



# 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

## NÁVRH AUTONOMNÍHO ZDROJE PRO MĚŘICÍ JEDNOTKU NA ROTORU ELEKTRICKÉHO STROJE

PROPOSAL OF AUTONOMOUS SOURCE FOR MEASUREMENT UNIT ON THE ROTOR OF THE ELECTRIC MACHINE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kura

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Ondřej Kura</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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:

## **Návrh autonomního zdroje pro měřicí jednotku na rotoru elektrického stroje**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Cílem je navrhnout zdroj napájení pro bezdrátovou jednotku sloužící k měření teploty na rotoru elektrických strojů. Princip by měl být založen na využití rotace elektrického stroje.

### **Cíle bakalářské práce:**

Literární průzkum  
Návrh mechanické části zdroje  
Návrh elektrické části zdroje  
Realizace měření parametrů zdroje

### **Seznam doporučené literatury:**

NOSKIEVIČ P. : Modelování a identifikace systémů, Ostrava 1999  
IDELČÍK, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.  
HAK, J., OSLEJSEK, O.: Computed of Cooling of Electric Machines, 1. volume. VUES Brno 1973,CZ  
ONDRUSKA, E., MALOUŠEK, A.: Ventilation and cooling of electric machines, SNTL Praha 1985

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem a následnou konstrukcí autonomního napájecího zdroje pro bezdrátovou měřicí jednotku teploty, která je umístěna na rotoru elektrického stroje. Teoretická část této práce je věnována popisem metod v oblasti energy harvesting a následnou implementací jedné z těchto možností na danou problematiku. Dále je zde vytvořen návrh mechanické a elektrické části zdroje pro vybrané řešení. V praktické části je provedena realizace vytvořeného návrhu s výsledným měřením parametrů zdroje.

## **ABSTRACT**

This thesis describes the design and the subsequent construction of the autonomous power supply for the wireless temperature measuring unit, which is placed on the rotor of the electric machine. The theoretical part of this work is devoted to the description of methods in the field of energy harvesting and the subsequent implementation of one of these possibilities on the given issue. Furthermore, there is a design of mechanical and electrical parts of the source for the selected solution. In the practical part is the realization of the created design with the final measurement of source parameters.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Energy harvesting, elektromagnetická indukce, napájecí zdroj

## **KEYWORDS**

Energy harvesting, electromagnetic induction, power supply



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Kura, O. *Návrh autonomního zdroje pro měřicí jednotku na rotoru elektrického stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..





## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a zkušeností při vypracování práce. Děkuji také mé rodině, především mému dědovi a otci, za pomoc a podporu nejen při této práci, ale i po celou dobu studia. A nakonec i všem ostatním, díky kterým se mi podařilo vypracovat tuto práci.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Vlacha, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 20.5.2019

.....

Ondřej Kura



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>ENERGY HARVESTING</b> .....	<b>15</b>
2.1	Co je to energy harvesting a jaké jsou jeho výhody.....	15
2.2	Zdroje energie .....	15
2.2.1	Termoelektrický jev .....	16
2.2.2	Vysokofrekvenční energie .....	17
2.2.3	Fotoelektrický jev.....	18
2.2.4	Piezoelektrický jev .....	19
2.2.5	Elektromagnetická indukce .....	20
2.3	Volba vhodné metody pro dané řešení.....	21
<b>3</b>	<b>TEORETICKÝ ROZBOR A NÁVRH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>22</b>
3.1	Teorie k elektromagnetické indukci.....	22
3.1.1	Magnetické pole a magnetická indukce .....	22
3.1.2	Magnetický indukční tok.....	23
3.1.3	Faradayův zákon elektromagnetické indukce a Lenzův zákon.....	23
3.1.4	Cívka, její indukčnost a reaktance .....	25
3.2	Návrh mechanické části .....	26
3.2.1	Specifikace měřicí jednotky .....	26
3.2.2	Dimenzování magnetů a cívek .....	26
3.2.3	Výpočet maximálního a efektivního indukovaného napětí.....	27
3.3	Návrh elektronické části.....	28
3.3.1	Usměrnění střídavého napětí.....	28
3.3.2	Stabilizátor napětí.....	30
3.3.3	Předstabilizátor napětí .....	31
<b>4</b>	<b>REALIZACE ŘEŠENÍ</b> .....	<b>32</b>
4.1	Příprava .....	32
4.2	Realizace mechanické části.....	32
4.2.1	Vrtačka a vykrúžovací vrták .....	32
4.2.2	Neodymové magnety .....	32
4.2.3	3D model hřídele s cívkami .....	33
4.3	Realizace elektronické části .....	34
4.3.1	Součástky pro napájecí zdroj .....	34
4.3.2	Pájení.....	34
<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ</b> .....	<b>35</b>
5.1	Fázové napětí .....	35
5.2	Voltampérová charakteristika napájecího zdroje .....	35
5.3	Vyšší otáčky .....	36
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>42</b>

# 1 ÚVOD

V dnešní době, kdy svět zažívá již čtvrtou průmyslovou revoluci, jenž spočívá v kyberneticko-fyzické budoucnosti, ve které bude automatizace všude kolem nás, se hledají alternativní zdroje energie. Zpravidla se pak zkoumají nevyužití zdroje z přírody a z přirozeně se vyskytujících jevů, což je nazváno jako energy harvesting. Tento pojem bude rozebrán podrobněji hned v další kapitole, nicméně je stěžejním pilířem, od kterého se tato práce bude rozvíjet. Postupně zde bude seznámeno s různými metodami, pomocí kterých lze využít energii pro širokou škálu přístrojů, zařízení či jiných aparátů.

Jakmile bude získán dostatek poznatků o tom, co je to energy harvesting a jaký je princip funkce daných metod, přijde úkol nejtěžší. Tímto úkolem je na mysli volba metody, která bude implementována pro konkrétní případ a tj. vytvoření autonomního napájecího zdroje pro bezdrátovou jednotku, jenž je umístěná na rotoru elektrického stroje a slouží k měření teploty právě tohoto rotoru. Proto bude třeba dané řešení pečlivě vybírat, aby bylo, pokud možno co nejvhodnější a jestliže to bude možné, mělo by být také založeno na principu s využitím rotace elektrického stroje.

V další kapitole bude vybraná metoda aplikována na zadaný úkol včetně teoretického rozboru a návrhu mechanické i elektrické části zařízení. S pomocí tohoto návrhu poté bude toto výsledné zařízení zrealizováno. Dále se zde změní parametry autonomního zdroje, které budou také důležitou součástí této práce.

Cílem práce by měla být úspěšná realizace zařízení i jeho měření, které by napájelo měřící jednotku na rotoru elektrického stroje. Mou motivací pro výběr této práce bylo to, že obsahovala všechny části vývoje určitého zařízení od volby metody, jakým bude fungovat až po následný návrh a realizaci. Hlavním lákadlem pro mě však byla praktická část, která byla nejzáživnější a u které jsem se naučil mnoho věcí o nichž vím, že je při mnoha činnostech určitě uplatním.

## 2 ENERGY HARVESTING

### 2.1 Co je to energy harvesting a jaké jsou jeho výhody

Pod tímto pojmem mohou být představeny zařízení, které jsou zkonstruovány tak, aby byly schopny energii z okolního prostředí vstřebat a využít ji k následnému napájení jiných zařízení.

Využitím této technologie by se odlehčilo zatěžování životního prostředí z pohledu snížení výroby jaderné nebo tepelné energie, které doposud stále vládou světu. Energy harvesting je stále na začátku vývoje a nedokáže zatím konkurovat dříve zmíněným elektrárnám v množství vyprodukované energie, ale už nyní je zde vidět velký pokrok v podobě větrných turbín nebo solárních panelů, jež vytváří poměrně značné množství energie. Hlavní odvětví však spočívá ve výrobě zdrojů pro napájení mikroelektronických součástek, přístrojů a senzorů, které díky modernizaci potřebují stále menší příkony i napětí pro chod.

Zásadních výhod má energy harvesting několik. Tou nejdůležitější je nevyčerpatelné množství této energie. Další podstatný přínos spočívá v nulové ceně a ve značném snížení nákladů při realizaci zařízení, jelikož není potřeba žádná kabeláž a tyto zařízení jsou plně samostatná. Poslední výhodou, která stojí za zmínku, je použití na těžko dostupných místech, právě díky bezdrátovému způsobu zapojení. Energy harvesting se uplatňuje téměř ve všech technologických odvětvích. Nejrozsáhlejší zastoupení tvoří u budov, kde je zapotřebí velké množství senzorů a bezdrátových přepínačů. Dále se pak uplatňuje v průmyslu, dopravních prostředcích nebo biomedicině. [1]



Obr. 1: Rozmanité zdroje energie kolem nás [1]

### 2.2 Zdroje energie

Existuje mnoho známých i doposud neznámých zdrojů energie z okolního prostředí, které mohou být použity pro výrobu elektřiny k napájení různých zařízení. I samotný člověk, resp. jeho běh nebo chůze může být zdrojem takovéto energie, avšak výsledný účinek je poměrně neefektivní. Daleko lepší využití mají přírodní zdroje jako např. vítr, proudění vody, solární energie nebo mořské vlny. Tyto zdroje mohou být čerpány v neomezeném množství, ale jsou

úzce spjaty s počasím. Další kategorie spočívá ve využití mechanické energie, která může pocházet z pohybu různých mechanismů či strojů nebo jejich vibrací. Tato forma energie se přetváří pro napájení zařízení pomocí piezoelektrického nebo elektromagnetického jevu. Důležitým zdrojem je i teplo, u něhož se využívá termoelektrického a pyroelektrického jevu. Dalším případem mohou být světelné zdroje záření. Díky nim se získává energie pomocí fotoelektrického jevu. Energie lze získat i z vysokofrekvenčního záření a v neposlední řadě existují také zajímavé chemické a biologické zdroje. Důležitým kritériem v porovnání vhodnosti daného zdroje je vyprodukované množství energie. [1]

Zdroj energie	Výkonová hustota
Akustický hluk	0,003 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ 0,96 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$
Teplotní změna	10 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$
RF	1 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (GSM 900 MHz) 0,001 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Wi Fi)
Okolní světlo	100 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (přímé slunce) 100 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (osvětlená místnost)
Termoelektrická energie	60 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (člověk) 1 - 10 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (průmysl)
Otřesy (mikrogenerátor)	4 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ (pohyb člověka Hz) 800 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ (stroj kHz)
Otřesy (piezoelektrický princip)	200 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$
Proudění vzduchu	1 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
Ztlačení tlačítka	50 $\mu\text{J}\cdot\text{N}$
Vložka v botě	330 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
Ruční generátor	30 $\text{W}\cdot\text{kg}$
Nárazy v podpatku boty	7 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$

Obr.2 Tabulka pro porovnání různých metod typu energy harvesting [1]

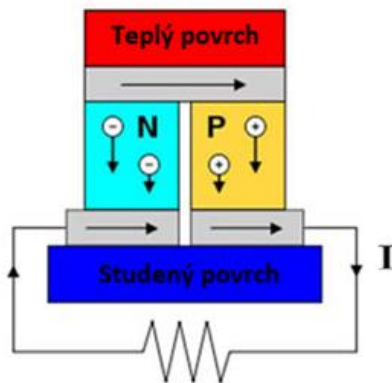
### 2.2.1 Termoelektrický jev

V roce 1821 Thomas Johann Seebeck zjistil, že teplotní gradient (rozdíl teplot) vytvořený mezi spoji dvou různých vodičů vytváří elektrické napětí. Tím započala studie a výzkum termoelektrických jevů. Tento jev je pozorován i u materiálů, které v sobě mají kombinaci vlastností vysoké elektrické vodivosti a nízké tepelné vodivosti, což je velmi vzácné. V tomto případě se nyní využívá nanotechnologie, kde se u polovodičů, jenž mají skvělé elektrické vlastnosti, snižuje jejich tepelná vodivost. Výroba však není jednoduchá a je velmi nákladná. Jedinými známými polovodiči s nízkou tepelnou vodivostí jsou v dnešní době  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (tellurid bismutitý),  $\text{PbTe}$  (tellurid olovnatý) a  $\text{SiGe}$  (germanid křemíku).

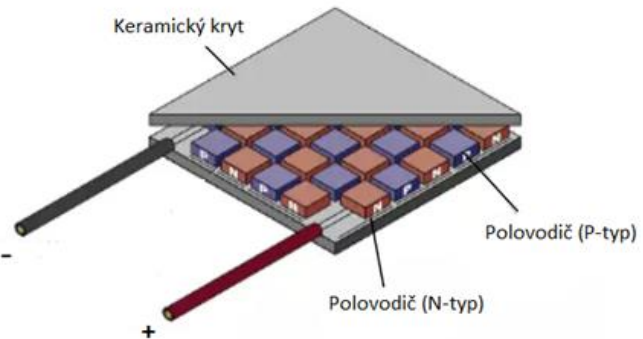
Princip fungování těchto materiálů je založen na nahřátí jednoho konce, odkud elektrony putují k chladnému konci a mezi konci se tudíž generuje elektrické napětí (obrázek 3). Dále pak existuje termoelektrický modul (obrázek 4). Obsahuje termoelektrické materiály a je schopen produkovat elektrickou energii. Modul musí pracovat s velkým počtem tepelných cyklů, které způsobují únavu materiálu, a také s velmi vysokými teplotními gradienty pro použitelné využití. Tento modul obsahuje dva termoelektrické materiály. Prvním materiálem je



záporně nabitý polovodič (N-ty) a druhým je kladně nabitý polovodič (P-ty). Tyto polovodiče jsou sériově uspořádány pro elektrické vedení a paralelně pro tepelné vedení. Horní a dolní část obvykle chrání keramický  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (oxid hlinitý), jenž má dobrou tepelnou vodivost a zajišťuje elektrickou izolaci.



Obr.3: Podstata funkce termoelektrického jevu (upraveno) [2]



Obr.4: Termoelektrický modul (upraveno) [3]

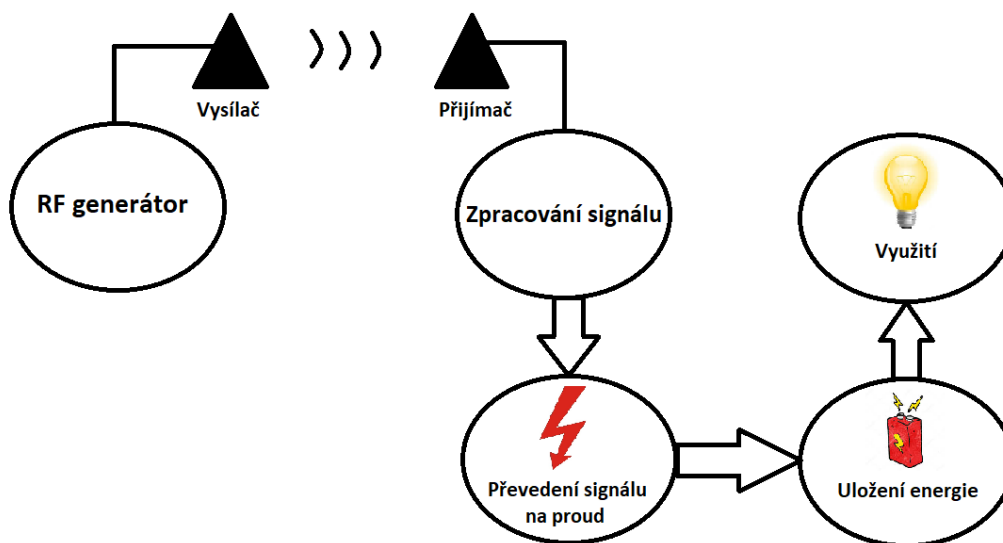
Využití termoelektrických jevů spočívá v teplotních rozdílech (gradientech), které se nacházejí všude kolem nás. Může být využito i rozdílu povrchové teploty naší kůže ( $32\text{ }^\circ\text{C}$ ) a okolního prostředí, ale v tomto případě není výsledný výkon moc efektivní ( $10$  až  $90\text{ }\mu\text{W}$ ). Daleko lepší využití je u výfukových plynů spalovacích motorů. Ty dosahují až několik stovek stupňů a ukazují dobrý příklad, jak se snadno dají sehnat vysoké teplotní gradienty. Napájení elektronických součástí pomocí termoelektrického jevu spočívá ve stálém proudění tepla, a tudíž i stálém prouděním proudu. Hlavní myšlenkou je zachování teplotního gradientu, který je spouštěčem napájení. Konstrukce těchto systémů musí být velmi precizní. Kdyby se rozdílné teploty vyrovnaly, tak by tento jev zanikl nebo by byl nedostatečný k napájení dané elektroniky.

Nevýhodou této metody napájení je jeho nízká účinnost ( $10\%$ ). Maximální použitelný výkon se pak pohybuje v rozmezí od jednoho až do několik stovek miliwattů. Využití se uplatňuje pro různé senzory, detektory nebo jako zdroje autonomních systémů pro vojenské a průmyslové aplikace. [3, 4, 5]

## 2.2.2 Vysokofrekvenční energie

Energie z vysokofrekvenčního (RF-Radio Frequency) záření je v současné době vysílána z miliard zařízení po celém světě jako např. z mobilních telefonů, rozhlasových, rádiových a televizních stanic nebo z WiFi routerů. V dnešním světě ji tudíž můžeme zachytit téměř kdekoli. Z mobilních telefonů (aktivních více než 5 miliard) lze využít energii pro různé krátko-dosahové aplikace jako je funkce Bluetooth. V krátkém dosahu např. v rámci jedné místnosti lze také využít malé množství energie (mikrowatty) z WiFi routeru. Pro větší vzdálenosti je nutné použít antény pro získání RF energie z vysílacích rádiových věží nebo z mobilních základnových stanic. Tyto různé zdroje vysílají různé rádiové kmitočty, které se musí pohybovat v předepsaném rozmezí, které určuje daná země nebo kontinent. Např. frekvenční pásmo  $230\text{--}400\text{ MHz}$  je v České Republice vyhrazeno pro účely obrany státu. Zařízení krátkého dosahu obvykle vysílají na mikrovlnách frekvenci o velikosti  $2,4\text{ GHz}$ . Frekvenci vysílačů zachycují specializované přijímače, které převedou RF energii na stejnosměrný proud. Tyto přijímače obsahují převážně standardní  $50\text{-ohmovou}$  anténu, která přivádí signál z vysílače do konvertoru, který je připojen k základové desce. Proud nám pak

koluje obvodem, ve kterém nabíjí kondenzátor nebo baterii, a ze kterých pak lze čerpat výslednou energii.



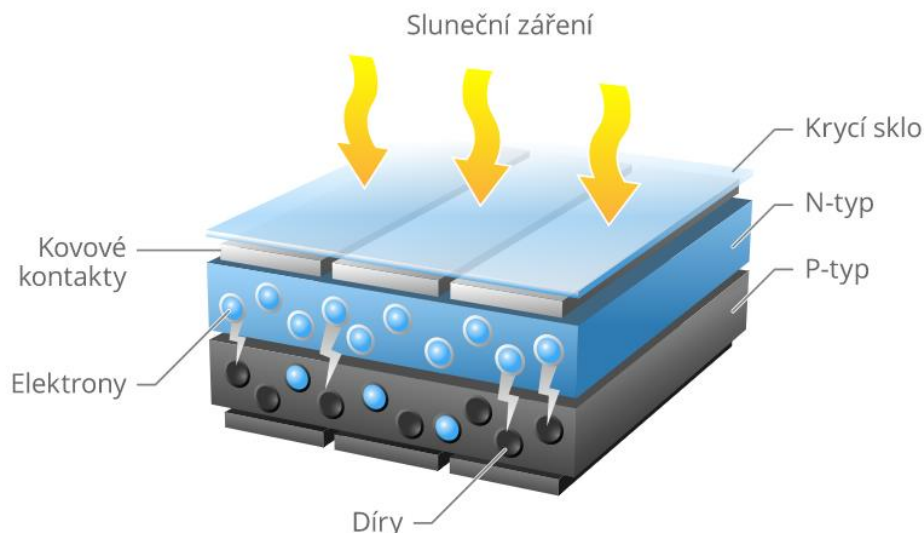
Obr. 5: Schéma funkce RF energie

Hodnota výkonu se pro toto řešení udává v dBm (decibel-miliwatt), přičemž 10 dBm odpovídá hodnotě 10 mW. Výkon, který je vygenerován pomocí této metody, se pohybuje v rozmezí 0,5-50 mW. Dnes tato energie slouží při napájení různých zdravotních senzorů nebo spotřební elektroniky (čtečky e-knih a headsety). Při větších vzdálenostech mohou být napájeny senzory sloužící pro HVAC systém (automatizace topení, ventilace a klimatizace v budovách). Technologie sběru energie z RF záření poskytuje jedinečný a široce dostupný zdroj, který se bude i nadále vyvíjet a účinně zlepšovat. [6, 7, 8]

### 2.2.3 Fotoelektrický jev

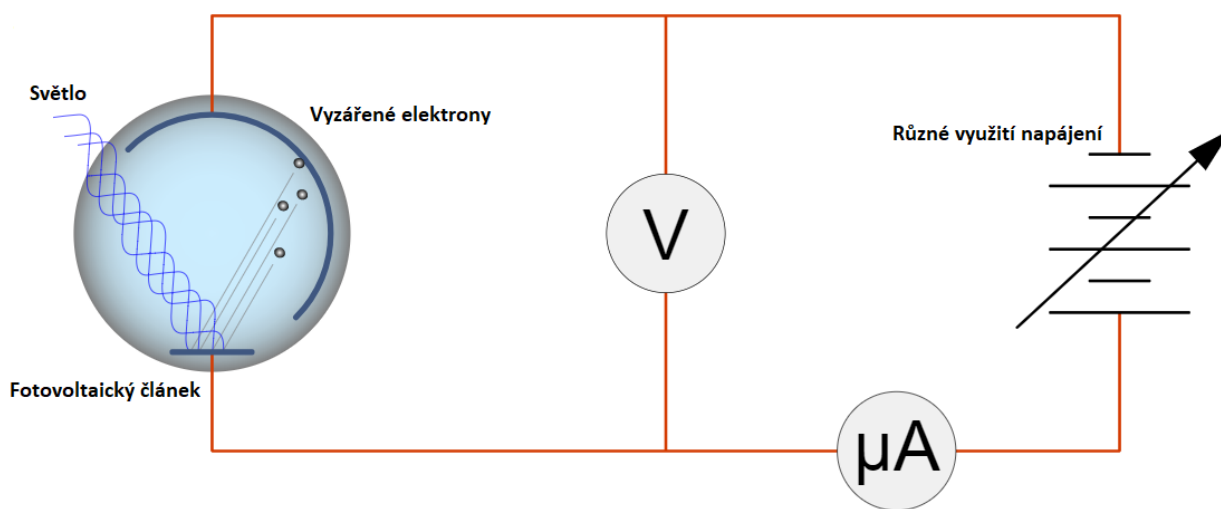
Za správných okolností může být zdroj světla (slunce) použit k uvolnění elektronů z povrchu pevné látky (především z kovů), které následně mohou vyvolat elektrický proud v obvodu. Tento proces se nazývá fotoelektrický jev, jenž byl poprvé pozorován roku 1887 Heinrichem Hertzem. První člověk, kterému se podařilo vysvětlit podstatu příčiny tohoto jevu byl Albert Einstein, jenž dostal za tento objev Nobelovu cenu.

Základem pochopení tohoto principu je objasnění šíření světla. Světlo je elektromagnetické vlnění o určité frekvenci a vlnové délce, které se chová jako soubor částic (světelných kvant). Tyto částice nazýváme fotony. Každý foton má svou energii, hybnost a šíří se rychlostí světla. Aby byl foton schopen uvolnit elektron, musí mu předat energii potřebnou k překonání vazby, která jej drží v elektronovém obalu atomu. Z přebytečné části předané energie se stává kinetická energie a elektron se začne pohybovat. Jeho místo (díru) ve vazbě zaujme nový elektron, čímž se začne šířit elektrický proud. Pro převod světelné energie na stejnosměrný elektrický proud se používá fotovoltaický článek (obrázek 6), který je tvořen polovodičem typu N a P. Tento článek je schopen vyprodukovat napětí okolo 0,5 V.



Obr. 6: Fotovoltaický článek (upraveno) [9]

Účinnost této metody je okolo 10 % a v současné době se jedná o nejvíce využívanou možnost přeměny energie. Princip fotoelektrického jevu se nejčastěji využívá v solární energetice. Dále se pak může uplatnit u nočního vidění, fotometrů, kamer nebo k ovládání různých mechanismů. [9, 10, 11]



Obr. 7: Princip fotoelektrického jevu (upraveno) [11]

#### 2.2.4 Piezoelektrický jev

Název tohoto jevu pochází z řeckého slova piezein (tlačit). Existence piezoelektriny se začala předpokládat už v 19. století, kdy Charles Coulomb tušil, že by u některých látek mohl vznikat elektrický náboj pomocí tlaku. Zkoumány byly různé krystaly (vápenec, slída, topaz), u kterých ale bylo dokázáno, že piezoelektrické nejsou. V roce 1880 pozorovali bratři Curieové vytvoření povrchového elektrického náboje při stlačování krystalu turmalínu a považují se tedy za objevitele tohoto jevu.

Princip využití spočívá v přeměně mechanického napětí (protažení, stlačení) krystalu na elektrický proud nebo napětí (obrázek 8). Tato zátěž může pocházet z mnoha zdrojů jako jsou např. vibrace, lidský pohyb nebo akustický šum. Jako materiál se používají krystaly křemene

(SiO<sub>2</sub>) nebo keramické materiály např. BaTiO<sub>3</sub> (titaničitan barnatý). Pro tyto krystaly je charakteristické to, že mají nesymetrickou krystalovou mřížku a jsou elektricky neutrální. Když je ovšem tento materiál stlačen nebo roztážen, dojde k deformaci molekul, přičemž se změní i polohy částic, které nesou kladné či záporné náboje. Na protilehlých plochách krystalu z tohoto důsledku vznikají stejně velké, ale opačné elektrické náboje. Když je poté krystal zapojen do elektrického obvodu, tak se poté bude generovat střídavé napětí v řádu několika setin voltů. Pomocí této metody je možno dosáhnout výkonu několika miliwattů.

Piezelektrina má širokou škálu využití v odvětvích jako je lékařství, průmysl či běžná domácnost. Typickým zařízením je zapalovač, u kterého se zmáčkne tlačítko, jenž stlačí krystal, který vyvolá elektrickou jiskru. Dále slouží jako zdroj pro křemenné hodiny, ultrazvukové sondy a snímače tlaku. [12, 13, 14]



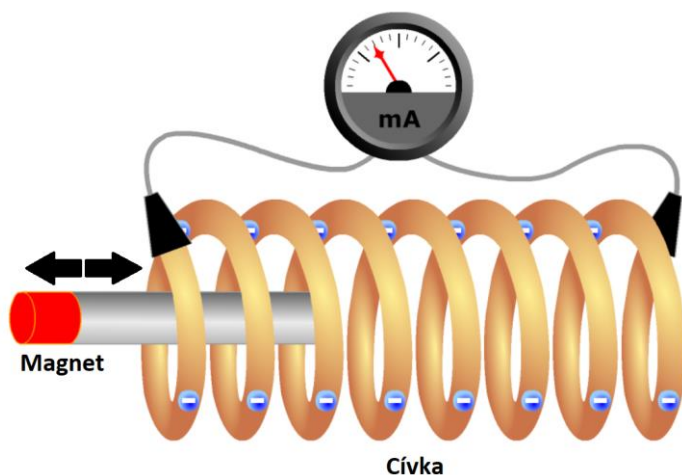
Obr. 8: Generování napětí pomocí piezoelektrického jevu [15]

### 2.2.5 Elektromagnetická indukce

V roce 1820 bylo zjištěno, že kolem vodiče v uzavřeném obvodu, kterým prochází elektrický proud, vzniká magnetické pole. Tímto objevem se začal zabývat Michael Faraday, jenž byl přesvědčen i o existenci protějšího jevu. Napadla ho myšlenka, že při určitém působení magnetického pole na vodič bude vznikat elektrický proud. Tyto jevy jsou stejného původu a hovoříme tedy o elektromagnetické indukci.

Aby tohoto jevu bylo docíleno bude potřeba vytvořit nestacionární (časově proměnné) magnetické pole. Toto pole může být vytvořeno dvěma klasickými způsoby, a to pohybem magnetu v blízkosti vodiče nebo pohybem vodiče v blízkosti magnetu. Speciální elektrotechnická součástka, která se používá pro tuto metodu, se nazývá cívka. Jedná se o dlouhý vodič o malém odporu, jenž je navinutý na izolační materiál. Princip funkce elektromagnetické indukce je velmi jednoduchý (obrázek 9). Pohybující se magnet působí proměnnou silou na elektrony ve vodiči, které jsou následně uvedeny do pohybu, čímž začne vodičem procházet indukovaný proud. Prvními mechanickými stroji, které využívaly princip elektromagnetické indukce byly alternátory a dynama. Alternátory mění mechanickou energii na střídavý proud, zatímco dynama na proud stejnosměrný. Oba stroje se skládají ze statoru, který se nepohybuje a je tvořen permanentním magnetem a z otáčejícího rotoru. Dále se používají transformátory, jejichž funkcí je změna elektrického napětí.

Elektromagnetická indukce tvoří nedocenitelnou část technického pokroku a díky ní byl umožněn vznik elektromotoru, indukční varné desky, indukční pece nebo také magnetické rezonance používané v lékařství a mnoha dalších užitečných přístrojů. [16, 17]



Obr. 9: Princip elektromagnetické indukce (upraveno) [18]

### 2.3 Volba vhodné metody pro dané řešení

Z výše uvedených metod bude nyní vybrána taková, která bude vhodná pro náš případ. Bude zvolena pomocí co největšího výkonu, který může poskytnout. Pro realizaci daného zadání bylo rozhodnuto uplatnit řešení s využitím principu elektromagnetické indukce, jelikož se jeví jako nejvhodnější a nejefektivnější než ostatní zmíněné metody a může poskytnout největší výkon z výše uvedených principů.

## 3 TEORETICKÝ ROZBOR A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

V této kapitole bude detailně rozebrána elektromagnetická indukce a na základě jejího principu zde bude navrženo zařízení pro účel této práce. Poznátky a vzorce v této kapitole vycházejí z literatury [19, 20, 21].

### 3.1 Teorie k elektromagnetické indukci

Z kapitoly (2.2.5), již byla získána přibližná představa o tom, jak elektromagnetická indukce funguje. Nyní zde bude seznámeno s její hlubší podstatou a jak ji použít k výpočtům.

#### 3.1.1 Magnetické pole a magnetická indukce

V první řadě je nutné definovat, jak vzniká magnetické pole. Některé elementární částice (např. elektrony), jsou kromě elektrického náboje a hmotnosti charakterizovány také magnetickým polem, které kolem sebe vytvářejí. V některých materiálech se tyto magnetická pole sčítají a vytvářejí trvalé a silné magnetické pole. Tyto materiály se nazývají jako permanentní magnety. Tyto magnety jsou tvořeny dvěma póly, severním a jižním. Je to tedy příklad magnetického dipólu. Jestliže by byl magnet rozpuštěn na dvě části za účelem získání jen jednoho pólu čili monopólu, pak tento pokus skončí nezdarem, protože každá půlka bude mít opět dva póly a dokazuje to, že magnetické monopóly dosud neexistují.

Magnetické pole je charakterizováno vektorovou veličinou, která se nazývá magnetická indukce a je značena  $\vec{B}$ . Pro definici magnetické indukce bude využita nabitá částice o náboji  $Q$  a rychlosti  $\vec{v}$  v určitém směru. V daném místě, ve kterém je velikost magnetické indukce měřena, na tuto částici působí síla  $\vec{F}_B$  tzv. Lorentzova síla pro kterou platí, že je vždy kolmá k vektoru rychlosti. Lorentzova síla je tedy definována vztahem:

$$\vec{F}_B = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Pro její velikost, pak platí vztah:

$$F_B = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

kde  $\varphi$  je úhel mezi směrem magnetické indukce a rychlosti. Po vyjádření z rovnice (2) se magnetická indukce rovná vztahu:

$$B = \frac{F_B}{|Q| \cdot v \cdot \sin \varphi} \quad (3)$$

Jednotkou magnetické indukce je tesla, která je značena T. Průběh magnetického pole mezi dvěma póly může být pozorován pomocí indukčních čar, kdy jednotlivé čáry vystupují ze severního pólu a vstupují do pólu jižního. Opačné póly se tedy přitahují, kdežto stejné se odpuzují. Tyto uzavřené křivky jsou definovány v každém jejich bodě pomocí magnetické indukce a to tak, že její vektor je vždy tečný k danému bodu této čáry.

### 3.1.2 Magnetický indukční tok

Představme si, že máme vodivou smyčku libovolného tvaru, kterou je ohraničena plocha  $S$ . Tato plocha bude rozdělena na malinkaté plošky a na každou jednotlivou plošku bude kolmý vektor  $d\vec{S}$ . Dále zde bude magnet, jehož magnetické pole je charakterizováno magnetickou indukcí  $\vec{B}$ . Pokud bude smyčka vložena do magnetického pole, pak smyčkou poteče magnetický indukční tok, který je značen  $\Phi$  a je dán vztahem:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

Pro zvláštní případ může být tento vztah upraven, a to, když je homogenní magnetické pole kolmé na smyčku, kterou prochází. Vektor  $d\vec{S}$  je tedy souhlasně orientován s vektorem magnetického pole  $\vec{B}$  a jejich skalární součin je roven:

$$B \cdot dS \cdot \cos 0^\circ = B \cdot dS \quad (5)$$

Poté se rovnice (4) zjednoduší na tvar:

$$\Phi = B \cdot S \quad (6)$$

Jednotkou magnetického indukčního toku je weber, který se značí Wb.

### 3.1.3 Faradayův zákon elektromagnetické indukce a Lenzův zákon

S pomocí magnetického indukčního toku je nyní možno definovat Faradayův zákon elektromagnetické indukce a to tak, že velikost elektromotorického napětí  $U$  indukovaného ve vodivé smyčce je rovna změně magnetického indukčního toku  $\Phi$ , který touto smyčkou prochází za velmi krátký čas:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

Pokud by smyček bylo mnohem více, pak bude hovořeno o tzv. cívce v jejíž každé smyčce by vznikalo indukované elektromotorické napětí a rovnice by tedy byla vynásobena počtem závitů (smyček)  $N$ :

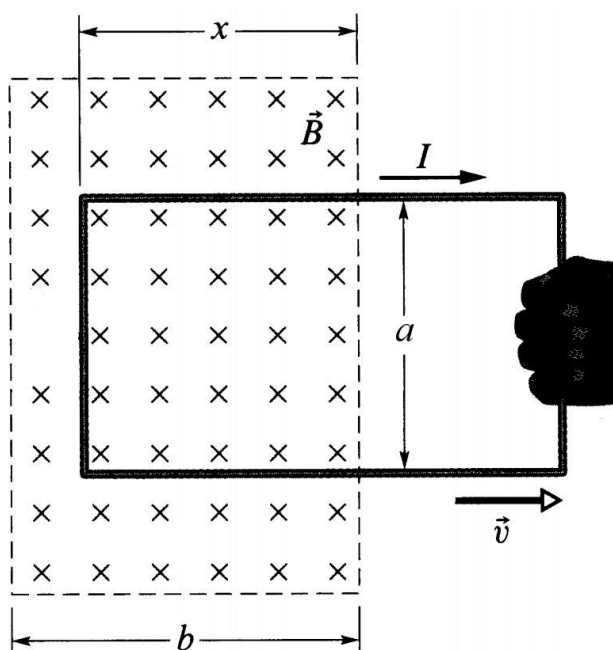
$$U = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (8)$$

Znaménko mínus v rovnicích (7 a 8) vyjadřuje fakt, že elektromotorické napětí působí proti změně magnetického indukčního toku. Jestliže bude použito pravidlo pravé ruky, kdy do dlaně bude uchopena smyčka tak, aby prsty ukazovaly směr indukčních čar magnetického pole smyčky, které vždy působí proti změně magnetického indukčního toku, kterým bylo toto pole indukováno, pak bude palec ukazovat směr indukovaného proudu  $I$  ve smyčce. Toto pravidlo

se nazývá jako Lenzův zákon. Pokud by šlo jen o velikost elektromotorického napětí, pak znaménko mínus není důležité a je možno jej zanedbat.

Jako praktický příklad výpočtu elektromotorického napětí je uveden tento. Na obrázku 10 je vodivá obdélníková smyčka o délce strany  $a$ , která leží v magnetickém poli o magnetické indukci  $B$  a jejíž rovina je kolmá na směr magnetické indukce. Nyní bude smyčka z tohoto magnetického pole vytahována rychlostí  $v$ , jejíž vektor je rovnoběžný s jednou stranou smyčky. Jestliže při vytahování bude  $x$  část délky smyčky, která stále leží v magnetickém poli, pak se podle rovnice (6) tedy bude magnetický indukční tok rovnat:

$$\Phi = B \cdot a \cdot x \quad (9)$$



Obr. 10: Vytahování smyčky z magnetického pole (upraveno) [19]

Pokud magnetický indukční tok z rovnice (9) bude dosazen do rovnice (7), poté pro výpočet indukovaného elektromotorického napětí  $U$  platí:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot a \cdot x)}{dt} = -B \cdot a \cdot \frac{dx}{dt} = B \cdot a \cdot v \quad (10)$$

Magnetická indukce  $B$  a délka strany  $a$ , se v čase nemění, takže může být vytknuta před derivací, ve které zůstane změna délky strany  $x$  za krátký čas  $t$ , což je vlastně rychlost  $v$ , kterou bude smyčka z magnetického pole vytahována. Pro řešení cívky s více závitů by poté rovnice (10) byla vynásobena počtem závitů  $N$ :

$$U = N \cdot B \cdot a \cdot v \quad (11)$$



### 3.1.4 Cívka, její indukčnost a reaktance

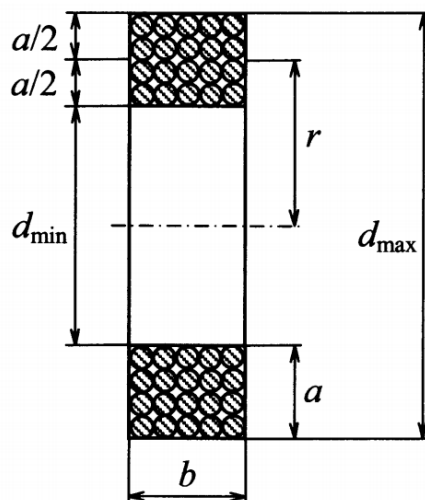
Již dříve zde bylo seznámeno se součástí, která se nazývá cívka. Pro připomenutí jde o dlouhý izolovaný vodič, jenž může být namotán na feromagnetickém materiálu, což je nazváno jádrem cívky. Cívka ovšem nemusí mít jádro žádné. V tomto případě je hovořeno o vzduchové cívce. Existuje mnoho různých typů cívek. Nejzákladnějším typem cívky je tzv. solenoid. Solenoid je velmi dlouhý vzduchový válec, který je vytvořen jednou hustě navinutou vrstvou vodiče. Druhou velice známou cívkou je toroid, což je ve své podstatě solenoid s feromagnetickým jádrem spojeným do kruhu. Jestliže bude mít cívka více vrstev než jen jednu, pak bude hovořeno o vícevrstvé cívce.

Pomocí cívky je možno vytvořit magnetické pole a to tak, že na cívku bude působit jiné magnetické pole anebo jednoduše bude cívka připojena do elektrického obvodu. V obou případech se v cívce bude indukovat proud  $I$ , který vytvoří vlastní magnetické pole cívky. Tento proud je přímo úměrný magnetickému indukčnímu toku  $\Phi$  a počtu závitů cívky  $N$ :

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} \quad (12)$$

Konstanta  $L$ , která vyjadřuje tuto úměrnost se jmenuje indukčnost cívky a její jednotka se nazývá henry, který je značen H. Reálné hodnoty indukčnosti se udávají v řádech mikrohenry případně i milihenry. Každá cívka má svou vlastní indukčnost a její výpočet je jiný. Výpočet každé reálné cívky je dosti náročný, a proto již existují vztahy pro různé jejich typy. Např. pro vícevrstvou vzduchovou cívku z obrázku 11 platí poloempirický vztah, který vypočetl pan Wheeler, kde hodnoty  $r$ ,  $b$  a  $a$  jsou zadávány v centimetrech a výsledná indukčnost poté vyjde v mikrohenry:

$$L = \frac{0,315 \cdot N^2 \cdot r^2}{6 \cdot r + 9 \cdot b + 10 \cdot a} \quad (13)$$



Obr. 11: Vícevrstvá vzduchová cívka [20]

Reaktance cívky  $X_L$  je vlastně odpor cívky při určité úhlové frekvenci  $\omega$ , kterou má střídavý proud nebo napětí a je možné ji vypočítat právě s pomocí indukčnosti cívky:

$$X_L = L \cdot \omega \quad (14)$$

## 3.2 Návrh mechanické části

### 3.2.1 Specifikace měřicí jednotky

Bylo rozhodnuto, že měřicí jednotka teploty bude napájena s využitím principu elektromagnetické indukce. Po jedné z konzultací s vedoucím bakalářské práce bylo zadáno, že jednotka může být umístěná na hřídelích o průměru v rozsahu od 30 milimetrů až do 200 milimetrů, a otáčky mohou dosahovat až 5000 otáček za minutu. Napájení jednotky by poté mělo začít fungovat minimálně od 1000 otáček za minutu. Dále tato jednotka bude napájena napětím 5 voltů a proudem 100 miliampér, což bude činit její výkon  $P$  0,5 wattu podle rovnice:

$$P = U \cdot I = 5 \cdot 0,1 = 0,5 \text{ W} \quad (15)$$

### 3.2.2 Dimenzování magnetů a cívek

Jelikož bude měřicí jednotka umístěna na rotující hřídeli, pak i cívky, které tuto jednotku budou napájet musí být součástí této hřídele. Cívky by mohly být umístěny na čele hřídele nebo také na jejím obvodu. Po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto tyto cívky umístit na obvod hřídele. Magnety poté musí být umístěny na statoru v těsné blízkosti těchto cívek. Řešení bude pro každý průměr hřídele jiné, nicméně princip pořád stejný.

Jestliže tedy bude k dispozici hřídel o průměru  $d$  40 milimetrů s otáčkami  $n$  1000 otáček za minutu, pak na ní budou upevněny tři vícevrstvé vzduchové cívky čtvercového průřezu o nejkratší straně závitu  $a_1$  10 milimetrů, nejdelší straně závitu  $a_2$  30 milimetrů a výšce  $b$  5 milimetrů. Pokud bude použit drát o průměru  $D_d$  0,3 milimetrů a průřezu  $S_d$  z rovnice (16), pak pomocí výpočtu (17) se na výšku této cívky vejde přibližně 16 závitů a na její šířku 33 závitů. Celou cívku bude tedy tvořit 528 závitů.

$$S_d = \frac{\pi \cdot D_d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,3^2}{4} = 0,071 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (16)$$

$$N = \left(\frac{b}{D}\right) \cdot \left(\frac{a_2 - a_1}{2 \cdot D}\right) = \left(\frac{5}{0,3}\right) \cdot \left(\frac{30 - 10}{2 \cdot 0,3}\right) = 16 \cdot 33 = 528 \quad (17)$$

Pro zjištění, jaká délka drátu  $l_d$  bude potřeba na zhotovení jedné této cívky, si bude nejprve potřeba vypočítat průměrný obvod  $o$  závitu z rovnice:

$$o = \frac{(4 \cdot a_1) + (4 \cdot a_2)}{2} = \frac{40 + 120}{2} = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m} \quad (18)$$

Poté délka drátu pro jednu cívku bude:

$$l_d = o \cdot N = 0,08 \cdot 528 = 42,24 \text{ m} \quad (19)$$

Jestliže se bude jednat o měděný izolovaný drát, pak může být vypočten i jeho odpor  $R_d$  jako:

$$R_d = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_d}{S_d} = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{42,24}{0,071 \cdot 10^{-6}} = 10,41 \Omega \quad (20)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrný elektrický odpor mědi. Indukčnost této cívky bude vypočtena podle vzorce (13), kde budou dosazeny parametry cívky:

$$L = \frac{0,315 \cdot N^2 \cdot r^2}{6 \cdot r + 9 \cdot b + 10 \cdot a} = \frac{0,315 \cdot 528^2 \cdot 1^2}{6 \cdot 1 + 9 \cdot 0,5 + 10 \cdot 1} = 4\,284 \mu\text{H} \quad (21)$$

Hřídel se otáčí 1000 otáčkami za minutu, ze kterých je vyjádřena úhlová rychlost  $\omega$ :

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60} = 104,72 \text{ s}^{-1} \quad (22)$$

Indukční reaktance cívky se bude rovnat:

$$X_L = \omega \cdot L = 104,72 \cdot 4\,284 \cdot 10^{-6} = 0,449 \Omega \quad (23)$$

Pokud tedy cívkami poteče proud  $I$  o velikosti 100 miliampér, je možné spočítat úbytek napětí  $U_d$  na drátu cívky a úbytek napětí  $U_L$ , který způsobuje indukčnost cívky:

$$U_d = R_d \cdot I = 10,41 \cdot 0,1 = 1,041 \text{ V} \quad (24)$$

$$U_L = X_L \cdot I = 0,449 \cdot 0,1 = 0,045 \text{ V} \quad (25)$$

Cívky, které jsou nyní navrženy, budou rovnoměrně umístěny na hřídel s rozstupem 120 stupňů a také budou zapojeny do hvězdy.

Nyní bude potřeba dimenzovat magnety. Zvoleny budou tedy čtyři magnety čtvercového průřezu o délce strany 40 milimetrů a výšce 10 milimetrů, které budou rozmístěny na stator po 90 stupních tak, aby se střídaly jejich póly a aby byly co nejbližší cívkám. Magnety budou mít velikost magnetické indukce:

$$B = 0,4 \text{ T} \quad (26)$$

### 3.2.3 Výpočet maximálního a efektivního indukovaného napětí

V místě, kde cívka kolmo protne magnetické indukční čáry, je možné použít rovnici (11), kde  $a$  je vypočteno jako průměr stran cívky:

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{10 + 30}{2} = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m} \quad (27)$$

Obvodovou rychlost  $v$  ve středu cívky, kdy vzdálenost  $r$  je od středu hřídele do středu cívky rovna:

$$r = \frac{D}{2} + \frac{b}{2} = \frac{40}{2} + \frac{5}{2} = 22,5 \text{ mm} = 0,0225 \text{ m} \quad (28)$$

při 1000 otáčkách za minutu je vyjádřena pomocí výpočtu (22):

$$v = \omega \cdot r = 104,72 \cdot 0,0225 = 2,356 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (29)$$

Nyní jsou tedy všechny hodnoty dosazeny do rovnice (11) a velikost maximálního napětí  $U_{max}$ , tedy amplitudy je rovna:

$$U_{max} = N \cdot B \cdot a \cdot v = 528 \cdot 0,4 \cdot 0,02 \cdot 2,356 = 9,95 \text{ V} \quad (30)$$

Efektivní hodnota napětí, pak bude:

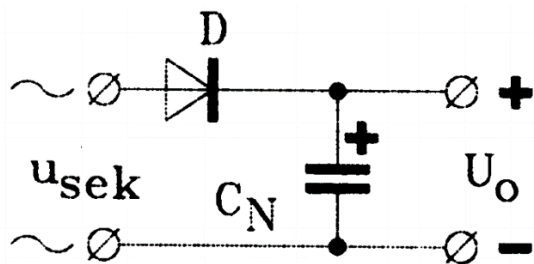
$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{9,95}{1,41} = 7,06 \text{ V} \quad (31)$$

### 3.3 Návrh elektronické části

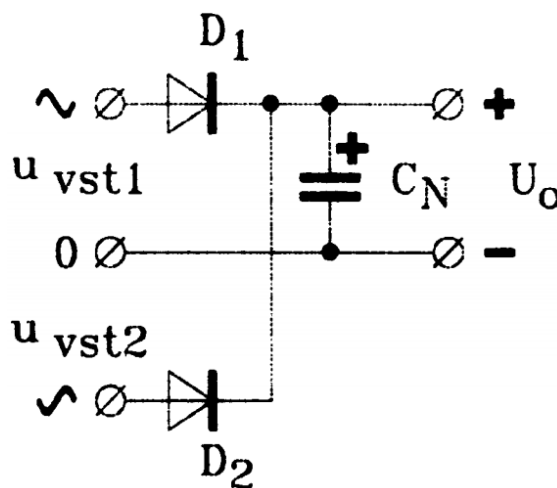
V předchozí kapitole bylo vypočteno určité indukované napětí. Toto napětí ovšem není stejnosměrné, ale střídavé a v této podkapitole bude upraveno tak, aby splnilo zadané požadavky, které jsou uvedeny v kapitole (3.2.1).

#### 3.3.1 Usměrnění střídavého napětí

Pro usměrnění střídavého napětí se používají tzv. usměrňovače. Usměrňovače se převážně skládají z několika diod a jednoho kondenzátoru, který slouží k následnému vyhlazení napětí. Existuje mnoho typů usměrňovačů. Nejzákladnější je jednocestný usměrňovač na obrázku 12, jenž využívá schopnost diody, která propouští jen jednu polaritu napětí. Tento usměrňovač ovšem není moc efektivní, jelikož druhá polarita napětí zůstává nevyužita.



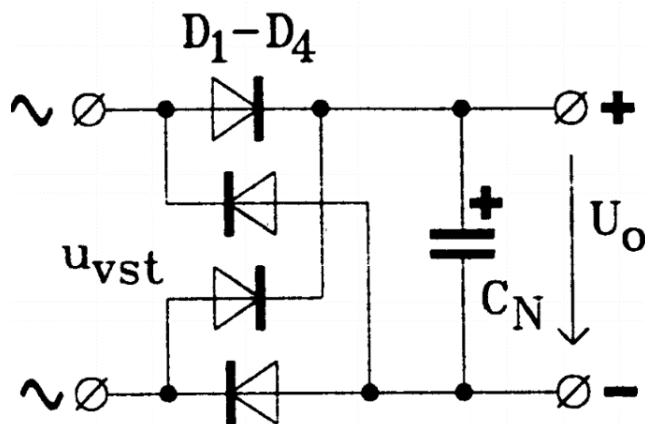
Obr. 12: Jednocestný usměrňovač [21]



Obr. 13: Dvoucestný usměrňovač [21]

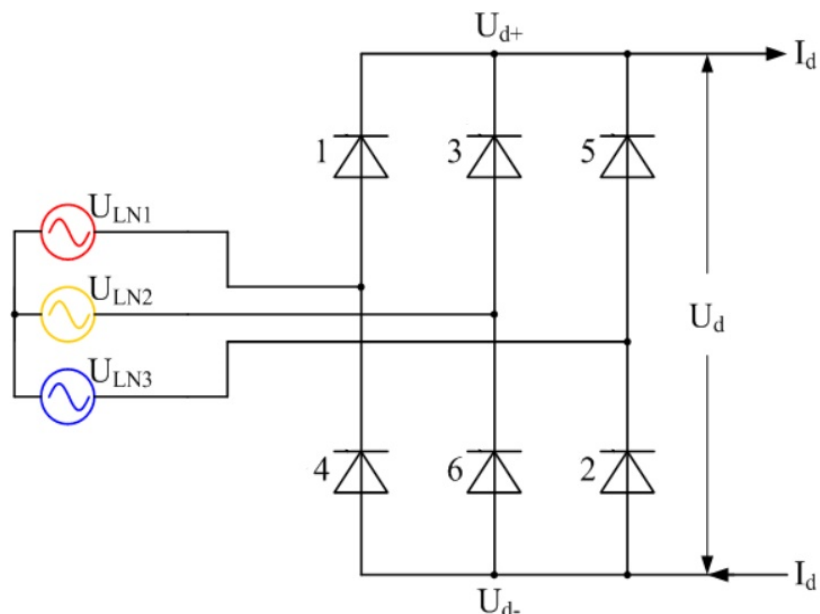
Daleko lepší řešení má dvoucestný usměrňovač (obrázek 13), který využívá i druhou část napětí. Obsahuje dvě diody a každá z těchto diod propustí jednu polaritu napětí. Jediná nevýhoda tohoto usměrňovače je ta, že musí obsahovat i drát (odbočku), kterým by cirkulovaly obě polarity napětí. Následné vyhlazení kondenzátorem je pak mnohem lepší než u jednocestného usměrňovače

Dalším typem je usměrňovač můstkový na obrázku 14. Obsahuje čtyři diody, které jsou zapojeny do tzv. můstku, kde kladné napětí prochází horní a dolní diodou a záporné napětí pak prostředními diodami.



Obr. 14: Můstkový usměrňovač [21]

Jelikož byly v mechanické části navrženy tři cívky zapojené do hvězdy, bude tedy využit trojfázový můstkový usměrňovač (obrázek 15). Funkce tohoto usměrňovače je úplně stejná jako u klasického můstkového usměrňovače, ale obsahuje o dvě diody navíc, protože každá cívka totiž představuje jednu fázi, kterou je nutné usměrnit dvěma diodami. Dohromady je tedy tvořen šesti diodami a vyhlazovacím kondenzátorem.

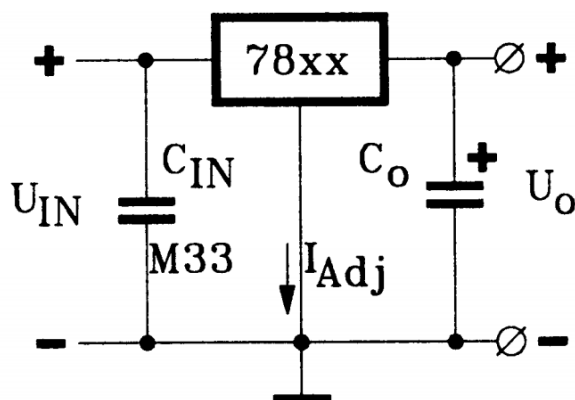


Obr. 15: Třífázový můstkový usměrňovač bez vyhlazovacího kondenzátoru [22]

### 3.3.2 Stabilizátor napětí

Stabilizátor je integrovaná elektronická součástka, která dokáže stabilizovat výstupní proud nebo napětí. Každý stabilizátor také potlačuje zvlnění napětí a pracuje tedy i jako filtr. Existuje mnoho typů stabilizátorů a pro tento případ bude zvolen takový, jenž splní požadavky uvedené v kapitole (3.2.1). Jedním z požadavků bylo výstupní napětí 5 voltů a bude tedy logicky zvolen integrovaný třísvorkový stabilizátor s pevným výstupním napětím 5 voltů, který má označení 7805. Na obrázku 16 je zobrazeno základní zapojení tohoto stabilizátoru, který je mezi dvěma kondenzátory. Pravý kondenzátor slouží k lepší impulzní odezvě zdroje a levý pro situaci kdy je stabilizátor umístěn dále od napájecího zdroje.

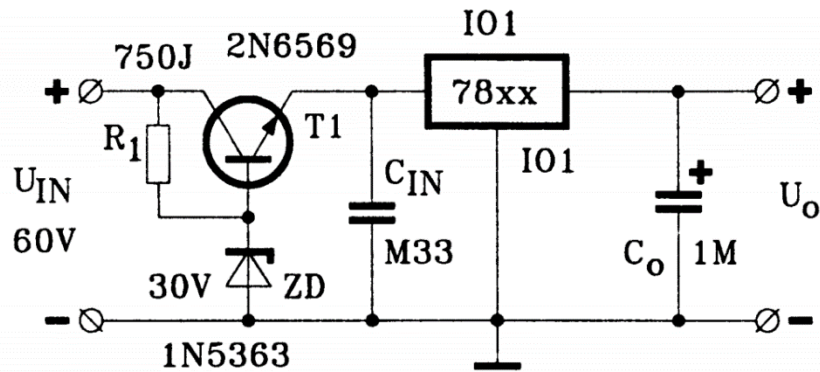
Výrobce udává, že napětí, které pro správnou funkci stabilizátoru 7805 může být použito má rozmezí od 7 voltů až do 35 voltů. Úbytek napětí na stabilizátoru má velikost 2 volty. Stabilizátorem nemůže téct větší proud než 1,5 ampér.



Obr. 16: Standardní zapojení stabilizátoru s pevným výstupním napětím [21]

### 3.3.3 Předstabilizátor napětí

Aby mohl být tento stabilizátor použit i pro vyšší vstupní napětí, než je 35 voltů, musí být před něj zapojen tzv. předstabilizátor, který je zobrazen na obrázku 17. Princip spočívá v tom, že přebytečné napětí bude na zenerově diodě (ZD), která se začne zahřívat. Z tohoto důvodu musí být chlazena stejně, jako NPN tranzistor (T1). Ten je otevírán bázevým proudem, který teče přes rezistor (R1) a vlastně pomáhá regulovat napětí, které je následně na stabilizátoru 7805. Tímto předstabilizátorem je chráněn náš stabilizátor od překročení maximálního napětí a proudu. Navíc stabilizátor nemusí být nijak chlazen.



Obr. 17: Zapojení předstabilizátoru pro vysoké vstupní napětí [21]

## 4 REALIZACE ŘEŠENÍ

V přechozích kapitolách byl získán dostatečný přehled a znalosti, aby nyní bylo možné zkonstruovat zařízení a napájecí zdroj, což bude výsledkem této práce spolu s následným měřením.

### 4.1 Příprava

Před začátkem realizace výsledného zařízení, musí být myšleno i na následné měření. Na otáčející se hřídeli, na které budou umístěny cívky spolu s napájecím zdrojem a měřící jednotkou teploty, by se měření provádělo jen těžko. Hřídel tedy bude v klidu, zatímco bude naopak otáčeno magnety kolem hřídele s cívkami, což bude mít úplně stejný efekt a při tom pohodlně provedeme následné měření.

### 4.2 Realizace mechanické části

#### 4.2.1 Vrtačka a vykrūžovací vrták

K dispozici je vrtačka s otáčkami 520 otáček za sekundu. Tato vrtačka bude upevněna do stojanu (obrázek 18). Dále bude potřeba vytvořit pouzdro, ve kterém budou umístěny magnety. Pro tento účel poslouží vykrūžovací vrták (obrázek 19), který je uchycen do vrtačky (obrázek 18). Vnitřní průměr vykrūžovacího vrtáku je 97 milimetrů.



Obr. 18: Vrtačka ve stojanu (520 otáček za minutu)



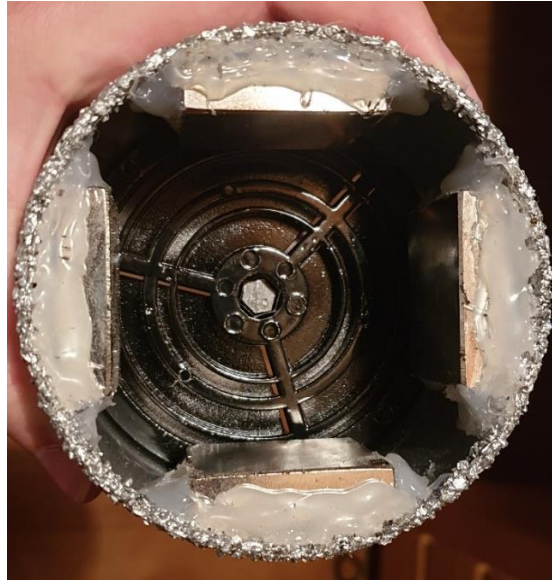
Obr. 19: Vykrūžovací vrták

#### 4.2.2 Neodymové magnety

Nyní je potřeba nalézt správné magnety. Na internetu jsou nejčastěji k dispozici neodymové magnety, které jsou v současnosti nejsilnějšími a nejpoužívanějšími magnety. Také zde lze nalézt feritové magnety, jejichž cena je mnohem nižší než u neodymových magnetů, ale jejich magnetická indukce je zhruba třikrát menší. Zvoleny budou tedy čtyři neodymové magnety



stejných rozměrů. Rozměry magnetů musí být takové, aby se vešly do vykružovacího vrtáku a také, aby zde byl prostor pro hřídel s cívkami. Koupěny byly tedy neodymové magnety o rozměru 40x40x10 milimetrů o magnetické indukci  $B = 1,2 \text{ T}$ , jak udává výrobce. Tyto magnety byly následně pomocí tavné pistole nalepeny do vykružovacího vrtáku tak, aby byly rovnoměrně umístěny po 90 stupních a střídaly se jejich póly (obrázek 20).



Obr. 20: Připevněné neodymové magnety ve vykružovacím vrtáku

#### 4.2.3 3D model hřídele s cívkami

V další části je potřeba vytvořit kostry pro navinutí cívek o rozměrech, které byly navrženy v příkladě (3.2.2). Mezi kostry cívek bude navržena taková hřídel, aby byla mezera mezi magnety a cívkami co nejmenší. Navržen bude tedy 3D model této hřídele s třemi kostrami a pomocí 3D tiskárny bude vytisknut. Změřený průměr hřídele je 44,3 milimetrů. Na kostry bude navinut drát o průměru 0,3 milimetrů. Podle návrhu (3.2.2) by se na cívku mělo vlézt 528 závitů. V tomto případě je na každé cívce závitů pouze 400. Toto je hlavně dáno nepřesností vinutí a také drobnou nepřesností vytisknutého modelu. Navíc s větším počtem závitů cívka začne přirozeně vytvářet kruhový průřez. V hřídeli je také otvor, pomocí něhož bude později model upevněn a vycentrován do středu vykružovacího vrtáku.



Obr. 21: Kostra pro navinutí cívky



Obr. 22: Kostry s navinutými cívkami na hřídeli

## 4.3 Realizace elektronické části

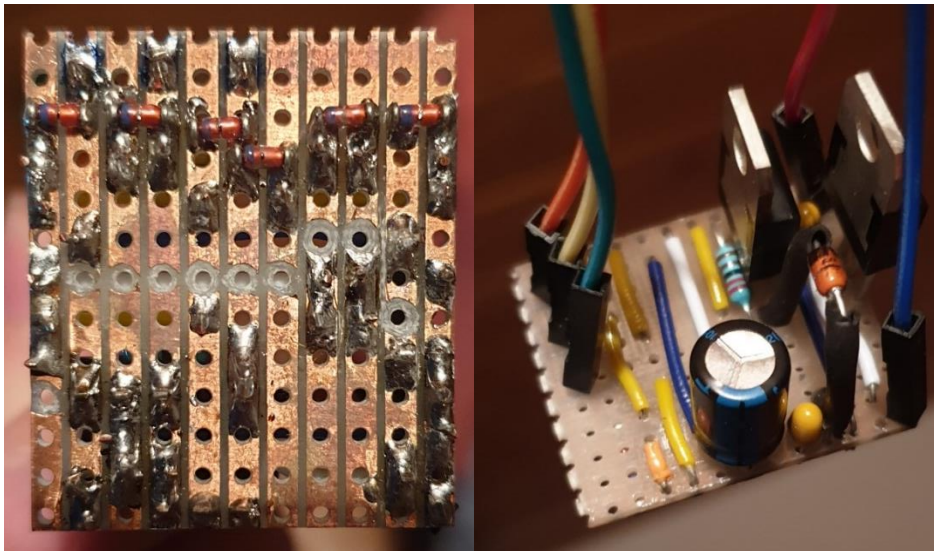
### 4.3.1 Součástky pro napájecí zdroj

Jelikož cívky jsou tři, bude tedy využit třífázový můstkový usměrňovač, jenž byl zmíněn v kapitole 3.3.1. Namísto klasických diod budou použity Schottkyho diody, které mají zhruba poloviční úbytek napětí a daleko lepší reakční schopnost při vysokých kmitočtech. U prodejce elektronických součástek bude tedy zakoupeno šest Schottkyho diod BAT46 SMD a elektrolytický vyhlazovací kondenzátor o kapacitě 100 mikrofaradů. Pro funkčnost těchto diod nesmí napětí přesáhnout 100 voltů.

Na předstabilizátor je potřeba rezistor o odporu 2,2 kiloohmů Zenerovu diodu o Zenerově napětí 8,2 voltů a bipolární tranzistor BD711. Dále pak dva tantalové kondenzátory o kapacitě 100 nanofaradů a stabilizátor 7805.

### 4.3.2 Pájení

Nyní bude připraven univerzální plošný spoj, na který budou pájeny zakoupené součástky. Navržen bude tak, aby byl co nejmenší. Usměrňovač z diod je zapojen podle obrázku 15 a za něj je ještě přidán vyhlazovací kondenzátor. Poté podle schématu na obrázku 17 budou připájeny i ostatní součástky. Výsledný napájecí zdroj je k prohlédnutí na obrázku 23.



Obr. 23: Pohled zezdola na diody (vlevo) a napájecí zdroj (vpravo)

## 5 MĚŘENÍ

### 5.1 Fázové napětí

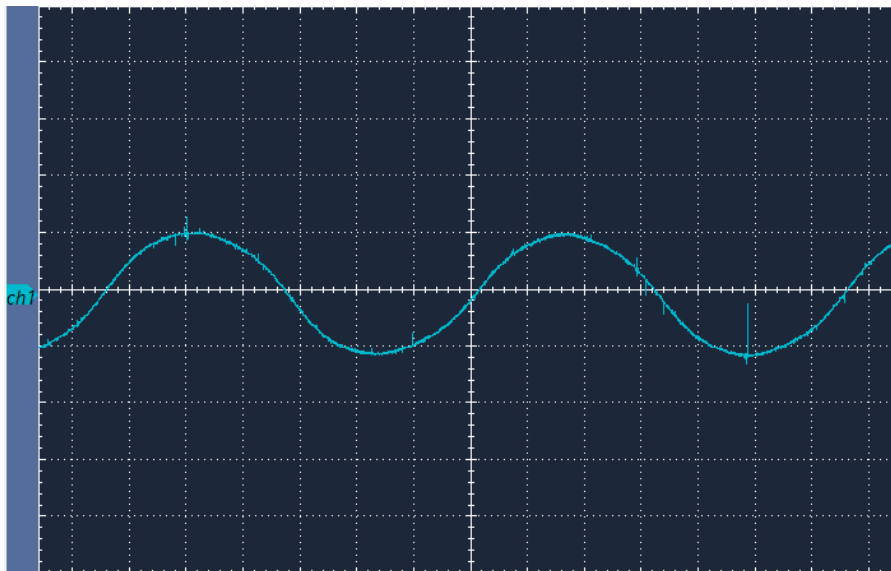
Nejprve budou zapojeny cívky do hvězdy, jak je zobrazeno např. na obrázku 17 před usměrňovačem. Poté bude zapnuta vrtačka a multimetrem je změřena efektivní hodnota napětí mezi jednou fází a bodem, kde jsou cívky spojeny dohromady (nulovací vodič). Fázové napětí  $U_{ef}$  má velikost 4,3 voltů. Pokud je potřeba znát maximální napětí jedné fáze  $U_{max}$ , pak by z rovnice (31) mělo hodnotu:

$$U_{max} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 4,3 \cdot \sqrt{2} = 6,1 \text{ V} \quad (32)$$

Teoreticky vypočtená hodnota maximálního napětí by v tomto případě za ideálního stavu vyšla podle rovnice (11) takto:

$$U_{max} = N \cdot B \cdot a \cdot v = 400 \cdot 1,2 \cdot 0,02 \cdot 1,23 = 11,8 \text{ V} \quad (33)$$

Tento rozdíl je způsoben různými ztrátami, úbytky napětí, vzduchovou mezerou, geometrickou nepřesností a celkovou nedokonalostí zařízení. Po připojení jedné fáze na osciloskop je k nahlédnutí průběh střídavého napětí na obrázku 24.



Obr. 24: Průběh napětí na jedné fázi cívky při 520 otáčkách za minutu

### 5.2 Voltampérová charakteristika napájecího zdroje

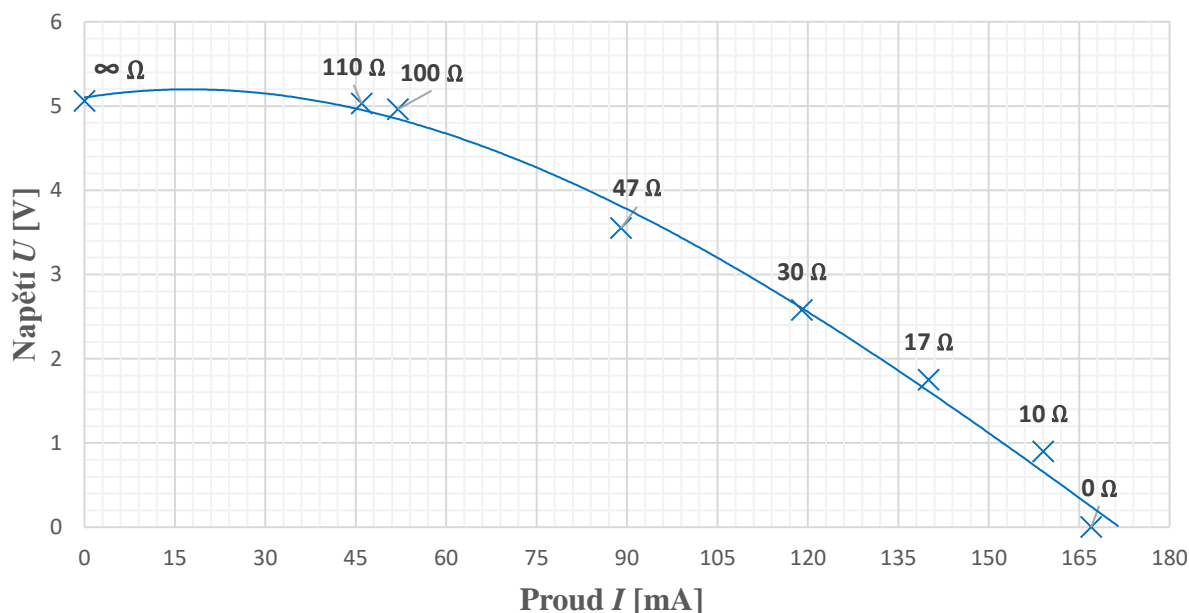
Nyní se bude výsledný napájecí zdroj zatěžovat, jelikož je nutné znát jeho charakteristiku. Proto bude zakoupen potenciometr, kterým zdroj bude zatěžován. Měření se provede tak, že nejprve je nastaven na potenciometru určitý odpor a pak je změřeno výsledné napětí a proud, který tímto

odporem prochází. Hodnoty jsou zapsány do tabulky (obrázek 25), ve které je vypočítán i výkon  $P$  pomocí rovnice (15) a následně sestrojen graf (obrázek 26).

R [ $\Omega$ ]	I [mA]	U [V]	P [mW]
$\infty$	0	5,06	0
110	46	5,03	231,38
100	52	4,96	257,92
47	89	3,55	315,95
30	119	2,58	307,02
17	140	1,75	245
10	159	0,90	143,1
0	167	0	0

Obr. 25: Tabulka naměřených hodnot při 520 otáčkách za minutu

### Závislost napětí na proudu při 520 otáčkách za minutu



Obr. 26: Voltampérová charakteristika zdroje při 520 otáčkách za minutu

Proložení body není úplně ideální, nicméně i tak z tohoto grafu lze vyčíst, že tento zdroj udrží požadované napětí 5 voltů až do zátěže okolo 100 ohmů a pak začíná klesat. Maximální proud má poté velikost přibližně 52 miliampér při požadovaném napětí.

### 5.3 Vyšší otáčky

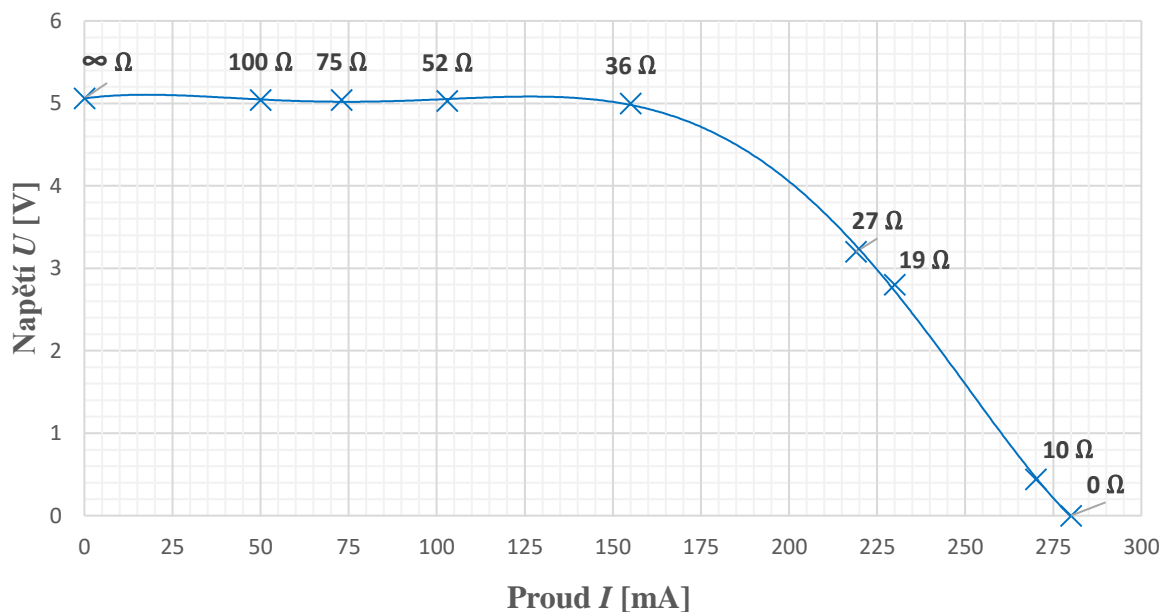
Při 520 otáčkách za minutu je vidět, že napájecí zdroj nespĺňuje zadané požadavky uvedené v 3.2.1, a proto budou otáčky zvýšeny. K dispozici je další vrtačka o 1450 otáčkách za minutu. Provedeno bude stejné měření jako u předchozích otáček. Otáčky jsou přibližně třikrát větší, takže se dá logicky očekávat, že fázové napětí se také třikrát zvětší stejně jako voltampérová

charakteristika zdroje. Změřené napětí na jedné fázi  $U_{ef}$  má velikost 12,6 voltů. Nyní opět při různých hodnotách odporů budou změřeny hodnoty napětí a proudu (obrázek 27) a vyneseny do grafu (obrázek 28).

R [ $\Omega$ ]	I [mA]	U [V]	P [mW]
$\infty$	0	5,06	0
100	50	5,04	252
75	73	5,04	367,92
52	103	5,03	518,09
36	155	5,00	775
27	219	3,20	700,8
19	230	2,80	644
10	270	0,44	118,8
0	280	0	0

Obr. 27: Tabulka naměřených hodnot při 1450 otáčkách za minutu

### Závislost napětí na proudu při 1450 otáčkách za minutu

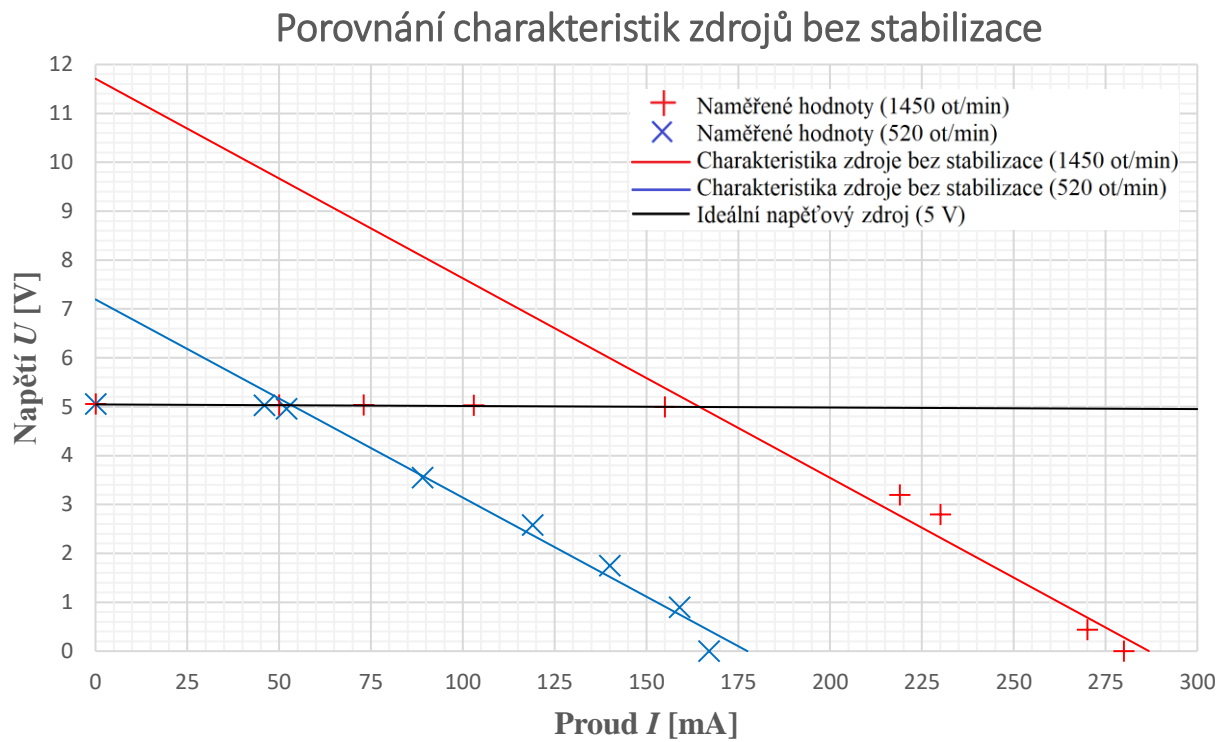


Obr. 28: Voltampérová charakteristika zdroje při 1450 otáčkách za minutu

Proložení body je teď mnohem lepší než v předchozím případě a lze vidět, že v tomto případě zdroj udrží požadované napětí až do zátěže okolo 36 ohmů. Maximální proud má v tomto případě poté velikost přibližně 155 miliampér při požadovaném napětí. Při těchto otáčkách jsou splněny zadané požadavky pro měřící jednotku a dá se očekávat, že přibližně při 1000 otáčkách za minutu budou splněny také.

Kdyby tento napájecí zdroj nebyl stabilizovaný, pak je možno sledovat voltampérové charakteristiky pro obě měření na obrázku 29. Tyto charakteristiky jsou vytvořeny proložení dat, ve kterých už stabilizované napětí 5 voltů není dodrženo. Z grafu lze vidět, že charakteristika zdroje je při nižších i vyšších otáčkách stejná, neboť přímky jsou téměř rovnoběžné. Lze také pozorovat, že maximální proud při nižších otáčkách pro požadované napětí 5 voltů je přibližně třikrát menší než při vyšších otáčkách, což jen potvrzuje platnost

rovníc uvedených v teoretické části, protože se otáčky také přibližně třikrát zmenšily. Ideální napěťový zdroj by v tomto případě byla přímka vycházející z 5 voltů.



Obr. 29: Voltampérové charakteristiky bez stabilizace a ideální napěťový zdroj

## 6 ZÁVĚR

Na začátku této práce a v kapitole číslo 2 bylo seznámeno s pojmem energy harvesting s využitím různých metod, díky kterým je možno získat energii. Následně pro naše zadání bylo vybráno řešení s využitím principu elektromagnetické indukce.

V další kapitole 3 bylo detailně rozebráno, co elektromagnetická indukce znamená, jaký je její princip a porozuměno dalším pojmům, které byly potřeba pro následující návrh zařízení. Popsána byla cívka a její vlastnosti a díky tomu byl navržen určitý tvar a počet potřebných cívek. Dále byly vybrány magnety o určitých rozměrech a magnetické indukci. Po tomto mechanickém návrhu následoval přechod k elektronické části, ve které byl vybrán správný usměrňovač a vhodný stabilizátor s navrženým předstabilizátorem pro vysoké vstupní napětí.

Všechny tyto poznatky byly uplatněny v kapitole 4 při realizaci řešení, kde byly použity neodymové magnety, které byly následně vlepeny do vykružovacího vrtáku, jenž byl uchycen ve vrtačce. Poté byly díky 3D tiskárně vytvořeny kostry pro navinutí cívek společně s hřídelí. Pomocí měděného drátu byly navinuty cívky na kostry a výsledné cívky byly zapojeny do hvězdy. Následně byly sehnány veškeré součástky pro výrobu napájecího zdroje. Tento zdroj byl pak na univerzálním plošném spoji pomocí pájky sestaven.

Následné měření v kapitole 5 bylo spolu s předchozí realizací napájecího zdroje hlavní částí této práce. V této kapitole bylo změřeno reálné fázové napětí a bylo porovnáno s teoretickým. Byl zde vidět i průběh jedné fáze napětí, který vytváří pěknou sinusoidu. A nakonec byla pro dvoje otáčky proměřena voltampérová charakteristika výsledného napájecího zdroje.

Výsledkem této práce je funkční autonomní napájecí zdroj pro měřicí jednotku. Všechny definované požadavky, které tato jednotka měla jsou v konkrétním případě splněny při 1000 otáčkách za minutu. V praxi by se toto řešení muselo vždy trochu upravit pro jiné průměry hřídele a to tak, že by byly dimenzovány jiné cívky a magnety. Všechny cíle této bakalářské práce byly postupně popsány v jednotlivých kapitolách a jsou tedy splněny.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUSÁK, Miroslav. *Mikroelektronické zdroje energie z okolí – Energy harvesting* [online]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/public/Husak/2013-2/2013-2.html#p=1>
- [2] Wikimedia commons. *Thermoelectric generator diagram* [online]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermoelectric\\_Generator\\_Diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermoelectric_Generator_Diagram.svg)
- [3] SCANSEN, Don. *Thermoelectric Energy Harvesting* [online]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/oct/thermoelectric-energy-harvesting>
- [4] BRÁZDIL, Marián. *Možnost využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla* [online]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektrickych-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>
- [5] CIGOY, Dale. *Měření teploty: ale správným způsobem* [online]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:7513/mereni-teploty-ale-spravnym-zpusobem>
- [6] OSTAFFE, Harry. *RF energy harvesting and wireless power* [online]. Dostupné z: [https://www.electronicproducts.com/Power\\_Products/Batteries\\_and\\_Fuel\\_Cells/RF\\_energy\\_harvesting\\_and\\_wireless\\_power.aspx?terms=RF%20energy%20harvesting%20and%20wireless%20power](https://www.electronicproducts.com/Power_Products/Batteries_and_Fuel_Cells/RF_energy_harvesting_and_wireless_power.aspx?terms=RF%20energy%20harvesting%20and%20wireless%20power)
- [7] GRINI, Dag. *RF Basics, RF for Non-RF Engineers* [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/slap127/slap127.pdf>
- [8] OSTAFFE, Harry. *RF-based Wireless Charging and Energy Harvesting Enables New Applications and Improves Product Design* [online]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/pdfdocs/rf-basedwireless-charging.pdf>
- [9] Khan Academy, *Photoelectric Effect* [online]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/photons/a/photoelectric-effect>
- [10] Wikiskripta. *Fotoelektrický jev* [online]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Fotoelektrick%C3%BD\\_jev](https://www.wikiskripta.eu/w/Fotoelektrick%C3%BD_jev)
- [11] The Physics Hypertextbook. *Photoelectric Effect* [online]. Dostupné z: <https://physics.info/photoelectric/>
- [12] WOODFORT, Chris. *Piezoelectricity* [online]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/piezoelectricity.html>
- [13] KRÁLOVÁ, Magda. *Pyroelektrický a piezoelektrický jev* [online]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev>
- [14] COTTONE, Francesco. *Introduction to Vibration Energy Harvesting* [online]. Dostupné z: <https://www.nipslab.org/files/nips%20summer%20school%202011/Cottone%20Introduction%20to%20vibration%20harvesting.pdf>
- [15] Ceramtec, *Základy piezokeramické technologie* [online]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>
- [16] ZERVOS, Harry. *Electromagnetic induction in energy harvesting application* [online]. Dostupné z: <https://www.idtechex.com/research/articles/electromagnetic-induction-in-energy-harvesting-applications-00005834.asp>
- [17] KRÁLOVÁ, Magda. *Elektromagnetická indukce* [online]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticka-indukce/elektromagneticka-indukce>
- [18] VAŠČÁK, Vladimír. *Elektromagnetická indukce* [online]. Dostupné z: <https://www.vascak.cz/?p=2575>



- [19] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert a JEARL WALKER. *Fyzika 2*. V Brně: Nakladatelství VUTIUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [20] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: Nakladatelství VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [21] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. V Praze: Nakladatelství BEN, 1996. ISBN 8086056023.
- [22] Green power, *Třífázový usměrňovač mostů neřízený* [online]. Dostupné z: <https://cz.gprectifier-ar.com/news/rectifier-12490784.html>

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozmanité zdroje energie kolem nás [1].....	15
Obr. 2 Tabulka pro porovnání metod typu energy harvesting [1].....	16
Obr. 3 Podstata funkce termoelektrického jevu (upraveno) [2] .....	17
Obr. 4 Termoelektrický modul (upraveno) [3].....	17
Obr. 5 Schéma funkce RF energie.....	18
Obr. 6 Fotovoltaický článek (upraveno) [9] .....	19
Obr. 7 Princip činnosti fotoelektrického jevu (upraveno) [11] .....	19
Obr. 8 Generování napětí pomocí piezoelektrického jevu [15] .....	20
Obr. 9 Princip elektromagnetické indukce (upraveno) [18].....	21
Obr. 10 Vytahování smyčky z magnetického pole (upraveno) [19] .....	24
Obr. 11 Vícevrstvá vzduchová cívka [20] .....	25
Obr. 12 Jednocestný usměrňovač [21] .....	29
Obr. 13 Dvoucestný usměrňovač [21].....	29
Obr. 14 Můstkový usměrňovač [21].....	29
Obr. 15 Třífázový můstkový usměrňovač bez vyhlazovacího kondenzátoru [22].....	30
Obr. 16 Standardní zapojení stabilizátoru s pevným výstupním napětím [21] .....	30
Obr. 17 Zapojení předstabilizátoru pro vysoké vstupní napětí [21].....	31
Obr. 18 Vrtačka ve stojanu (520 otáček za minutu) .....	32
Obr. 19 Vykrūžovací vrták .....	32
Obr. 20 Připevněné neodymové magnety ve vykrūžovacím vrtáku.....	33
Obr. 21 Kostra pro navinutí cívky .....	33
Obr. 22 Kostry s navinutými cívkami na hřídeli .....	33
Obr. 23 Pohled zezdola na diody (vlevo) a napájecí zdroj (vpravo) .....	34
Obr. 24 Průběh napětí na jedné fázi cívky při 520 otáčkách za minutu .....	35
Obr. 25 Tabulka naměřených hodnot při 520 otáčkách za minutu.....	36
Obr. 26 Voltampérová charakteristika zdroje při 520 otáčkách za minutu .....	36
Obr. 27 Tabulka naměřených hodnot při 1450 otáčkách za minutu.....	37
Obr. 28 Voltampérová charakteristika zdroje při 1450 otáčkách za minutu .....	37
Obr. 29 Voltampérové charakteristiky bez stabilizace a ideální napěťový zdroj.....	38