámci projektu ADVICE [12]



Obr. 4: Elektronické komponenty připravené pro testování [12]

Systém byl podrobně testován a v závěrečné zprávě k projektu můžeme nalézt výsledky mnoha měření. Detailně se těmito výsledky zabývat nebudeme, protože to převyšuje rozsah práce. Důležitý závěr je, že existuje řešení autonomního komunikačního celku. Vyskytovaly se sice potíže, viz výše, nicméně vidíme, že tato vize je realizovatelná, pouze vyžaduje další vývoj.

3.3 Projekt ESPOSA

- 2011 – 2015
- Tento projekt probíhá v rámci 7. rámcového programu EU.
- Projekt probíhá pod vedením PBS Velká Bíteš a je do něj zapojeno několik evropských firem, výzkumných zařízeních a univerzit včetně VUT v Brně.

3.3.1 Stanovené cíle

Projekt ESPOSA [7] se zaměřuje na vývoj pohonných jednotek pro malá letadla. Cílem je vyvinout turbínové motory s rozsahem výkonu $180\ kW$ až $1\ MW$. Spolu s vývojem nových motorů, u kterých jsou kladeny vysoké požadavky na účinnost, spolehlivost a minimální údržbu, se objevuje požadavek pro jejich lepší monitorování. Zde tedy přichází ke slovu autonomní elektronický sledovací systém. Součástí tohoto projektu je tedy jejich vývoj pro konkrétní aplikaci, přičemž bude velice zajímavé sledovat výsledek.

3.4 Problematika autonomních aplikací v leteckém průmyslu

Jak již bylo řečeno v úvodu kapitoly 3, kvalitní přehled problematiky autonomních systémů zpracovává publikace [9]. Tématu autonomních aplikací v leteckém průmyslu se zabývá kapitola [13], na jejíž obsah se dále zaměříme. Dalšími přidruženými tématy se zabývají další kapitoly. Jedná se zejména o problematiku akumulátorů, senzorů, bezdrátové komunikace a v neposlední řadě také optimalizaci spotřeby, tedy jakémusi energy managementu.

3.4.1 Zařazení do kontextu leteckého průmyslu

Pokud se ohlédneme za posledním vývojem autonomních mikro a nano systémů, lze v nich vidět mnoho potenciálu pro další zdokonalování v oblasti letectví a samozřejmě nejen v něm. Nadšení z podobných systémů můžeme vycítit i z projektů, které se danou problematikou zabývaly, viz výše. Velký podíl na možnostech zdokonalování těchto systémů náleží vývoji nanotechnologií u senzorů. Díky těmto zdokonalením lze dosáhnout nižší spotřeby, která je pro autonomní aplikace klíčová. Tato práce se však zabývá především získáváním elektrické energie a proto se nebudeme dalšímu nakládání s ní více věnovat. Pouze znovu zdůrazněme, že v autonomních aplikacích je to věc zásadní, která nesmí být nikdy opomíjena a při návrhu komplexního autonomního systému musí hrát významnou roli.

Konkrétní využití autonomních aplikací autoři rozdělují do tří skupin:

- údržba
- informace za letu pro letecký personál
- testovací lety

Současná údržba probíhá dle časového plánu. Existují 3 základní stupně prohlídky: A, B, C a kompletní prohlídka zvaná D. Intervaly prohlídek jsou pevně dané a bývají zhruba 300 – 700 letových hodin pro prohlídku A, půl roku pro prohlídku stupně B, dva roky pro prohlídku C a 5 let pro celkovou prohlídku zvanou D. Prohlídky vyžadují velké množství práce. Je tedy potřeba mnoho vzdělaných pracovníků, kteří prohlídku dokáží provést. Zároveň však letadlo během prohlídky stojí nevyužito v hangáru. Délka prohlídek může být i několik dní. Autonomní aplikace mohou této situaci napomoct dvěma způsoby. Prvním způsobem je podávání informací personálu, který provádí prohlídku, a tedy zvýšení efektivity samotných prohlídek. Druhým, vyšším způsobem by bylo využívat informací pro změnu intervalu prohlídky z pevně stanoveného na pohyblivý.

Poskytování informací za letu je vcelku zřejmá věc. Zjednodušit lze například kontroly sedadel, bezpečnostních pásů, atd. Otázkou je však hmotnost takovýchto zlepšení, možnost zakomponování do designu letadel a otázka, zda by měla taková zlepšení vůbec nějaký přínos, nebo zda by jen zredukovala počet letušek a tím napomohla zvyšování nezaměstnanosti.

Testovací lety nových strojů vyžadují sběr co nejvíce informací pro vyhodnocení konstrukce a návrhů případných zlepšení. Instalace autonomních zařízení pro měření by množství informací zvýšila a tím by se zvýšily i možnosti zdokonalování konstrukce letounu.

Při pohledu na rozsah jednotlivých odstavců je zřejmé, že největší uplatnění autonomních elektronických aplikací lze očekávat ve sféře údržby. Na jakou problematiku je potřeba se zaměřit? Určitě je to přeměna okolní energie na elektrickou – jednomu z možných konstrukčních řešení se věnuje tato práce. Dále je to nakládání s energií. Tomuto tématu se rozsáhle věnují další kapitoly v [9]. Třetí zásadní otázkou je přenos informací při použití sítě mnoha senzorů – tomuto byla věnována další podkapitola knihy, jejíž nejdůležitější závěry se pokusíme shrnout.

3.4.2 Bezdrátová komunikace

Dokud se zabýváme laboratorními testy jednoho autonomního zařízení, je tato otázka dosti banální. Problém nastává v okamžiku, kdy začneme letoun osazovat velkým množstvím autonomních jednotek, které vyžadují komunikaci se systémem. Vznikne požadavek na strukturu sítě, která umožní připojit všechny autonomní jednotky, rozlišovat je a přijímat z nich informace. Tento problém je složitější, než by se na první pohled mohlo zdát.

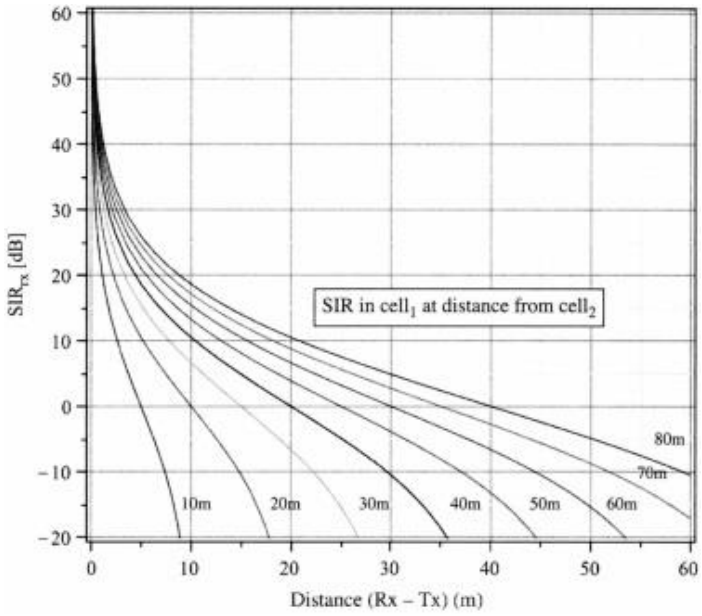
Nabízí se dvě řešení. Rozlišit jednotky dle frekvence nebo dle času. Přidělení jiné frekvence každé jednotce je značně limitující vzhledem k šířce kanálu. Rozlišení dle času není takto omezené, avšak nese s sebou další obtíže. Jedním způsobem je využití přidělených časových intervalů jednotlivým vysílačům (TDMA – Time divission

multiple access). Zde je ovšem problém se synchronizací. Další metodou je naslouchání vysílačů okolnímu vysílání (CSMA – Carrier sense multiple access). V momentě, kdy se kanál uvolní, se vyčká náhodný čas a pokud je kanál stále volný, začne se vysílat. Tato metoda je mnohem náchylnější ke kolizím.

Dalším problémem je volba přenosového standardu. V dnešní době není možné vysílat libovolně. Můžeme pouze vybírat z dostupných standardů, které pracují v určitém frekvenčním pásmu s určitými parametry. Ne všechny standardy jsou navíc platné po celém světě. Zde si uvedeme pouze parametry, které je potřeba uvážit. Jde především o počet kanálů, velikost přenášené informace a komunikační rychlost.

S volbou standardu souvisí i volba hardwaru. K předchozím parametrům tak přibude citlivost a hlavně energetická náročnost. Do značné míry je limitující nutnost využívat existujících HW prostředků. V případě většího množství použitých kusů by bylo možné vyvíjet vlastní HW pro bezdrátový přenos, který by bylo možné optimalizovat pro strukturu sítě letadla, jež je do značné míry specifická.

Vzdálenost, na kterou je schopen vysílač a přijímač komunikovat je cca 20m. U dopravních letadel je tedy nemožné vystačit s jedním centrálním přijímačem a musíme tak vytvořit síť komunikačních buněk, v jejichž středu budou přijímače a v jejich okolí autonomní celky senzorů s vysílači. Pokud budeme mít 2 buňky na stejném kanálu, bude mezi nimi vznikat interference, a vznikne tak dosti široký pás, ve kterém nebude možná komunikace ani s jednou z buněk. Následující graf zobrazuje závislost poměru signál/interferenční rušení (SIR) na vzdálenosti vysílače a přijímače (osa x) a na vzdálenosti 2 buněk na stejném kanálu (různé křivky). Z grafu lze vyčíst, že pokud bychom chtěli SIR > 10 dB v okruhu 10 m, musí být další buňka vzdálená 40 m. V jednom rozměru se to nejeví jako tak velký problém – potřebujeme 4 kanály. Ve velkých dopravních letadlech bychom však museli uvažovat všechny 3 rozměry. Počet kanálů sice nenaroste s třetí mocninou, ale i tak jich bude potřeba mnoho.



Obr. 5: Graf závislosti SIR na vzdálenosti vysílače a přijímače [13]

3.5 Získávání energie z okolí

Kromě vibrací, které využívá generátor navrhovaný v rámci této práce, se využívá také teplotních rozdílů. Existují i pokusy o fotovoltaickou přeměnu, využití změn tlaku a podobně, ale ty se zatím nesetkaly s výsledky využitelnými pro reálné použití. Obecně lze říci, že vibrace naleznou uplatnění u helikoptér, zatímco teplotních rozdílů se využívá u letadel. V úvahu by samozřejmě mohlo připadat i bateriové napájení. To však naráží na problém výměny baterií, které by mohly z těchto autonomních zařízení udělat kontraproduktivní systém. Jsou zde i jiné problémy, teplotní limitace nebo potenciální chemická agresivita. K určitým aplikacím by však bateriové napájení mohlo být použitelné.

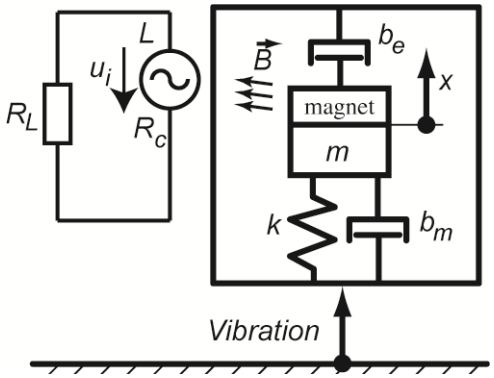
V termoelektrické přeměně existují dva přístupy – statický a dynamický. Statickým se zabývá projekt AMETYST [14]. Tento přístup využívá rozdílů teplot v různých místech. Vhodný je například plášť letounu a kabina letounu. Ve vysokých výškách bývají rozdíly okolo 50°C, což je zcela dostačující. Tento přístup však selhává, pokud nemáme k dispozici 2 rozdílné teploty. Například v křídle, kde je vnější nízká teplota, ale nemáme poblíž vysokou teplotu kabiny. V takovém případě se nabízí dynamický přístup, který využívá změn teploty během letu. Tuto problematiku zpracovala skupina německých vědců [15]. Jádrem takového zařízení je materiál, který si drží svoji teplotu, na jedné straně termogenerátoru a měnící se teplota na druhé straně termogenerátoru. S výhodou lze využít skupenského tepla. Například voda, se kterou bychom se dostali do nízkých teplot (vzlet) si bude dlouho držet 0 °C, než přejde do pevného skupenství a při přechodu do teplot nad nulou (přistání) bude zase dlouho rozmrzat.

Lze tedy říci, že autonomní elektronické aplikace v leteckém průmyslu jsou žádané, jejich vývoj jde kupředu a stále není dosaženo jeho vrcholu. Jednou z jejich stěžejních částí je napájení pomocí energy harvesting systémů. Je tedy žádoucí se těmto systémům věnovat a dále je zdokonalovat. To kategorie energy harvesting systémů spadá vibrační generátor, na jehož vývoji se podílí tato bakalářská práce, a lze očekávat, že vývoj takového generátoru bude velice přínosný pro celou sféru autonomních aplikací v leteckém průmyslu a má tedy smysl se jím zabývat.

4 Koncepce vibračního generátoru

Existuje mnoho možností, jak převádět energii vibrací na energii elektrickou. Z těch základních můžeme jmenovat přeměnu elektromagnetickou, elektrostatickou, magnetostrikční nebo přeměnu s využitím piezoelektrického jevu. Pro konstrukci generátoru v rámci projektu ESPOSA byla zvolena elektromagnetická přeměna a proto se zde ostatními možnostmi nebudeme blíže zabývat. Více se o těchto zdrojích lze dozvědět např. v [16].

V této kapitole si objasníme princip činnosti elektromagnetického vibračního generátoru, jehož schéma můžeme vidět na Obr. 6



Obr. 6: Schéma elektromagnetického vibračního generátoru [17]

4.1 Podstata elektromagnetického vibračního generátoru

4.1.1 Elektromagnetická indukce

Pro přeměnu mechanické energie na energii elektrickou slouží elektromagnetická indukce. Vztah (1) pro indukované napětí ε ve vodiči, který se pohybuje ve stacionárním magnetickém poli, najdeme v publikaci [18].

$$\varepsilon = \int_A^B (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r} \tag{1}$$

Jedná se o křivkový integrál po patřičném úseku vodiče z vektorového součinu rychlosti $\vec{v}$ a magnetické indukce $\vec{B}$. V našem případě se bude jednat o přímý vodič v homogenním magnetickém poli, na které bude tento vodič kolmý a bude se pohybovat kolmo na směr siločar i kolmo na svou délku, a proto pro jeden úsek jednoho vodiče bude platit zjednodušený vztah (2), kde l je délka vodiče v magnetickém poli.

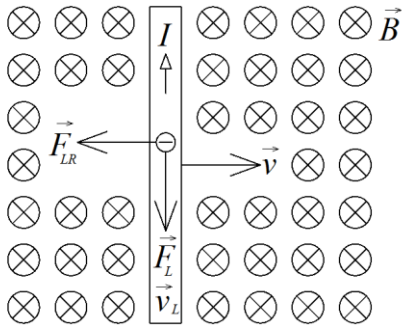
$$\varepsilon = v \cdot B \cdot l \tag{2}$$

Nejsnazší cestou pro vysvětlení elektromagnetické indukce je Lorentzova síla. Ta působí na nabitou částici, která se pohybuje v magnetickém poli. Kvantitativně ji popisuje vzorec (3), který byl převzat z publikace [18].

$$\overrightarrow{F_L} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \tag{3}$$

Vodič zpravidla obsahuje volné elektrony, které mají záporný náboj. Z vektorového součinu je patrné, že síla na nabitou částici působí vždy kolmo na magnetickou indukci i rychlost. Pokud chceme, aby síla působila ve směru vodiče, musí být vodič kolmý na směr magnetické indukce i rychlosti. Navíc je vhodné zachovat kolmost rychlosti a magnetické indukce, protože hodnota vektorového součinu je rovna součinu velikostí vektorů a sinu úhlu vektory sevřeného.

Mějme tedy uzavřený vodič, jehož část se nachází v magnetickém poli o konstantní magnetické indukci $\vec{B}$, pohybuje se konstantní rychlostí $\vec{v}$, která je kolmá na směr magnetické indukce i na vodič (ten je tedy kolmý na směr magnetické indukce). Na elektrony ve vodiči působí Lorentzova síla, označme ji $\overrightarrow{F_L}$, a protože je vodič uzavřený, dávají se elektrony do pohybu. Tím pádem ale dostávají složku rychlosti, označme ji $\overrightarrow{v_L}$, která je rovnoběžná s vodičem. Vlivem této rychlosti vzniká opět Lorentzova síla, tentokrát ji označme $\overrightarrow{F_{LR}}$, která působí proti směru původní rychlosti $\vec{v}$. Tato síla „brzdí" vodič v jeho pohybu a na její překonání musíme dodávat energii, která se přemění na energii elektrickou. Vše je znázorněno na Obr. 7, na kterém je navíc vyznačen i směr proudu – ten je opačný než směr toku elektronů, protože směr proudu je konvenčně zaveden jako směr toku kladně nabitých částic.



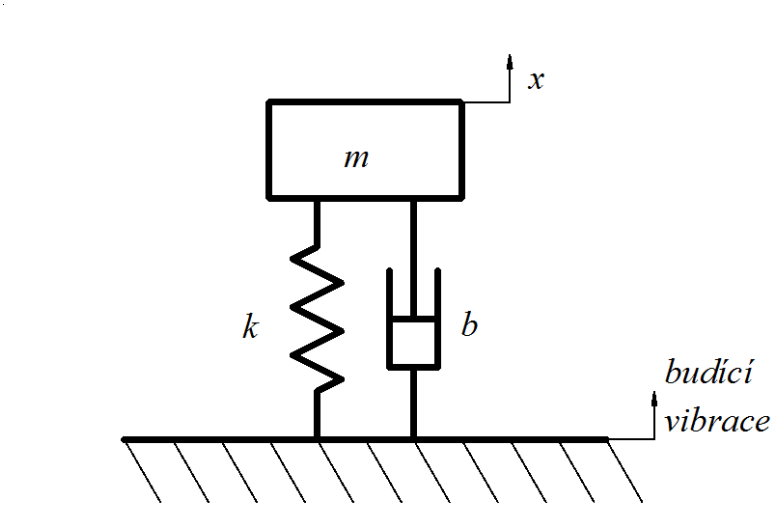
Obr. 7: Elektromagnetické indukce ve vodiči

Lorentzova síla je vhodná pro pochopení principu elektromagnetické indukce, avšak obecným vztahem, který se zpravidla používá, je Faradayův indukční zákon pro uzavřenou smyčku o N závitech. Uvedený tvar (4) je převzat z publikace [18] a jeho výsledkem je indukované elektromotorické napětí.

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt} \tag{4}$$

4.1.2 Kmitání hmoty

Klasickým příkladem elektromagnetické indukce je dynamo. Otáčíme hřídelí, na které jsou cívky, ty se pohybují v magnetickém poli a indukuje se na nich napětí. Vstupem do takového generátoru je rotační pohyb, který však v našem případě není dostupný. Naším zdrojem energie jsou vibrace. Pro zjednodušení je můžeme uvažovat pouze v jedné ose. Vstupem do generátoru nebude tedy rotační pohyb, ale pohyb translační. Nebude se jednat o pohyb s konstantní rychlostí jako u dynama, nýbrž rychlost se bude měnit. Pohyblivým elementem vibračního generátoru tedy nebude rotor, který se otáčí konstantní rychlostí, ale hmota, která se pohybuje s měnící se rychlostí – kmitá. Situaci si můžeme znázornit jednoduchým schématem tělesa na pružině.



Obr. 8: Těleso na pružině

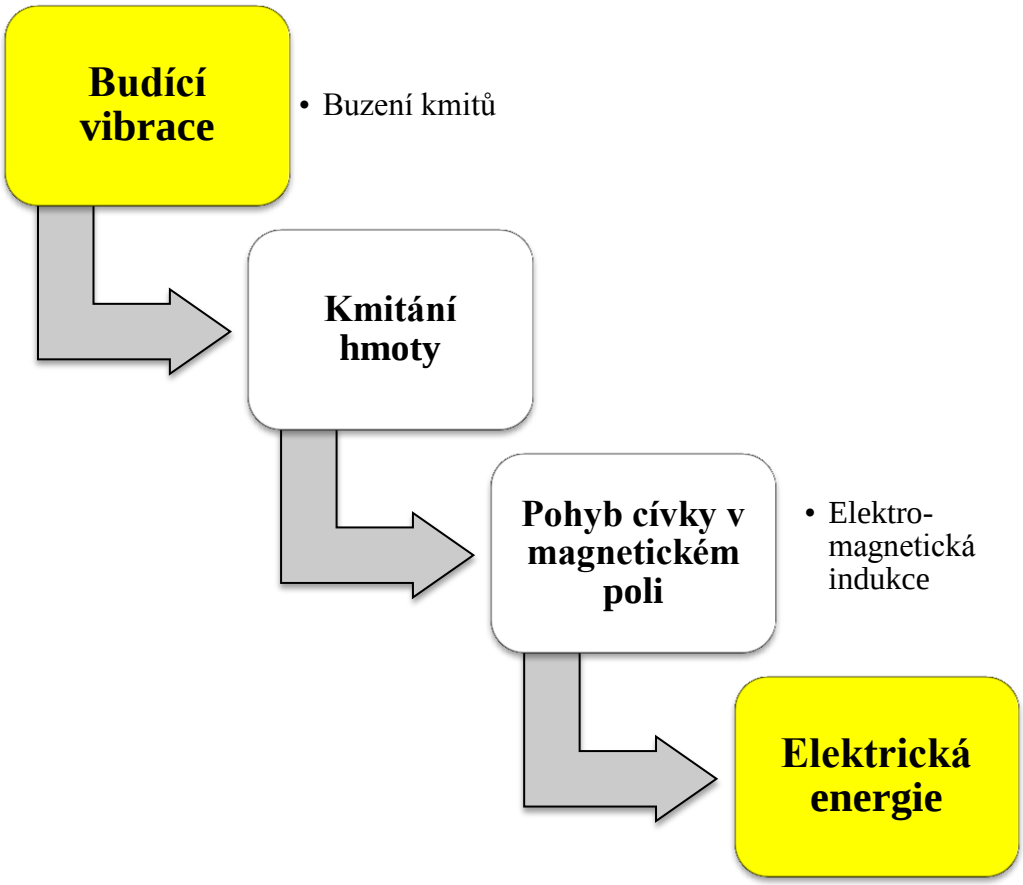
Na Obr. 8 vidíme kmitající hmotu o hmotnosti m, jejíž poloha je popsána souřadnicí x, dále vidíme pružinu o tuhosti k, tlumič s koeficientem tlumení b a základnu, která vibruje. *Budící vibrace* mají zrychlení a. Tuto situaci můžeme popsat Lagrangeovou rovnicí II. druhu (5), která je převzata z [19].

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k \cdot x = m \cdot a \tag{5}$$

V případě elektromagnetického generátoru působí na kmitající hmotu ještě elektromagnetické tlumení, které je znázorněno na Obr. 6 jako b_e. Tato situace, kdy je kmitající těleso buzeno vibracemi, se nazývá kinematické buzení.

4.1.3 Proces přeměny energie

Proces přeměny energie v elektromagnetickém vibračním generátoru lze znázornit schématem na Obr. 9.

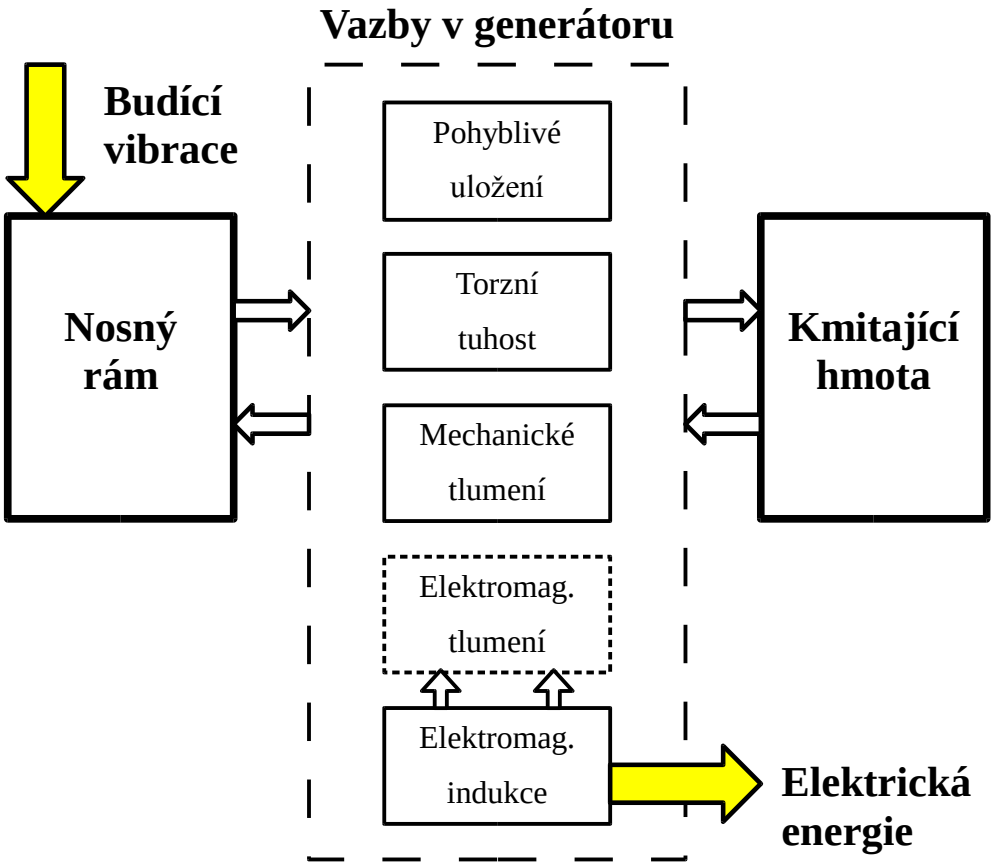


Obr. 9: Proces přeměny energie v elektromagnetickém vibračním generátoru

Schéma samo o sobě není nikterak objevné. Pomůže nám však k abstraktnímu zamyšlení nad konstrukcí generátoru a vyplývají z něho jednotlivé konstrukční části generátoru. Vyznačená pole jsou vstup a výstup generátoru.

Vibrace budí kmity hmoty. Jedná se o kinematické buzení. Výstupem je elektrická energie. Tu získáváme z elektromagnetické indukce, viz rovnice (2) – potřebujeme tedy magnetické pole a cívku. Relativní pohyb cívky vůči magnetickému poli nám zajistí kmitající hmota. Ta musí být uložena tak, aby se mohla pohybovat ve směru budicích vibrací. Zároveň musí být uložena na pružině, která bude zajišťovat potřebnou tuhost. Tlumení není v našem případě žádoucí, avšak není reálné generátor vyrobit bez jakýchkoliv tření apod., takže ho musíme uvažovat.

Od základních vztahů v generátoru se můžeme přesunout k úvahám o konkrétní realizaci. K tomu nám pomůže mechatronické schéma generátoru na Obr. 10. Jedná se o syntézu Obr. 6, Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9.



Obr. 10: Mechatronické schéma generátoru

- **Pohyblivé uložení** můžeme volit v podstatě ze dvou variant a to rotační nebo posuvnou vazbu.
- **Tuhost** můžeme vytvořit mechanickou pružinou, vzduchovým válcem, odpuzujícími se magnety, nebo třeba elektrostatickým nábojem.
- **Tlumení** je nežádoucí a naopak se ho snažíme co nejvíce eliminovat. Je způsobeno třením, ztrátami v deformacích apod.
- **Elektromagnetické tlumení** je přímým důsledkem elektromagnetické indukce.
- **Elektromagnetická indukce,** v našem případě miniaturního vibračního generátoru, přichází v úvahu pouze mezi cívkou a permanentním magnetem.

Předmětem návrhu je nejen volba vhodného typu vazby, ale také její vhodná realizace. Například pro elektromagnetickou indukci máme jasně danou cívku a magnety, ovšem můžeme volit, zda bude cívka na kmitající hmotě a magnety na pevném rámu nebo naopak. Význam to může mít konstrukční, hlavní je však hledisko hmotnostní. Hmotnost, která je na kmitající hmotě, zprostředkovává přeměnu vibrací na energii elektrickou, na rozdíl od hmotnosti, kterou umístíme na pevný rám. Ta nám pouze zvyšuje hmotnost generátoru, kterou se snažíme minimalizovat. V případě cívky a magnetů je tedy jasná volba umístění magnetů na kmitající hmotu a cívky na rameno.

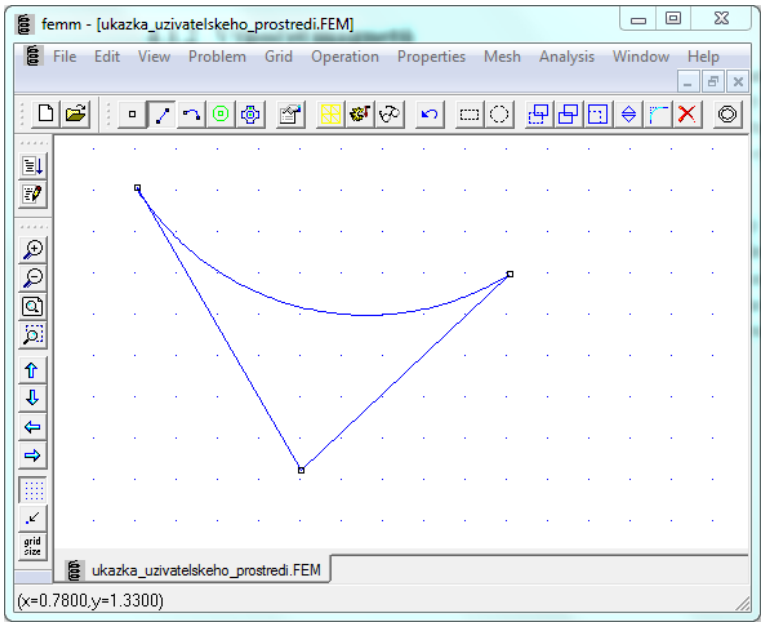
5 Nástroje pro návrh generátoru

Navrhovaný generátor je složitá mechatronická soustava, která se skládá z různých typů modelů. Pro celkový návrh musí být tedy využito několik submodelů, které nakonec dají celkovou podobu generátoru. Lze samozřejmě očekávat nutnost iteračního řešení, protože jednotlivé změny v dílčích modelech způsobí změny v modelech navazujících.

V dnešní době máme k dispozici mnoho softwarových nástrojů, které nám mohou pomoci s návrhem, modelováním a simulací řešených úloh. Nesmíme však opomíjet inženýrský nadhled nad papírem s tužkou v ruce. V této kapitole si krátce představíme nástroje, které byly využity v této práci.

5.1 Femm

Pro magnetické výpočty byl zvolen program Femm. Jedná se o jednoduchý rovinný MKP software pro řešení magnetických, elektrostatických a tepelných úloh. Tento program sám o sobě nenabízí uživatelsky přívětivé prostředí. Kreslení se provádí určováním bodů, které lze přichytávat k mřížce nebo umisťovat od ruky, a jejich následným spojováním přímkami nebo oblouky. Pro složitější tvary prakticky nepoužitelný přístup. Výhodou je možnost importu 2D výkresů. V tom případě musíme mít připravený 2D model a další úpravy jsou opět velice obtížné. Program umožňuje posunutí a rotace, čehož s výhodou využijeme dále. Pro určení materiálových vlastností jsou zde popisné body, které definují vlastnosti oblasti, ve které jsou umístěny.



Obr. 11: Uživatelské prostředí programu FEMM

Femm disponuje možností propojení s programem Matlab. Toho bylo dále využito pro tvorbu uživatelsky přívětivého rozhraní. Tento program je navíc zcela zdarma.

5.2 Matlab

Jedná se o inženýrský výpočtový systém, většinou dobře známý. Lze ho popsat jako uživatelsky přívětivý programovací jazyk, kde není potřeba deklarovat proměnné, a vše je obecně snazší. Daní za to je však výpočtová náročnost. Nejsilnější stránkou, ze které je také odvozen název programu, je práce s maticemi.

V této práci bude programu využito pro tvorbu ovládacího skriptu k programu Femm, viz kapitola 5.1.

5.3 Simulink

Simulink je nástavbou Matlabu. Jedná se prakticky o grafické sestavení diferenciálních i lineárních rovnic a jejich řešení.

V tomto programu bude namodelován generátor z pohledu dynamického i s elektromagnetickou indukcí a elektrickou zátěží. Jako vstup bude využito dat vibrací, které jsou vstupními parametry konstrukce.

5.4 SolidWorks

SolidWorks je jedním z mnoha 3D modelovacích programů. Umožňuje vytvoření 3D modelů jednotlivých součástí, jejich sestavení, kontrolu pohyblivosti a případných kolizí jednotlivých součástí. Je možné zadat součástem materiály a určit hmotnost, polohu těžiště i moment setrvačnosti.

Tohoto programu bude využito pro tvorbu 3D modelu a získání informací o hmotnosti, těžišti a momentu setrvačnosti.

6 Úprava konstrukčního řešení generátoru

Pro postup návrhu generátoru můžeme s výhodou využít schéma vazeb z předchozí kapitoly. Tlumení, jak již bylo řečeno výše, je nežádoucí, a proto se jím nebudeme zvláště zabývat. Samozřejmě je třeba při návrhu postupovat tak, aby bylo minimální, ale není způsobeno žádnou zvláštní částí generátoru.

Naproti tomu tuhost a elektromagnetická indukce mají své součásti, které je potřeba pečlivě navrhnout. Pro pohyblivé uložení volíme rotační vazbu, a to z důvodu navázání na předchozí generátor. Tato vazba má samozřejmě své výhody – především nižší tření, než vazba posuvná.

V této kapitole se tedy budeme zabývat magnetickými návrhy magnetů pro tuhost, spolu s budicími magnety a také návrhu výsledné konstrukce, tedy tvorbě 3D modelu.

6.1 Torzní tuhost

Návrh vazby, která bude obstarávat patřičnou tuhost, lze označit za jeden z klíčových bodů návrhu. Tuhost určuje vlastní frekvenci generátoru. Pro její výpočet využijeme základního vztahu dynamiky (6), který byl získán z [19].

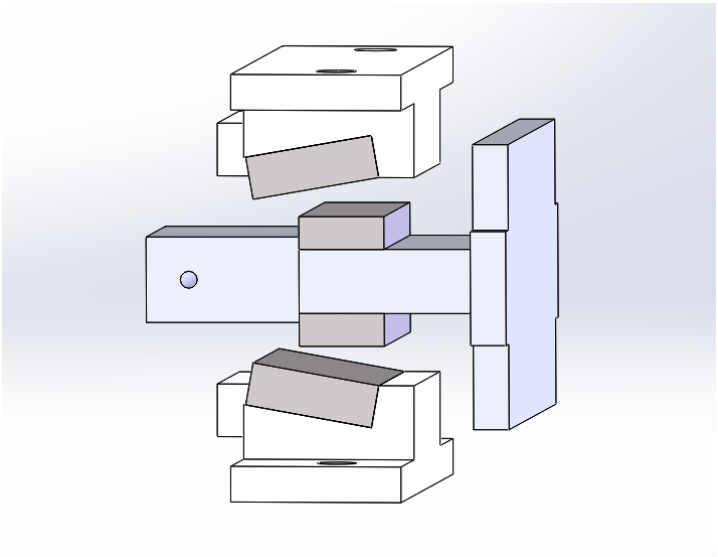
$$k = I \cdot \Omega^2 \tag{6}$$

I je moment setrvačnosti, Ω je požadovaná vlastní frekvence a k je výsledná tuhost, vše samozřejmě v základních jednotkách SI. Vlastní frekvence je vstupním parametrem návrhu. Moment setrvačnosti však závisí na konstrukci pohyblivého ramene. Není tedy předem jasně stanoven a může se v průběhu návrhu měnit. Postup návrhu tak musí být iterační. To je jedna z oblastí návrhu, kde bude využito mechatronického přístupu. Odhadneme moment setrvačnosti, vypočítáme tuhost, navrhneme konstrukci, určíme její moment setrvačnosti a zkontrolujeme, zda vyhoví požadované vlastní frekvenci.

Před realizací je vhodné položit si otázku, jakou toleranci u tuhosti připustíme. Nelze totiž očekávat, že vyrobený generátor bude mít přesné parametry návrhu, které jsou určeny simulačním modelováním. Je tedy potřeba počítat s úpravami na hotovém kuse. S tuhostí není prakticky možné manipulovat. Upravovat můžeme pouze moment setrvačnosti přidáním závaží, tedy moment setrvačnosti zvyšovat. Zvýšení momentu setrvačnosti vede ke snížení vlastní frekvence, viz rovnice výše, a je tedy vhodné navrhovat model na vyšší frekvenci (tj. vyšší tuhost), abychom mohli frekvenci doladit jejím snížením.

6.1.1 Původní řešení

Pokud se podíváme na původní generátor, měl rameno uprostřed se 2 malými magnety a obepínal ho rám se 2 většími magnety.



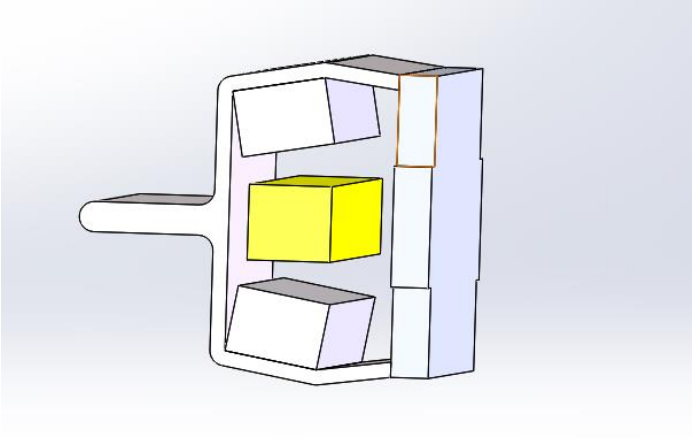
Obr. 12: Původní řešení vazby pro tuhost

Obr. 12 nám tuto původní koncepci zobrazuje. Pokud se nad ní kriticky zamyslíme v duchu posledního odstavce kapitoly 0, napadne nás určité zlepšení. Z obrázku je zřemé, že vnější magnety, spolu s jejich uchycením, jsou poměrně hmotné, na rozdíl od vnitřních drobných na tenkém rameni. Nabízí se tedy alternativa, kterou si popíšeme v kapitole 6.1.2.

6.1.2 Nová koncepce torzní tuhosti

Stojíme před otázkou, jakou koncepci této vazby zvolit. Určitě využijeme permanentních magnetů, jako tomu bylo u výchozího generátoru. Ostatní způsoby realizace by byly náročné a zpravidla by měly větší tlumení, které je nežádoucí. Otázkou však je, které magnety budou pohyblivé a které fixní. Tuto otázku jsme nastínili v kapitole 6.1.1, kde jsme také konstatovali možnost jakési alternativy.

Touto alternativou je změna, kdy bude jeden nepohyblivý magnet uprostřed, a pohyblivé budou dva vnější. Tím minimalizujeme nepohyblivou hmotu, která nám pouze zvyšuje hmotnost generátoru, ne však jeho výkon. Samozřejmě se tím zcela změní konstrukce. Především jeden vnitřní magnet bude muset být uchycen na vnější části – nabízí se použití delšího magnetu, který uchytíme za jeho vyčnívající konce. Vnější magnety budou uloženy v rameni, které tentokrát nebude jednoduchým nosníkem vedoucím středem, ale jakousi obloukovou konstrukcí, která bude magnety obepínat a pokračovat dále k indukční vazbě. Tuto konstrukci můžeme udělat z feromagnetického materiálu a uzavřít tak magnetický obvod, čímž by se měl posílit. Vizi takovéto koncepce zobrazuje Obr. 13, na němž můžeme vidět ideu pohyblivého ramene s vnějšími magnety a žlutě vyznačený vnitřní magnet, zatím bez uchycení.



Obr. 13: Vize vazby pro tuhost

6.1.3 Model magnetů torzní tuhosti

Zvolili jsme tedy uspořádání magnetů, které nám budou vytvářet tuhost. Nyní stojíme před určením jejich velikosti a polohy. Program pro magnetické výpočty byl zmíněn v kapitole 5.1. Dalším krokem je vytvoření ovládacího rozhraní, které bude dále popsáno.

Jako první je třeba vytvořit schéma situace. Dále ho využijeme také jako informační schéma v grafickém rozhraní pro zadávání vstupních parametrů, které je na Obr. 14. Schéma vychází z Obr. 13 a obsahuje všechny geometrické náležitosti. Velikost magnetů a jejich polohu už jsme zmiňovali. Zatím jsme však nenarazili na úhly φ_{max} a φ_{sim_max}. Tyto úhly udávají rozevření vnějších magnetů od magnetu vnitřního a maximální simulační výchylku, která musí být menší než úhel rozevření.

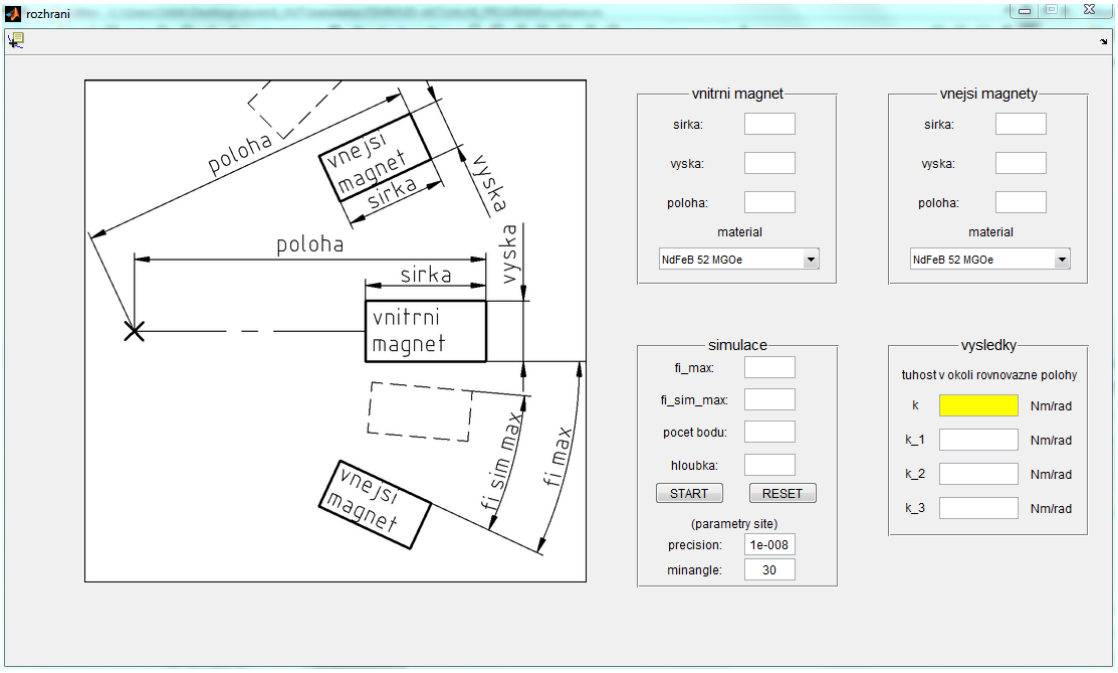
Dále je třeba vytvořit postup založení nové simulace, vytvoření geometrie, spuštění simulace, načtení potřebných dat a úpravy geometrie před spuštěním dalšího simulačního kroku. Jednotlivé kroky popíšeme tak, jak je strukturován kód v obslužné funkci ‚vypocet.m'.

- Parametry
  - Používáme při přímé práci se skriptem, jinak jsou zadávány prostřednictvím GUI.
- Otevření Femmu
  - Otevření programu, založení nového dokumentu a nastavení zoomu na řešenou oblast. Ta je předem stanovená a předpokládá se, že standardní konfiguraci magnetů vyhoví. Pokud ne, není problém ji změnit.
- Nastavení řešiče
  - Zde se nastavují parametry sítě a hloubka simulace (třetí rozměr).
  - Jsou zde zadány také jednotky a typ problému (rovinný), ty však není důvod měnit.
- Nastavení prostředí
  - Narýsování oblasti, ve které budeme problém řešit, nastavení okrajových podmínek a materiálu – vzduch.

- Vnější magnety
  - Narýsování vnějších magnetů dle zadaných parametrů pomocí kreslení obdélníků, jejich posouvání a natáčení.
  - Vnějším magnetům i jejich bodům s vlastnostmi nastavíme skupinu 1, abychom je později mohli jednoduše vybírat jedním příkazem.
- Vnitřní magnet
  - Narýsujeme jednoduše jako jeden obdélník, který i s bodem určujícím vlastnosti označíme jako skupinu 2, pro jednoduchou práci s výsledky.
- Řešení
  - Vypočítáme úhel pootočení z maximálního simulačního úhlu a požadovaného počtu kroků.
  - Geometrii uložíme, spustíme výpočet a načteme požadované výsledky – moment a sílu v ose x, působící na vnitřní magnet – zde s výhodou využíváme definici skupiny 2.
  - Provedeme rotaci vnějších magnetů o patřičný úhel pootočení a opakujeme postup z předešlého bodu.

Výstupem tohoto skriptu je matice, která obsahuje v každém řádku úhel natočení, moment k ose z a sílu ve směru osy x na vnitřní magnet.

Pro co možná nejsnazší zacházení lze doplnit skript o GUI – grafické rozhraní. Zadávání parametrů a zobrazení výsledků bude potom přehlednější. Pro vstup je zobrazeno schéma geometrie a zadáváme parametry magnetů a simulace. Výstupy jsou potom dva. Jednak je to graf momentu k ose z a síly v ose x v závislosti na úhlu natočení, jednak je to tuhost ve střední poloze. Je zobrazena tuhost v prvním, druhém a třetím bodě kladné výchylky a vypočtená průměrná hodnota. Dále můžeme změnit libovolný parametr a simulaci znovu spustit, nebo použitím tlačítka reset vrátit okno do původní podoby.



Obr. 14: GUI pro zadání parametrů

6.1.4 Volba magnetů dle požadavků na torzní tuhost

Nyní se dostáváme k problému nalezení vhodných parametrů, pro které dostaneme požadovanou tuhost. Prvním krokem samozřejmě musí být výpočet požadované tuhosti. Frekvenci máme zadánu a moment setrvačnosti jsme z předběžného modelu odhadli. Výpočet tuhosti bude tedy vycházet z rovnice (6).

$$k = I \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 = 70e^{-6} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 31{,}2)^2 = 2{,}7Nm/rad \qquad (7)$$

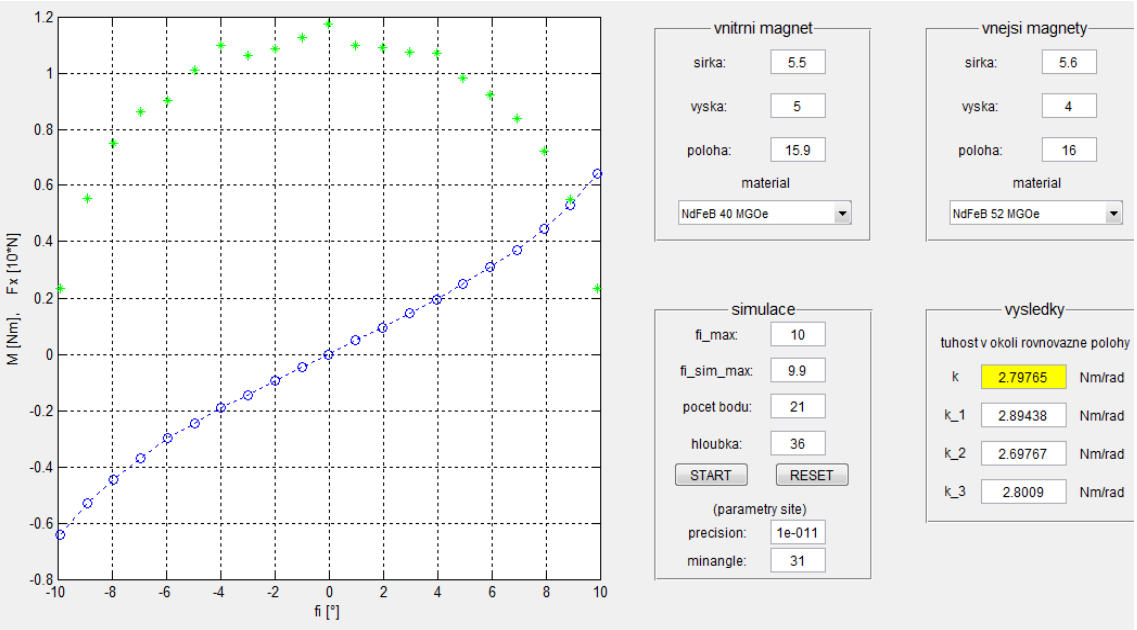
Nesmíme zapomenout navrhovat magnety na vyšší tuhost, abychom měli určitou rezervu na pozdější kompenzaci vlastní frekvence zvýšením momentu setrvačnosti.

Rozměry magnetů a jejich materiál jsme volili dle dostupných magnetů na trhu. Polohu magnetů je třeba zkoušet. Musíme si však uvědomit určitou nelinearitu. Pokud máme konstantní úhel výchylky (v našem případě bylo rozhodnuto zachovat výchylku 10° jako u přechozího generátoru), tak se zvyšující se vzdáleností magnetů od osy rotace roste rameno a tedy roste i moment. To však platí především v krajních polohách, kde jsou magnety blízko sebe. Pokud se pohybujeme ve středních polohách, tak se zvyšující se vzdáleností magnetů od osy otáčení roste také vzdálenost mezi magnety, a tím síla klesá. Tato skutečnost se však projeví až při vyšších vzdálenostech, které u nás nepřipadaly v úvahu z konstrukčních důvodů.

Dalším cílem, na který se můžeme během návrhu zaměřit, je tvrdnoucí charakteristika tuhosti. Tu využijeme, když přijdou vyšší vibrace a hrozilo by, že dojde k nárazu pohyblivého ramene do tuhého rámu. Vyšší moment v krajní výchylce tomuto nárazu zabrání, a tak zvyšuje životnost generátoru.

Postup hledání vhodných magnetů z těch, které jsou dostupné na trhu, je prací dosti mechanickou. Určitě můžeme využít technického citu a nezkoušet všechny magnety. Například lze vysledovat, že pokud vezmeme stejnou plochu průřezu magnetu, dostaneme vyšší tuhost, pokud je magnet vyšší než širší. Tento poznatek určitě nelze globalizovat, platí jen v určitém rozsahu rozměrů, a bylo by zajímavé podrobit ho hlubšímu zkoumání a matematické analýze. To však přesahuje rámec této práce. Dalším zajímavým jevem byl fakt, že použití silnějšího magnetu někdy přineslo vyšší tuhost, zatímco někdy byla změna tuhosti zcela zanedbatelná.

Výsledkem mnoha různých kombinací magnetů byla uspokojivá konfigurace, kterou můžeme vidět na Obr. 15. Její charakteristika je vhodně tvrdnoucí a zároveň má o pár procent vyšší tuhost, než je potřeba pro odhadnutý moment setrvačnosti a zadanou frekvenci.



Obr. 15: Výsledná konfigurace magnetů

6.2 Magnetický obvod pro elektromagnetickou indukci

Pro elektromagnetickou indukci bylo rozhodnuto o převzetí koncepce z původního generátoru. Byla zde vhodná realizace se statickou cívkou a pohyblivým magnetickým obvodem, který má větší hmotnost než cívka. Byly zachovány magnety i vzdálenost od osy otáčení.

Model magnetického obvodu pro elektromagnetickou indukci musel být vytvářen spolu s modelem magnetů pro torzní tuhost, a proto si jej blíže popíšeme v kapitole 6.3. Jedná se o typický mechatronický návrh, kdy navrhujeme současně 2 části, které jsou zdánlivě nezávislé, viz Obr. 10.

Zde se zaměříme na smysl takového výpočtu. Nejdříve si musíme stanovit cíl, který sledujeme. V našem případě je jím magnetická indukce v mezeře mezi budicími magnety, kde se bude pohybovat cívka. Jak vyplývá z rovnice (2), na velikosti magnetické indukce je závislá velikost indukovaného napětí. Pokud máme požadovanou velikost napětí definovánu, můžeme díky vyšší magnetické indukci zvolit nižší počet závitů. Díky tomu můžeme cívku motat tlustším drátem a díky tomu výrazně snížit její odpor, viz vztah (15). Hlavním výstupem tohoto výpočtu bude tedy hodnota magnetické indukce.

Při zachování magnetů budeme měnit geometrii ocelových částí, které uzavírají magnetický obvod, případně mírně měnit polohu magnetů. Sledovat budeme jejich sycení, které se pokusíme optimalizovat. Jako hraniční hodnota magnetické indukce pro ocel bylo zvoleno $B = 1{,}5\ T$.

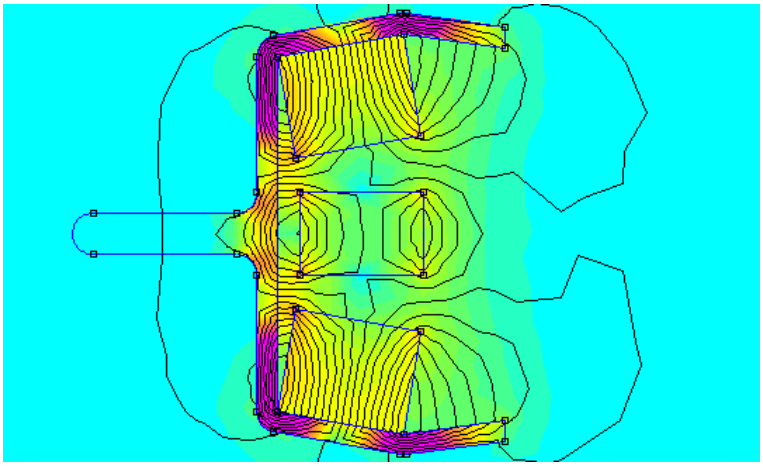
6.3 Postup návrhu celého magnetického obvodu

Před návrhem výsledné konstrukce musel proběhnout magnetický výpočet celého magnetického obvodu, tedy magnetů pro tuhost i budicích magnetů. V této kapitole se tedy budeme postupně zabývat výpočty jednotlivých variant uzavření magnetického obvodu a jejich vlastnostmi.

Návrh magnetického obvodu musel být prováděn spolu s ohledem na realizovatelnost konstrukce. Bylo tedy zapotřebí zvolit mechatronický přístup, který před každou úpravou zohlední její dopad.

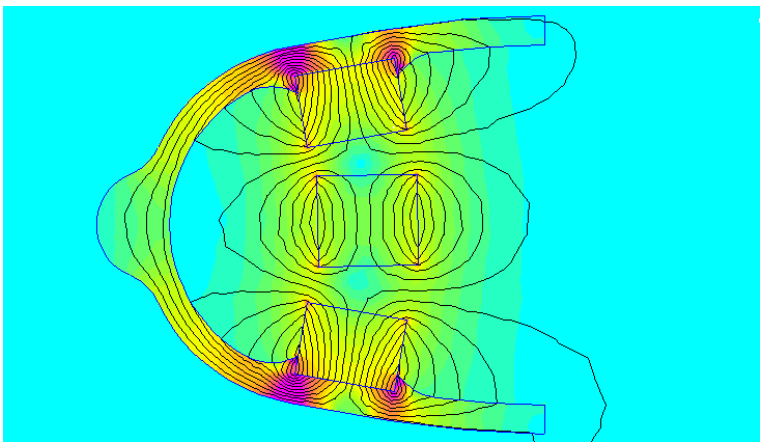
6.3.1 Model magnetů pro tuhost

Nejprve se přistoupilo k té části ramene, která upevňovala vnější magnety pro tvorbu tuhosti. Byla testována první vize ramene, viz Obr. 13, která se však ukázala jako nevhodná. Jak můžeme vidět na Obr. 16, siločáry vnějšího magnetu se přes konstrukci neuzavírají do opačného magnetu, ale naopak se velice ochotně vrací to opačného pólu stejného magnetu. Tuhost se tím téměř nezlepšila, ale výrazně se tím zvýšila síla v ose x, která je nežádoucí. Navíc v místě, kde se stýká nosník od horního a dolního magnetu a dále vede společný nosník k ose otáčení, by docházelo ke koncentraci napětí. Tyto negativa vedou k myšlence nahrazení T-tvaru obloukem.



Obr. 16: Magnetický výpočet původní vize pohyblivého ramene

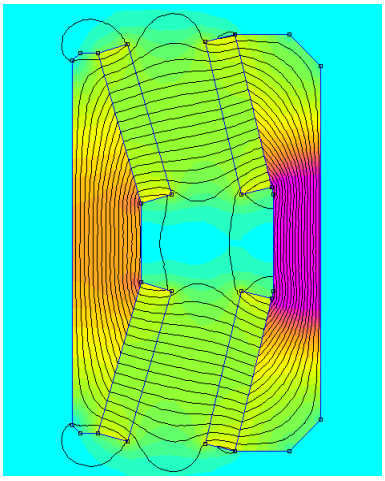
Výsledek výpočtu pro obloukové rameno můžeme vidět na Obr. 17. Z výpočtu je vidět, že část siločar jde přes oblouk do druhého magnetu, posiluje se tak magnetické pole a zvyšuje se tím tuhost. Oproti samotným magnetům je nárůst tuhosti v okolí rovnovážné polohy okolo 12 %. Tedy použití oblouku je výrazně výhodnější.



Obr. 17: Magnetický výpočet obloukové části ramene

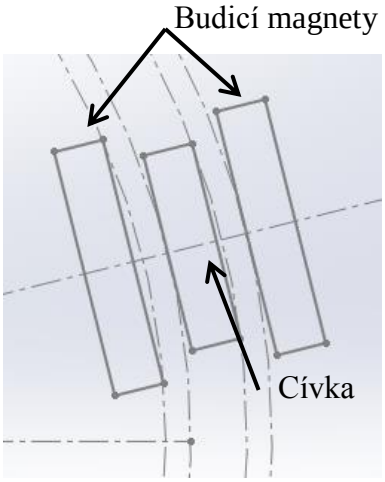
6.3.2 Model magnetů pro elektromagnetickou indukci

Dalším krokem byla simulace magnetického obvodu pro elektromagnetickou indukci. Nejdříve bylo potřeba ověřit vlastnosti původní konstrukce. Bylo zjištěno, že materiál není využit ideálně. Na Obr. 18 vidíme výsledek výpočtu. Fialová oblast v pravé části je oblast přesycená. Naopak zelené části na okrajích mají nízké sycení, a jsou tedy prakticky zbytečné.



Obr. 18: Magnetický výpočet původního buzení

Bylo tedy přistoupeno k novému návrhu. Byly ponechány magnety a zhruba jejich poloha. Vnější magnety byly posazeny přímo proti magnetům vnitřním, ve směru normály na plochu, zatímco původní návrh vnější magnety odsadil pouze ve směru osy x. Byla vytvořena skica, která obsahovala magnety a mezi nimi průřez cívky. Vzdálenost byla definována pomocí tečných kružnic, aby mohla být co nejmenší při zachování bezpečných rezerv.

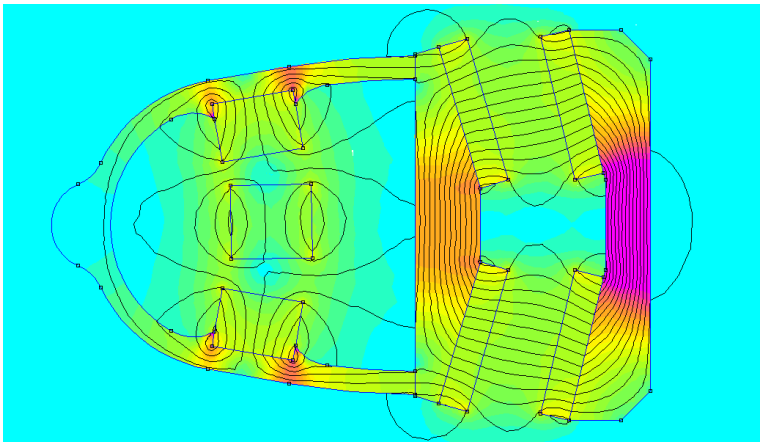


Obr. 19: Skica magnetu a cívky

6.3.3 Model celého magnetického obvodu

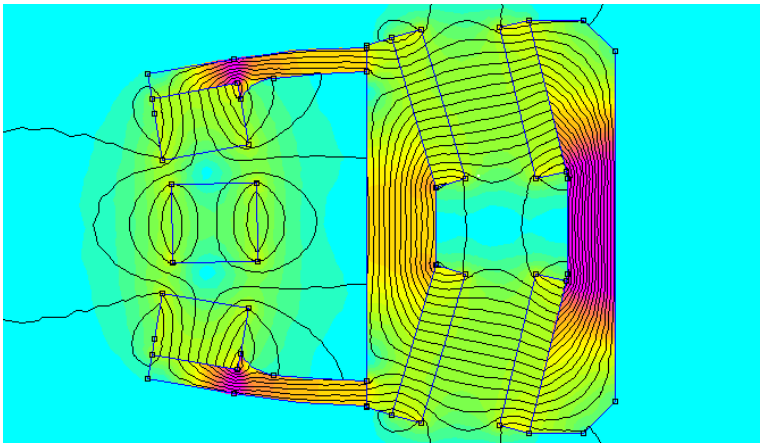
Další návrhy ocelových celků pro uzavření magnetického toku tak, aby bylo ideální sycení, bylo zapotřebí dělat spolu s částí pro tuhost, protože tyto části se zajisté musí ovlivňovat. První výpočty pro interakci těchto dvou částí byly provedeny ještě s původní budicí částí. Byly různé možnosti propojení či nepropojení těchto částí. Budicí část byla ovlivňována zcela minimálně. Variantu, kdy magnety pro tuhost byly ve vzduchu, jsme si již ukázali, rovněž variantu, kdy byly propojeny obloukem. Další možností je uzavření celého magnetického obvodu spolu s pravou stranou. Tuto variantu zobrazuje Obr. 20. Zvýšení tuhosti je oproti variantě bez budicích magnetů

vyšší o 13 %. Je tedy téměř stejné, jako u uzavření pouze obloukem. Z obrázku můžeme vidět velice nízké sycení v obloukové části. Nabízí se tedy varianta jeho odstranění.



Obr. 20: Magnetický výpočet celého ramene

Tuto variantu zobrazuje Obr. 21. Tuhost oproti variantě ve vzduchu se zvýšila o 14%, tedy nejvíce ze všech variant. Navíc jsme ušetřili materiál pro oblouk. Tato varianta se tedy jeví jako vhodná z hlediska tuhosti.

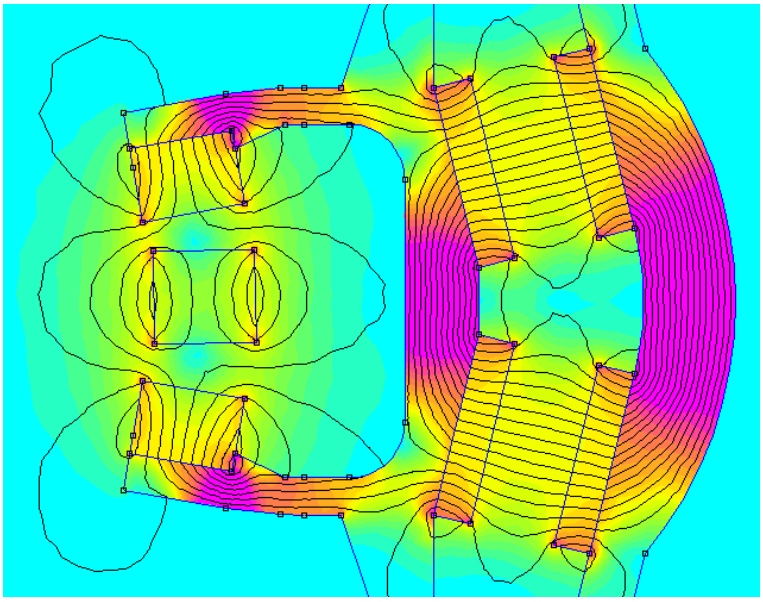


Obr. 21: Magnetický výpočet ramene bez oblouku

Nyní máme vhodnou koncepci z hlediska tuhosti s nedostatky v podobě přesycení budícího obvodu, viz kapitola 6.3.2. Je tedy potřeba udělat další změny pro optimalizaci sycení. Tyto změny však zároveň způsobí změny v realizaci konstrukce. Proto je potřeba je provádět spolu s tvorbou 3D modelu. Jedná se tedy o typický mechatronický postup. Tuto optimalizaci si tedy popíšeme spolu s tvorbou výsledné konstrukce v kapitole 6.4.

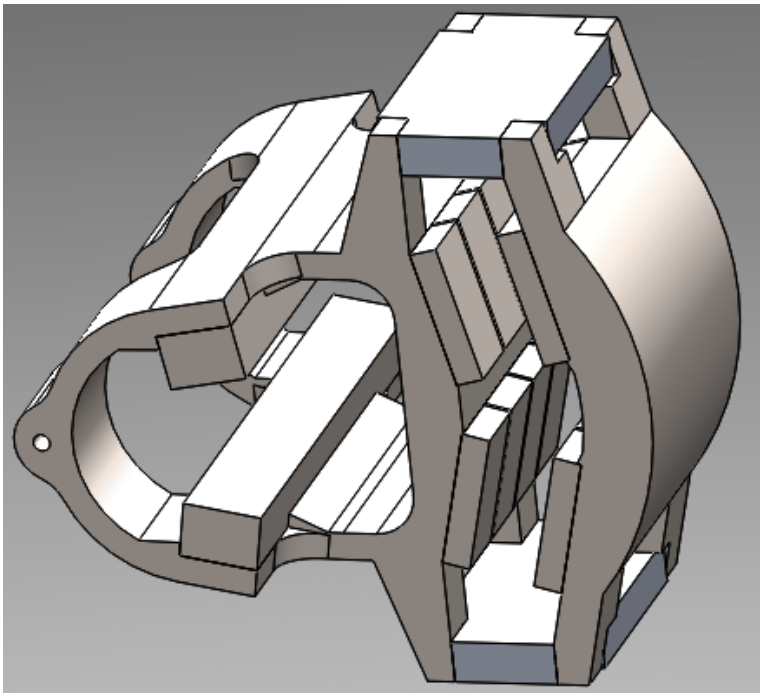
6.4 Návrh konstrukce

Z hlediska tuhosti vyšla jako vhodná koncepce geometrie na Obr. 21. U této geometrie však vyvstává otázka, jak připojíme rameno k ose otáčení. Řešení je jednoduché. Magnety, které vytváří tuhost, jsou hluboké 36 mm, zatímco budicí obvod jen 21 mm. Tedy v části, kde je budicí obvod cívky, využijeme variantu ramene bez oblouku, která je vidět na Obr. 21. V části, kde už jsou samotné magnety pro tuhost, využijeme jen část oblouku, viz Obr. 17. Z těchto poznatků, optimalizace budicí části a z promýšlení realizovatelnosti konstrukce jsme dostali výsledný tvar ramene, u nějž jsme provedli magnetický výpočet. Pokud se podíváme na tento magnetický výpočet, pro část bez oblouku na Obr. 22, zjistíme, že sycení je mnohem rovnoměrnější. Navíc bylo výrazně sníženo jeho maximum na 1,3 T oproti původním 1,9 T.



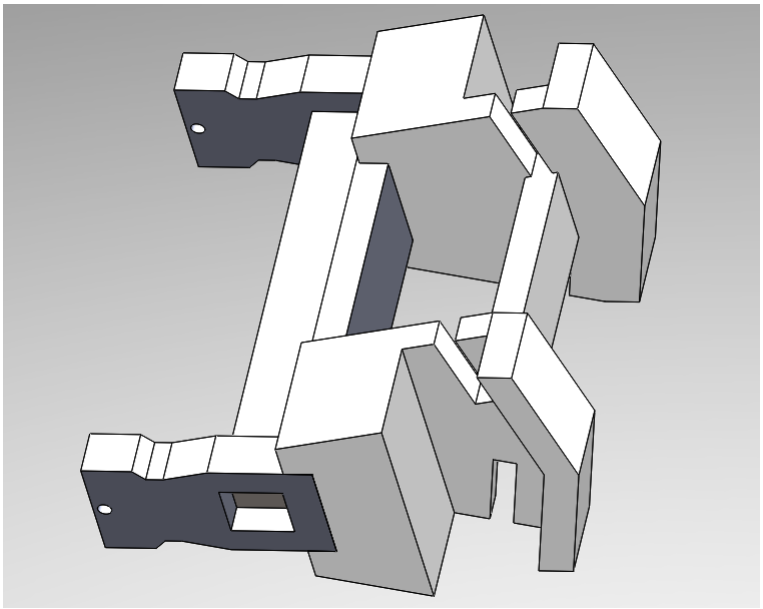
Obr. 22: Magnetický výpočet výsledného tvaru ramene

Tento tvar jsme ještě doplnili o prvky pro spojení pravé a levé budicí části a mohli jsme vytvořit model ramene, který je na Obr. 23. Důležitým výstupním parametrem byl moment setrvačnosti. Ten vyšel $71e^{-6}kg.m^{-3}$, takže nebylo třeba přepočítávat magnety pro tuhost a mohli jsme si ušetřit další iterační krok. Dalšími důležitými hodnotami byly: hmotnost 88 g a vzdálenost těžiště od osy otáčení 24 mm.



Obr. 23: Model ramene

Posledním krokem byl vývoj pevného rámu. U toho jsou požadavky na tuhost, nízkou hmotnost a snadnou montáž. Jinak svými vlastnostmi významně neovlivňuje dynamiku ramene, takže je zbytečné se jím blíže zabývat. Snad jen pro představu zobrazme model tohoto rámu.



Obr. 24: Model rámu

7 Simulace generátoru se zadaným buzením

7.1 Model generátoru v programu Simulink

Pro simulaci bylo rozhodnuto vytvořit model v programu Simulink. Tento program byl přiblížen v kapitole 5.3. Model je vlastně blokovým schématem rovnic, které generátor popisují. Jádrem modelu jsou rovnice (5), která popisuje kmitání ramene, a rovnice (2), která popisuje elektromagnetickou indukci. Dále jsou použity základní kinematické rovnice, jako je vztah mezi momentem a zrychlením, a základní elektrické rovnice, především Ohmův zákon. Celkové analýze modelu se nebudeme věnovat. Jednalo by se prakticky pouze o výčet rovnic, které jsou v modelu obsaženy. Obdobný model, i s komentářem, můžeme nalézt v [20].

Popišme si však jednu zásadní odlišnost oproti tomuto modelu. Jedná se o přepočet lineárního zrychlení na rotační zrychlení. Citovaná práce uvažuje rameno generátoru jako hmotný bod o shodné hmotnosti. Vzdálenost od osy otáčení se dopočítá tak, aby byl moment setrvačnosti stejný, jako u modelu. Lze však provést jednoduchou myšlenkovou úvahu, která nás přivede k závěru, že toto zjednodušení je nepřesné. Představme si kotouč s osou otáčení v geometrickém středu. Moment setrvačnosti je nenulový, tedy nahradíme ho hmotným bodem s nenulovou vzdáleností od osy otáčení. Pokud na takovýto hmotný bod budeme působit lineárním zrychlením, uvedeme ho do pohybu. Pokud však budeme na kotouč působit lineárním zrychlením, nebude se dít vůbec nic. Jak jinak tedy provést tento přepočet z lineárního zrychlení na rotační? Začneme pohybovou rovnicí.

$$M = \alpha \cdot I \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{M}{I} \tag{8}$$

Moment setrvačnosti I známe z 3D modelu, α je hledané úhlové zrychlení. Zbývá otázka, kde vzít budicí moment. Můžeme uvažovat, že lineární zrychlení působí v těžišti. Opět sestavme pohybovou rovnici, tentokrát pro přímočarý pohyb.

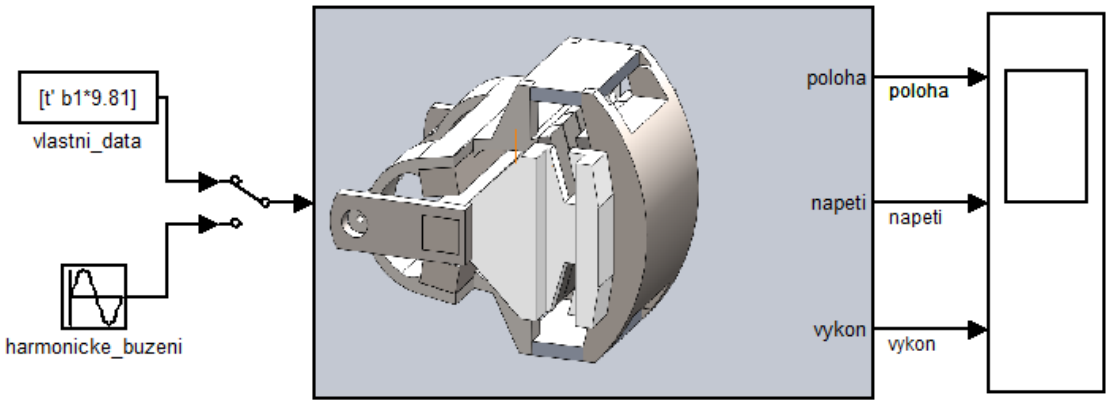
$$F = a \cdot m \tag{9}$$

Zrychlení a je budící zrychlení, hmotnost m známe z 3D modelu, takže sílu v těžišti dokážeme snadno určit. Tuto sílu stačí vynásobit vzdáleností její nositelky od osy rotace a dostaneme budící moment. Dostaneme tak výsledný vztah pro převod lineárního zrychlení a úhlové zrychlení. Tento vztah samozřejmě platí za předpokladu, že zrychlení působí kolmo na rameno a ve směru otáčení.

$$\alpha = a \cdot \frac{m \cdot r_x}{I} \tag{10}$$

Dalším krokem bylo vytvoření vhodného prostředí pro zadávání vstupních parametrů. Bylo zvoleno zamaskování generátoru do subsystému, jehož vstupem je buzení a výstupem jsou informace o rychlosti a poloze ramene a výkonu na zátěži. Parametry

generátoru lze zadávat přes masku. Jako vstup lze volit harmonické buzení nebo datový vstup. Toho bylo dále využito pro simulaci s daty naměřenými pro tuto konkrétní aplikaci. Výstupy jsou zobrazeny v grafu. Z okamžitého výkonu je navíc vypočítávána efektivní hodnota, která je zobrazena spolu s ním v jednom grafu.



Obr. 25: Zamaskovaný model generátoru s měřícím příslušenstvím

7.2 Vstupní parametry

Jako první si můžeme uvést vstupní parametry modelu a dále se zabývat jejich určením. V masce subsystému jsou rozděleny do dvou záložek – tohoto rozdělení se budeme držet.

Mechanika

- Moment setrvačnosti
- Tuhost
- Činitel jakosti
- Hmotnost
- Poloha těžiště

Elektrika

- Vzdálenost cívky od osy otáčení
- Šířka cívky v el.mag. poli
- Počet závitů cívky
- Indukce
- Odpor cívky
- Odpor zátěže

Mechanické parametry získáme z 3D modelu generátoru, ze simulace tuhosti a činitel jakosti musíme odhadnout dle zkušeností – v našem případě zvolíme pesimistický odhad 100. Některé elektrické parametry vyplývají z 3D modelu a magnetické simulace. Parametry, které ještě musíme určit, jsou počet závitů cívky, odpor cívky a odpor zátěže. Odpor cívky je závislý na počtu závitů a průřezu vodiče. Odpor zátěže můžeme volit a je předmětem optimalizace. Počet závitů cívky je také do značné míry omezen. Máme totiž navržené jádro, kde je prostor pro cívku optimalizován z pohledu geometrického. Počet závitů se tedy bude odvíjet od průřezu vodiče a jeho určením se budeme zabývat v kapitole 7.2.1

7.2.1 Počet závitů cívky a její odpor

Podívejme se tedy, jaké počty závitů máme k dispozici a určeme si také odpory cívek, které těmto počtům budou náležet. Prostor pro cívku určíme z 3D modelu. Jedná se o prostor $2x8\,mm$, vyznačen na Obr. 19, tedy $16\,mm^2$. Lakovaný drát ze zkušenosti volíme od průměru $0{,}1\,mm$ výše.

První otázkou je, jaký zvolit koeficient plnění. Cívka je navíjena ručně. Jedná se o náročnou operaci, takže počítejme, že dráty budou ležet řadách vedle sebe. Jejich počet určíme tedy ze vzorce (11). Tento počet je pouze hrubým přiblížením a je potřeba počítat se skutečností, že výsledná cívka se může v počtu závitů značně lišit. Zkušenost ukázala, že vyššího koeficientu plnění je dosahováno se silnějším drátem – při ručním navíjení ho lze více dotahovat.

$$N = \frac{2}{d} \cdot \frac{8}{d} \tag{11}$$

Určeme si počty závitů pro běžně dostupné lakované dráty [21].

$$N_{0,1} = \frac{2}{0,1} \cdot \frac{8}{0,1} = 1600 \tag{12}$$

$$N_{0,15} = \frac{2}{0,15} \cdot \frac{8}{0,15} = 711 \tag{13}$$

$$N_{0,2} = \frac{2}{0,2} \cdot \frac{8}{0,2} = 400 \tag{14}$$

Nyní můžeme určit příslušný odpor každé cívky. Budeme k tomu potřebovat měrný odpor mědi, který určíme z [19] – $\rho = 16{,}9\,n\Omega m$. Dále délku vodiče l. Tu vypočítáme z počtu závitů a délky jednoho závitu. Počty závitů známe k jednotlivým průřezům cívky. Délku závitu určíme odhadem z modelu – $0{,}12\,m$. Plochu vodiče určíme z jeho průměru. Pro výpočet použijeme vztah pro výpočet odporu vodiče, který nalezneme například v publikaci [19].

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \tag{15}$$

Určeme odpory jednotlivých vinutí.

$$R_{0,1} = 16{,}9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1600 \cdot 0{,}12}{\pi \cdot 0{,}05^2 \cdot 10^{-6}} = 413\Omega \tag{16}$$

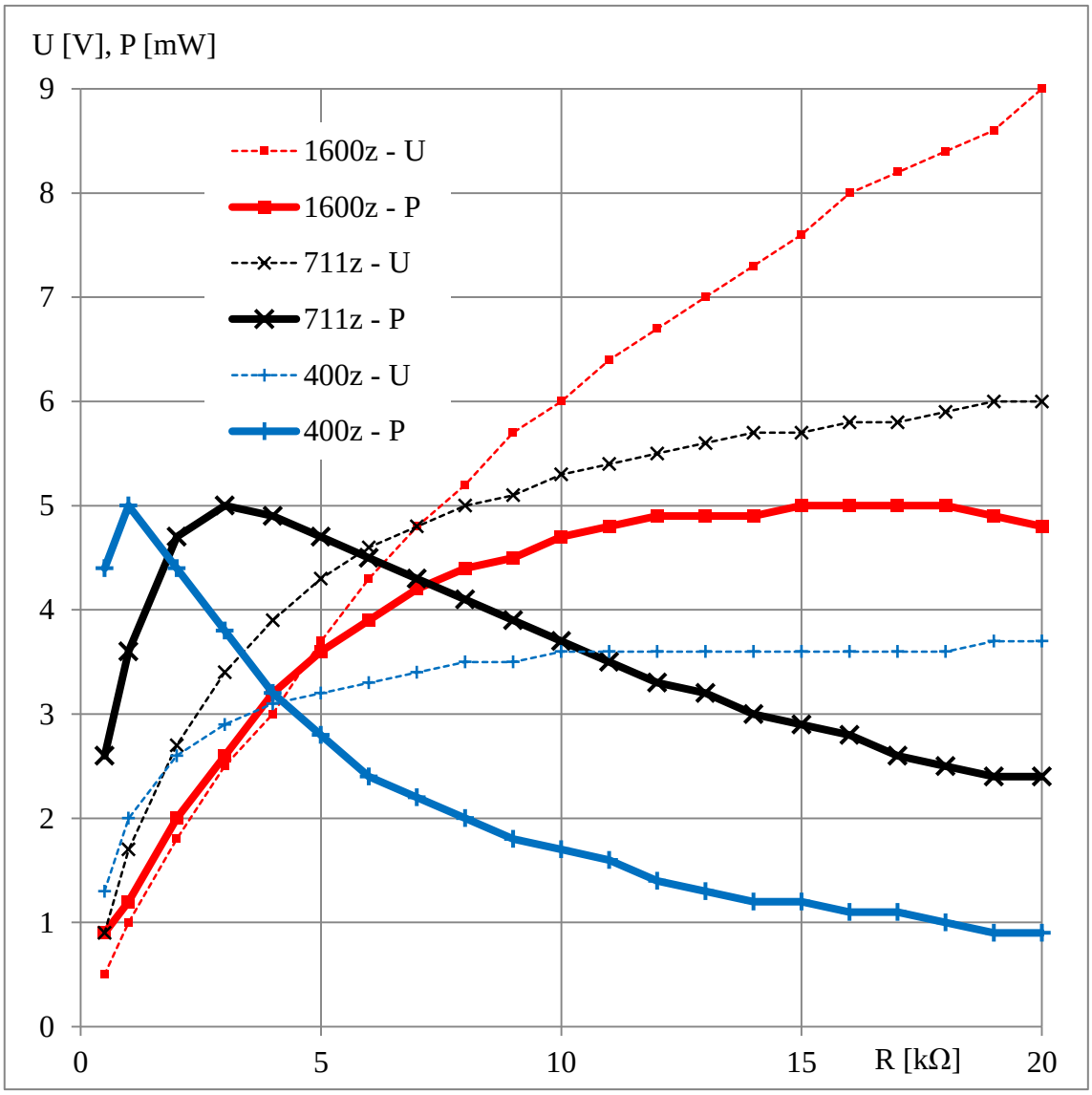
$$R_{0,15} = 16{,}9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{711 \cdot 0{,}12}{\pi \cdot 0{,}075^2 \cdot 10^{-6}} = 82\Omega \tag{17}$$

$$R_{0,2} = 16{,}9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{400 \cdot 0{,}12}{\pi \cdot 0{,}1^2 \cdot 10^{-6}} = 26\Omega \tag{18}$$

Vznikly nám tedy 3 navrhované cívky, z nichž ke každé jsme si určili počet závitů a odpor. Tyto cívky budeme v simulaci porovnávat spolu s různými zátěžemi a hledat optimální řešení.

7.3 Simulace jednotlivých cívek

V kapitolách 7.1 a 7.2 byl zpracován model a jeho vstupy. Nyní zbývá provést simulaci, ve které budeme sledovat závislost napětí a výkonu na odporu zátěže pro různé cívky. Výsledek simulace zobrazuje následující graf.



obr. 26: Graf závislosti napětí a výkonu cívek na odporu zátěže

Z grafu je patrné, že nejvyšší výkon je pro všechny tři cívky přibližně stejný. Takový výsledek bylo možné očekávat – pro každou cívku musí existovat zátěž, se kterou bude mít cívka maximální účinnost, a tyto maximální účinnosti se nemohou mezi sebou výrazně lišit.

Rozdíl je však v odporech, se kterými je tato účinnost dosahována a také v napětí, které je při tomto výkonu a dané zátěži k dispozici. Volba konkrétní cívky tedy do značné míry závisí na volbě elektroniky. Vliv na maximální možný výkon je zanedbatelný.

8 Finální návrh konstrukce pro výrobu

Simulace ukázala přijatelné chování generátoru a bylo tedy rozhodnuto o jeho výrobě. Ocelové části ramene měly být vyrobeny metodou 3D tisku. Při zadávání do výroby se však ukázalo, že žádná z nabízených ocelí není feromagnetická. Tato skutečnost zcela narušila zamýšlenou konstrukci, protože obrábění zvolených tvarů by bylo velice náročné. Bylo tedy rozhodnuto o přepracování konstrukce.

V této kapitole budou ukázány varianty přepracování konstrukce, výběr jedné z nich a její realizace. Bylo nutné znovu projít všechny kroky návrhu, které však byly analogické s kapitolou 6, a proto se jimi nebude blíže zabývat. Ukážeme si pouze zásadní změny a výslednou simulaci.

8.1 Konstrukční alternativy

Nabízelo se několik možností, jak konstrukci přepracovat. Většina těchto možností byla zpracována pouze myšlenkově, a proto si zde uvedeme jejich slovní popis, nikoliv 3D model.

8.1.1 Úprava pro obrábění

První myšlenky směřovaly ke konvenčnímu obrábění s minimálními úpravami stávajícího tvaru. Zásadní problém byla tvarová náročnost při současné velké hloubce obrábění. Bylo by tak zapotřebí obrábět frézou malého průměru s velký vysazením. To je obecně problém, a pokud už se to podaří, trvá obrábění velice dlouho a zvyšují se tak náklady.

Přemýšlelo se tedy o drobných úpravách, které by obrábění ulehčily. Jedna z nich byla snížení hloubky obrábění zúžením ramene na šířku budicích magnetů. Zmizel by tak problém velkého vysazení frézy, avšak nezmizela by tvarová náročnost. Navíc by se zhoršily vlastnosti magnetického obvodu. Původní návrh totiž kombinoval magnetickou koncepci na Obr. 17 pro vnější části a koncepci na Obr. 22 na střední část s budicími magnety. Při zamýšleném zúžení ramene by byl uzavřen magnetický obvod jen ve střední části s budicími magnety dle Obr. 20. Tento obvod neposkytuje takovou tuhost jako obvod s otevřenou levou stranou, ale jedná se o rozdíl pouze 1-2 %. Významnější vliv by měla skutečnost, že vnějším částem magnetů pro tuhost, by se uzavíral magnetický tok přes vzduch a zde by bylo výrazné oslabení.

8.1.2 Kombinace obrábění a lepení

Další možnost byla obrábět jednotlivé části samostatně a poté je kompletovat lepením. Značně by se snížila náročnost obrábění a doba výroby, avšak výsledné vlastnosti by nebyly dostatečné. Při lepení hrozí nepřesnosti a lze se obávat také zhoršení magnetických vlastností.

8.1.3 Uzavření magnetického obvodu pouze pro budicí magnety

Poslední varianta, která byla uvažována, se týkala největší změny v konstrukci. Feromagnetická ocel by byla použita pouze pro uzavření magnetického obvodu budicích magnetů. Magnetický obvod magnetů pro tuhost by se žádným feromagnetickým materiálem neuzavíral. Snížila by se tak tuhost, takže by se snížila také vlastní frekvence, viz vztah (6). Pokud však nahradíme ocelovou část duralovou, sníží se hmotnost, a nemusí tedy nutně dojít ke změně vlastní frekvence.

Jádrem myšlenky jsou tedy obráběné ocelové díly pro uzavření magnetického obvodu budicích magnetů a nosná konstrukce vytištěná z duralu metodou 3D tisku. Taková varianta přináší největší snížení tuhosti, ovšem slibuje také snížení hmotnosti.

8.1.4 Volba vhodné alternativy

Představili jsme si základní alternativy k původně zamýšlené konstrukci ramene pomocí metody 3D tisku. Nyní je třeba vybrat vhodnou variantu a tu zpracovat do finálního konstrukčního řešení.

Už ze samotné kapitoly 8.1.2 vyplývá, že nebude tím správným řešením, a proto se jí nebudeme dále zabývat. V úvahu tedy připadají varianty popsané v kapitolách 8.1.1 a 8.1.3.

Řešení s úpravou pro obrábění by nepřineslo taková zhoršení magnetického obvodu magnetů pro tuhost a nevyžadovalo by zásadní změny v konstrukci. Ovšem obrábění by v tomto případě bylo náročné a konstrukce by ztratila své synergické uspořádání. Nelze tedy říct, že by takové řešení nebylo vhodné, ale v našem případě budeme hledat vhodnější řešení.

Tím vhodnějším řešením bude řešení nastíněné v kapitole 8.1.3, kdy budeme muset zásadním způsobem přepracovat konstrukci, přepočítat vlastní frekvenci a možná bude nutné měnit polohu magnetů. Tento přístup však slibuje možnost nalezení výhodné alternativy, která bude lehčí. Ověření tohoto předpokladu přinesou další kapitoly.

8.2 Finální úpravy konstrukce

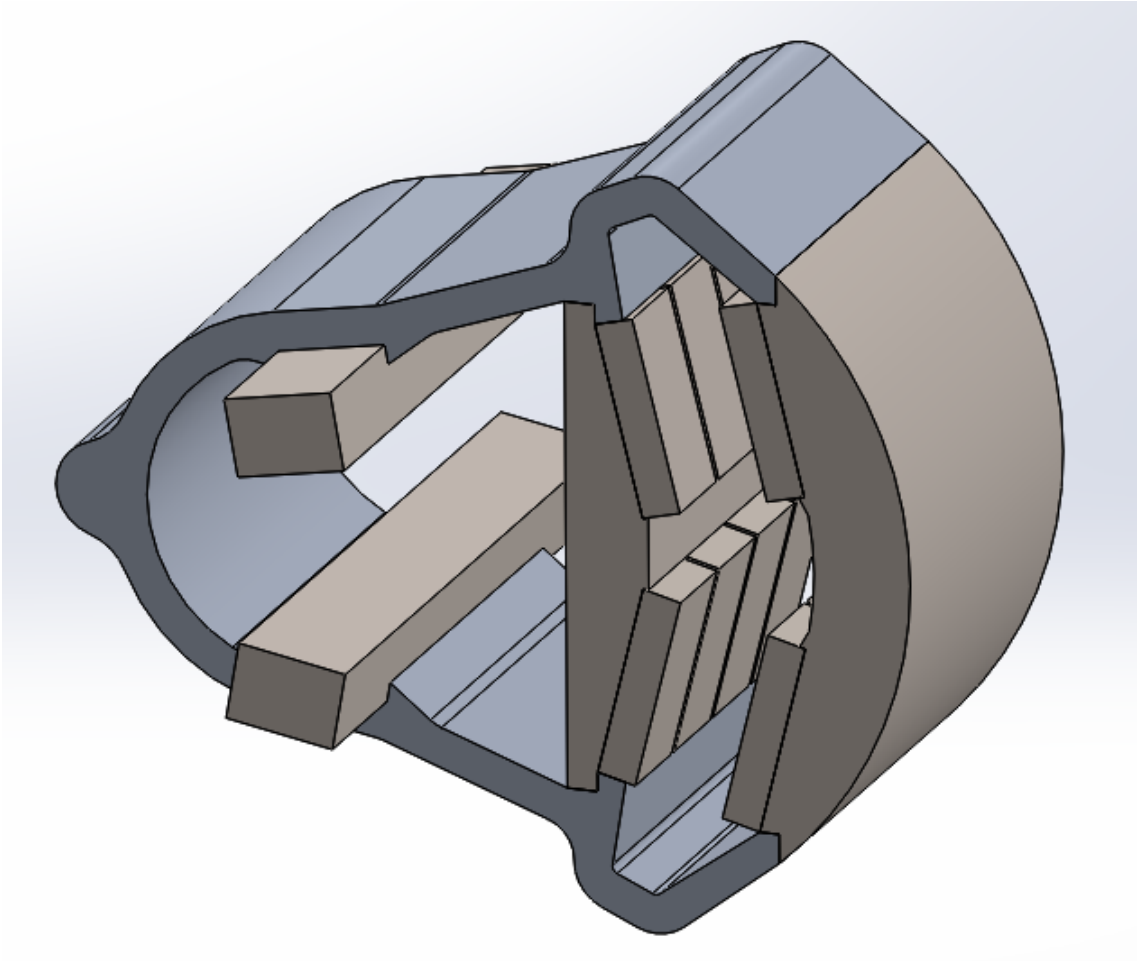
V kapitole 8.1 byly uvedeny možnosti úpravy konstrukce a vybrána vhodná z nich. V této kapitole se zaměříme na realizaci těchto úprav. Především se bude jednat o tvorbu 3D modelu pohyblivého ramene, ze kterého získáme hodnoty potřebné pro simulaci generované energie a také pro určení vlastní frekvence kmitání ramene.

Simulace generované energie bude provedena především pro srovnání s původním návrhem v kapitole 8.3. Oproti tomu výpočet nové vlastní frekvence ze změněného momentu setrvačnosti s magnety pro tuhost bez feromagneticky uzavřeného magnetického obvodu bude zásadní z hlediska funkce. Pokud by vlastní frekvence vyšla nižší nebo shodná s frekvencí budící, museli bychom měnit magnety nebo jejich polohu. Důvody tohoto postupu byly uvedeny v kapitole 6.1.4. Tato kontrola je přímou součástí návrhu, a proto bude uvedena přímo v této kapitole.

8.2.1 Model pohyblivého ramene

Původně zamýšlená konstrukce pohyblivého ramene, jak ji můžeme vidět na Obr. 23, byla složena z 2 ocelových částí, které uzavíraly magnetický obvod magnetů pro tuhost i budicích magnetů a 2 duralových vzpěr, které držely konstrukci vcelku. Nová konstrukce bude mít také 2 ocelové části, které však budou uzavírat pouze magnetický obvod budicích magnetů. Zbývá zvolit vhodnou konstrukci nosného oblouku, jeho propojení s ocelovými částmi budicího obvodu a propojení těchto 2 ocelových částí mezi sebou. Zde je opět vhodné zvolit mechatronický přístup a pokusit se vyřešit konstrukci pohyblivého ramene tak, aby kromě 2 ocelových částí obsahovala pouze 1 duralovou, do které budou ocelové zasazeny. Jedná se tedy o synergii nosného oblouku a vzpěr pro propojení vnější a vnitřní části budicího magnetického obvodu.

Ocelové části pro uzavření magnetického budicího obvodu byly prakticky beze změn převzaty z původně zamýšlené konstrukce. Samozřejmě vnitřní část byla bez nosného oblouku. Změny se týkaly pouze osazení pro kompletaci s nosným obloukem. Na tyto ocelové části byl dále navrhován nosný oblouk. Finální model ramene můžeme vidět na Obr. 27.



Obr. 27: Finální model ramene

Důležité fyzikální vlastnosti ramene určené z modelu:

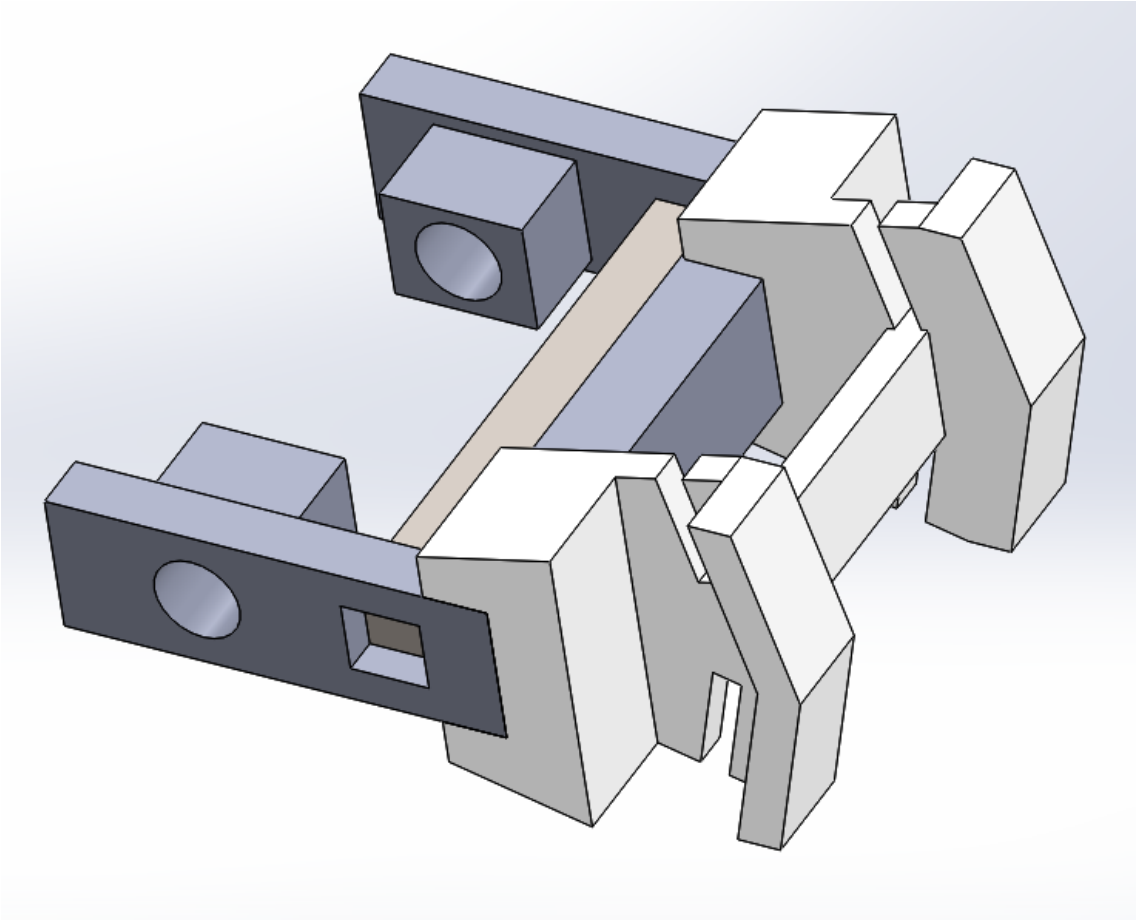
- Hmotnost – 70 g
- Vzdálenost těžiště od osy otáčení – 27 mm
- Moment setrvačnosti k ose otáčení – $60e^{-6}\ kgm^2$

8.2.2 Model pevného rámu

Posledním krokem konstrukce byl pevný rám. Ten se svými parametry již přímo nepodílí na generování energie. Ovlivňuje celkovou tuhost konstrukce a především náročnost montáže.

Finální verze pevného rámu je jen mírně upravená verze původně zamýšlené konstrukce. Přibylo osazení u osy otáčení kvůli zúžení ramene a díky vícedílné konstrukci ramene, byl rám celkově zesílen a prodloužen pro snadnější uchycení.

Rám je poměrně otevřený změnám, a tak není problém jej upravit pro požadavky konkrétní montáže. V tom je výhoda oproti původně zamýšlené konstrukci, kde byl tvar rámu značně omezen z montážních důvodů.

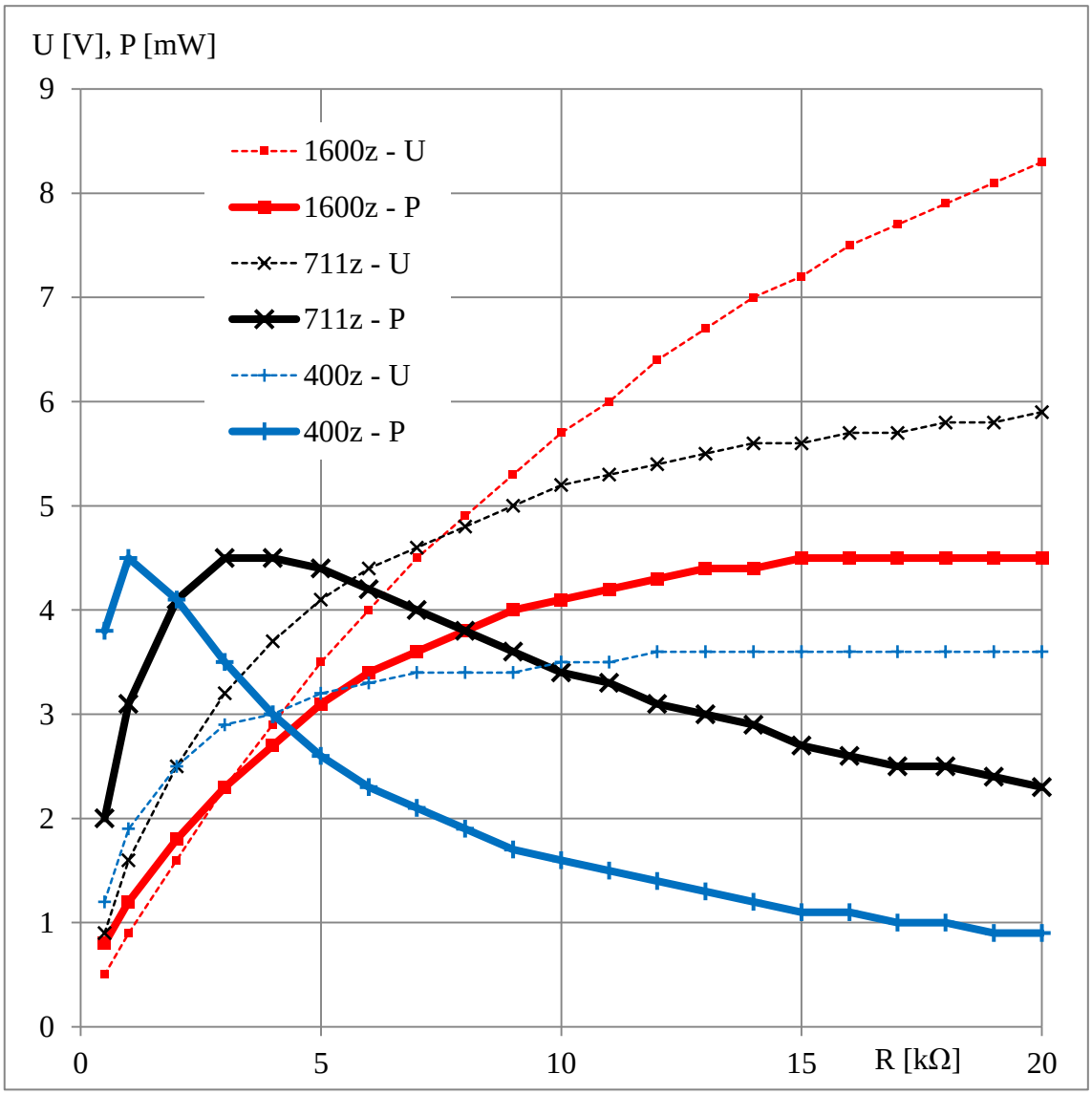


Obr. 28: Finální model rámu

8.3 Simulace finální konstrukce se zadaným buzením

Simulace proběhla shodně s kapitolou 7. Parametry elektrické části generátoru byly zcela shodné. U mechanické části jsme změnili hmotnost, polohu těžiště a moment setrvačnosti podle nového modelu. Činitel jakosti zůstal stejný.

V simulaci byly patrné také rozdíly, které uvedený graf nezobrazuje. Především to byla větší rychlost odezvy na změnu v buzení. V praxi to tak může znamenat větší nebezpečí dosažení mezní výchylky generátoru při chvilkovém zvětšení buzení a vyšší kolísání generovaného výkonu. Simulace jsou však natolik přibližné, že nemá smysl se touto problematikou blíže zabývat.



Obr. 29: Graf závislosti napětí a výkonu cívek na odporu zátěže finálního modelu ramene generátoru

8.4 Porovnání navržených konstrukcí

V této kapitole jsme navrhli finální konstrukci pro výrobu, ve které jsme oproti původně zamýšlené konstrukci provedli určitá zjednodušení z hlediska výroby a montáže za cenu zhoršení magnetického obvodu magnetů pro tuhost. Je na místě otázka, zda finální konstrukce přinesla horší vlastnosti a pokud ano, o jaké zhoršení se jednalo.

Prvním parametrem ke kontrole byla vlastní frekvence. Tuhost sice klesla, ale mnohem výrazněji klesl moment setrvačnosti ramene, takže nebylo třeba měnit polohu magnetů pro tvorbu torzní tuhosti. V případě vyšší vlastní frekvence není problém ji snížit dovážením, jak bylo vysvětleno v kapitole 266.1.

Nyní se podívejme na výstup z generátoru, tedy na výstupní výkon. Z grafů je patrno, že v případě původně zamýšlené konstrukce byl maximální generovaný výkon $5\,mW$ a v případě finální konstrukce je to $4{,}5\,mW$. Vhodným měřítkem pro porovnání je generovaný výkon na $100\,g$ pohyblivé hmotnosti.

V případě původně zamýšlené konstrukce generátoru je to:

$$P_{100} = \frac{P}{m} = \frac{5}{0{,}88} = 5{,}68\,mW/100g \tag{19}$$

V případě finální konstrukce potom:

$$P_{100} = \frac{P}{m} = \frac{4{,}5}{0{,}7} = 6{,}43\,mW/100g \tag{20}$$

Z uvedeného je jasně vidět, že finální konstrukce, s úpravami pro výrobu za cenu zhoršení magnetických vlastností, má lepší poměr generovaného výkonu na kmitající hmotnosti. Ze simulačního hlediska lze tedy návrh považovat za úspěšný.

9 Závěr

Prvním bodem práce byla analýza současného stavu autonomních elektronických aplikací v leteckém průmyslu. Ta přinesla zjištění, že v posledních letech vývoj prudce postupuje, a to prostřednictvím několika velkých leteckých projektů a dále díky dalším dílčím výzkumům. Vývoj stále nedosáhl vrcholu a proto má význam se dalším vývojem v této oblasti zabývat.

Další tři body se zaměřovaly právě na vývoj v oblasti autonomních elektronických aplikací v leteckém průmyslu, konkrétně na vývoj vibračního generátoru. Šlo o inovaci již existujícího generátoru navrženého na VUT v Brně.

Prvním krokem v inovaci byl návrh parametrů vhodné koncepce konstrukčního řešení generátoru dle požadavků na aplikaci. Jeho součástí bylo modelování magnetických polí magnetů pro tuhost a budicích magnetů. V rámci tohoto kroku bylo vytvořeno grafické ovládací rozhraní pro výpočet torzní tuhosti. Výstupem těchto simulací byly rozměry a polohy magnetů, dle kterých byl vytvořen 3D CAD model generátoru.

Dalším bodem bylo pomocí simulačního modelování analyzovat množství generované energie. V rámci tohoto bodu byl vytvořen model generátoru v programu Simulink. Jako vstupy byly použity parametry získané z magnetických modelů, z 3D CAD modelu a zadaný vzorek budicích vibrací. Simulace byla provedena pro tři různé cívky a byla sledována závislost výkonu na odporu zátěže.

Posledním bodem byl návrh finálního funkčního vzorku generátoru. Vzhledem k uspokojivým výsledkům simulace bylo zamýšleno využít již vytvořený 3D CAD model, jehož parametry byly pro simulaci využity, ale ukázalo se, že jeho výroba s požadovanými vlastnostmi není v současné době možná. Konstrukce byla tedy přepracována do finální podoby pro výrobu. Kleslo množství generované energie, ale zároveň se snížila hmotnost, takže poměr generované energie ke hmotnosti vzrostl. Lze tak konstatovat, že konstrukční úprava pro výrobu nakonec přispěla i ke zlepšení energetických vlastností.

Výstupem práce jsou tedy programy, které lze využít pro návrhy a testování dalších generátorů, a hlavním výstupem je navržený vibrační generátor, u něhož byla simulačně ověřena správná funkce. Následná výroba a praktické testování ukáží, nakolik byl návrh úspěšný a jaký bude mít přínos pro dané odvětví.

10 Seznam použitých zdrojů

[1] SUN, X. and HUANG, D. An Explosive Growth of Wind Power in China. *International Journal of Green Energy* [online]. 2014, vol. 11, no. 8, pp. 849–860 [accessed. 17. May 2014]. ISSN 1543-5075. Retrieved from: doi:10.1080/15435075.2013.830261

[2] HAMACEK, Š., BARTŁOMIEJCZYK, M., HRBÁČ, R., MIŠÁK, S. and STÝSKALA, V. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport. *Electric Power Systems Research* [online]. 2014, vol. 112, pp. 1–11 [accessed. 17. May 2014]. ISSN 03787796. Retrieved from: doi:10.1016/j.epsr.2014.03.001

[3] ALADWANI, A., ALDRAIHEM, O. and BAZ, A. A Distributed Parameter Cantilevered Piezoelectric Energy Harvester with a Dynamic Magnifier. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* [online]. 2014, vol. 21, no. 7, pp. 566–578 [accessed. 28. April 2014]. ISSN 1537-6494. Retrieved from: doi:10.1080/15376494.2012.699600

[4] CROSSLAND, A.F., JONES, D. and WADE, N.S. Planning the location and rating of distributed energy storage in LV networks using a genetic algorithm with simulated annealing. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* [online]. 2014, vol. 59, pp. 103–110 [accessed. 12. May 2014]. ISSN 01420615. Retrieved from: doi:10.1016/j.ijepes.2014.02.001

[5] HADAS, Z., KLUGE, M., SINGULE, V. and ONDRUSEK, C. Electromagnetic Vibration Power Generator. In: *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives* [online]. B.m.: IEEE, 2007, p. 451–455 [accessed. 21. May 2014]. ISBN 978-1-4244-1061-3. Retrieved from: doi:10.1109/DEMPED.2007.4393136

[6] BALDINI, B. (DASSAV). D6.3.3 WISE PROJECT PUBLISHABLE FINAL ACTIVITY REPORT. *WISE Web Site [MEMBERS/DOCUMENTS/D6.3.3/TS-0001]* [online]. 2008, p. 29. [accessed. 17. May 2014] Retrieved from: <http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201210/20121029_144424_25014_Publishable_final_activity_report.pdf>

[7] *Projekt ESPOSA* [online]. [accessed. 17. May 2014] Retrieved from: <http://www.pbsvb.cz/projekt-esposa>

[8] HADAS, Z., ONDRUSEK, C. and SINGULE, V. Power sensitivity of vibration energy harvester. *Microsystem Technologies* [online]. 2010, vol. 16, no. 5, pp. 691–702 [accessed. 27. May 2014]. ISSN 0946-7076. Retrieved from: doi:10.1007/s00542-010-1046-4

[9] BELLEVILLE, M. and CONDEMINE, C., eds. *Energy Autonomous Micro and Nano Systems*. B.m.: Wiley-ISTE, 2012, p. 384. ISBN 978-1-84821-357-9.

[10] *Transport Research & Innovation Portal - Project WISE* [online]. [accessed. 12. May 2014] Retrieved from: <http://www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=11286>

[11] *Transport Research & Innovation Portal - Project ADVICE* [online]. [accessed. 13. May 2014] Retrieved from: <http://www.transport-research.info/web/projects/project_details.cfm?id=35066>

[12] NAWROCKI, A. (CANAERO). ADVICE Publishable Final Activity Report. *AST5-CT-2006-030971* [online]. 2010, p. 59. [accessed. 5. May 2014] Retrieved from: <http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201211/20121102_101355_57479_123865371EN6.pdf>

[13] BECKER, T., KLAUE, J. and KLUGE, M. Energy Autonomous Systems in Aeronautic. In: BELLEVILLE, M. and CONDEMINE, C., eds. *Energy Autonomous Micro and Nano Systems*. pp. 59-82. B.m.: Wiley-ISTE, 2012, p. 384. ISBN 978-1-84821-357-9.

[14] *Projekt AMETYST* [online]. [accessed. 3. May 2014] Retrieved from: <http://www.ametyst-projekt.de/>

[15] SAMSON, D., OTTERPOHL, T., KLUGE, M., SCHMID, U. and BECKER, T. Aircraft-Specific Thermoelectric Generator Module. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2009, vol. 39, no. 9, pp. 2092–2095 [accessed. 17. May 2014]. ISSN 0361-5235. Retrieved from: doi:10.1007/s11664-009-0997-7

[16] HARAPÁT, J. *Komplexní model vibračního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

[17] HADAS, Z., VETISKA, V., HUZLIK, R. and SINGULE, V. Model-based design and test of vibration energy harvester for aircraft application. *Microsystem Technologies* [online]. 2014, vol. 20, no. 4-5, pp. 831–843 [accessed. 29. April 2014]. ISSN 0946-7076. Retrieved from: doi:10.1007/s00542-013-2062-y

[18] ŠANTAVÝ and LIŠKA. *Elektrina a magnetismus*. Brno: ÚFI FSI VUT, 2004.

[19] HALLIDAY, D., RESNICK, R. and WALKER, J. *Fyzika - Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2000, p. 1274. ISBN ISBN 80-214-1869-9.

[20] DRBOHLAV, J. *Testování vibračního generátoru s příčnou cívkou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

[21] *GES Electronics* [online]. [accessed. 21. May 2014] Retrieved from: <http://www.ges.cz/cz/>

11 Seznam obrázků

Obr. 1: Výchozí 17Hz generátor [8] 10
Obr. 2: Bezdrátové napájení senzoru a jeho komunikace s přístupovým bodem [11] ... 12
Obr. 3: Elektronické komponenty vyvinuté v rámci projektu ADVICE [13] 14
Obr. 4: Elektronické komponenty připravené pro testování [13] 14
Obr. 5: Graf závislosti SIR na vzdálenosti vysílače a přijímače [14] 17
Obr. 6: Schéma elektromagnetického vibračního generátoru [18] 19
Obr. 7: Elektromagnetické indukce ve vodiči 20
Obr. 8: Těleso na pružině 21
Obr. 9: Proces přeměny energie v elektromagnetickém vibračním generátoru 22
Obr. 10: Mechatronické schéma generátoru 23
Obr. 11: Uživatelské prostředí programu FEMM 24
Obr. 12: Původní řešení vazby pro tuhost 27
Obr. 13: Vize vazby pro tuhost 28
Obr. 14: GUI pro zadání parametrů 30
Obr. 15: Výsledná konfigurace magnetů 31
Obr. 16: Magnetický výpočet původní vize pohyblivého ramene 33
Obr. 17: Magnetický výpočet obloukové části ramene 33
Obr. 18: Magnetický výpočet původního buzení 34
Obr. 19: Skica magnetu a cívky 34
Obr. 20: Magnetický výpočet celého ramene 35
Obr. 21: Magnetický výpočet ramene bez oblouku 35
Obr. 22: Magnetický výpočet výsledného tvaru ramene 36
Obr. 23: Model ramene 37
Obr. 24: Model rámu 37
Obr. 25: Zamaskovaný model generátoru s měřícím příslušenstvím 39
Obr. 26: Graf závislosti napětí a výkonu cívek na odporu zátěže 41
Obr. 27: Finální model ramene 45
Obr. 28: Finální model rámu 46
Obr. 29: Graf závislosti napětí a výkonu cívek na odporu zátěže finálního modelu ramene generátoru 47

12 Seznam příloh

Příloha-A _____ Grafické rozhraní pro výpočet magnetů pro tuhost

Příloha-B _____ Model generátoru v programu Simulink

Příloha-C _____ 3D CAD model finální verze generátoru