

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# Vyžití technologie Energy Harvesting

Bakalářská práce

MICHAL BŘÍZA

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal BŘÍZA**  
Osobní číslo: **E11B0190P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Využití technologie Energy Harvesting**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte technologii Energy Harvesting.
2. Popište možné principy získávání energie a její využití.
3. Navrhněte technické řešení, které by umožňovalo měření teploty, pokud by byl senzor umístěn v časově proměnném magnetickém poli.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**[http://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_harvesting](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting)**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Lukáš Koudela**


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě práci ke státní bakalářské zkoušce zpracovanou v rámci bakalářského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Souhlasím s tím, aby práce byla použita ke studijním účelům.

V Plzni, dne 5. června 2015

.....

Michal Bříza

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem lidem, kteří mi pomáhali s tvorbou této práce, především pak vedoucímu panu Ing. Lukáši Koudelovi za jeho rady, ochotu a nemálo trpělivosti. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Sýkorovi Ph.D. z Katedry technologií a měření za pomoc při praktickém měření.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá jevem nazývaným Energy harvesting. Což je způsob získávání volné „nevyužité“ energie pro výrobu elektřiny, která složí především pro napájení senzorů. Po shrnutí jevu samotného bylo zkoumáno měření teploty v proměnném magnetickém poli. Pro napájení byl vybrán energy harvester, na němž jsme provedli měření.

## **Klíčová slova**

Energy harvesting, volná energie, měření teploty, piezoelektrický jev

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with the phenomenon called Energy Harvesting. Which is a way of getting free „wasted“ energy for electricity production, which is mainly used to supply power to sensors. After summarizing of the phenomenon itself a temperature measurement has been researched for measurement in variable magnetic field. For the power supply was selected energy harvester, on which we conducted measurements.

## **Keywords**

Energy harvesting, free energy, temperature measurement, piezoelectric effect

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Energy harvesting</b>	<b>2</b>
2.1	Zdroje energie . . . . .	3
2.2	Systém pro energy harvesting . . . . .	4
2.2.1	Klíčové součásti systému . . . . .	4
2.2.2	Další součásti systému . . . . .	5
2.3	Principy . . . . .	6
2.3.1	Piezoelektrický . . . . .	6
2.3.2	Termoelektrický . . . . .	8
2.3.3	Indukční . . . . .	9
2.3.4	Pyroelektrický . . . . .	9
2.3.5	Kapacitní . . . . .	9
2.3.6	Fotovoltaický . . . . .	9
2.3.7	Ostatní . . . . .	9
2.4	Současný stav . . . . .	10
2.4.1	Inovace v oboru . . . . .	10
2.4.2	Využití . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Návrh systému</b>	<b>13</b>
3.1	Měření teploty v proměnném magnetickém poli . . . . .	13
3.2	Výběr energy harvesteru . . . . .	16
3.2.1	Perpetuum Vibration Energy Harvester (VEH) . . . . .	17
3.2.2	Volture Vibration Energy Harvester . . . . .	17
3.3	Měření harvesteru . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>23</b>
<b>A</b>	<b>Dodatek k měření</b>	<b>28</b>
A.1	Naměřené hodnoty: Tabulky a grafy . . . . .	28



# 1

## Úvod

Tato předkládaná bakalářská práce je zaměřena na jev zvaný Energy harvesting. Text je členěn na dvě hlavní části. První se zabývá vysvětlením pojmu Energy harvesting, teoretickým úvodem do problematiky, nástinem užívaných metod a současným stavem vývoje. Druhá část obsahuje návrh technického řešení pro *měření teploty, pokud je senzor umístěn v časově proměnném magnetickém poli*. Součástí druhé části je také měření na vybraném energy harvesteru.

# 2

## Energy harvesting

**Energy harvesting** [1] někdy též nazývaný *power harvesting* nebo *energy scavenging* je způsob získávání volné energie nejčastěji z přirozeně se vyskytujících zdrojů. Energie je po získání energy harvesterem uložena, zpracována a může být využita k napájení různých zařízení. Protože je však množství energie získané z těchto zdrojů, s výjimkou velkých solárních panelů a větrných turbín poměrně malé, hodí se jen pro napájení zařízení o malém příkonu. Tento fakt, ale vzhledem ke stálému snižování energetické náročnosti mnoha druhů elektrických zařízení, předznamenává slibnou budoucnost tohoto oboru, hlavně co se týče nových možných aplikací této technologie a dalšího vývoje s cílem zlepšit proces získávání energie.

Stále více aplikací energy harvestingu získává uplatnění v praxi. Mezi hlavní důvody, proč napájet dané zařízení právě s jeho pomocí je využití jinak nevyužité energie z okolních zdrojů. Ta je na rozdíl od běžných zdrojů jako je ropa, uhlí a další zdarma v teoreticky neomezeném množství. Dalším důvodem je nezávislost na ne vždy výhodném síťovém napájení a jako alternativa za nákladné baterie. Ty se musí čas od času vyměnit, zatímco při správném nainstalování energy harvesteru nám odpadá jakákoli údržba po celou dobu životnosti napájeného zařízení. Tyto zařízení potom mohou být spolehlivější, než kdyby byli napájeni ze sítě nebo baterií. Jejich hlavní použití, je proto na místech s obtížným přístupem, například pod vodou nebo v kosmu. Harvestery mohou být také použity ve spojení se síťovým nebo bateriovým napájením, kde mohou sloužit pro kompenzaci výpadků dodávky elektrické energie a tím se podílí na zvýšení spolehlivosti daného zařízení. Časté je také použití harvesteru pro dobíjení baterií, čímž mohou podstatně prodloužit jejich životnost. Všechny tyto důvody v praxi znamenají, že nejčastější aplikaci mají harvestery u různých mobilních zařízení, která se užívají v celé řadě technických odvětví. Například na napájení bezdrátových sensorových zařízení (viz. Obrázek 2.1).



Obrázek 2.1: Bezdrátová senzorová síť pro monitorování elektromotoru napájena vibračním energy harvesterem [2]

## 2.1 Zdroje energie

Jak bylo uvedeno výše, energy harvesting je způsob výroby elektřiny z jiné jinak nevyužité energie. Tato energie může pocházet buď z běžných v přírodě se vyskytujících zdrojů nebo jako vedlejší produkt lidské činnosti. V několika níže uvedených bodech jsou příklady těchto zdrojů. Pro účinnou aplikaci energy harvesting [3] je důležité být s nimi seznámen, abychom věděli, jaký zdroj pro danou aplikaci vybrat. Za tímto účelem byla provedena výzkumníky z různých zemí celá řada experimentů a studií. Hlavním kritériem těchto studií bylo množství energie, které je možné z jednotlivých zdrojů získat.

Tabulka 2.1: Porovnání jednotlivých zdrojů dle výkonové hustoty [3]

Zdroj energie	Výkonová hustota
Hluk	0.003 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ při 75 dB 0.096 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ při 90 dB
Změna teploty	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Rádiové vlny	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Světlo	100 mW/cm <sup>3</sup> při přímém slunečním svitu 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ v osvětlené místnosti
Termoelektrina	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ při teplotním gradientu 5 °C 135 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ při teplotním gradientu 10 °C
Vibrace (mikro generátor)	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ - pohyb lidského těla Hz 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ - stroje kHz
Vibrace (piezoelektrina)	200 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Proudění vzduchu	177 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ při rychlosti 3 m/s

- **Vzduch:** Jedním z běžnějších zdrojů, který je dnes poměrně rozšířen. Proudění vzduchu se využívá nejčastěji k výrobě elektřiny pomocí velkých větrných turbín. Menší verze těchto turbín složí k napájení různých senzorů jak pro venkovní použití tak pro vnitřní, kde se využívá proudění vzduchu z klimatizační jednotky.

- **Světlo:** Patrně nejběžnější a nejvyužívanější zdroj volné energie v současnosti. K zachytávání světla slouží hlavně foto diody a solární panely. Jeho velkou výhodou je množství získané energie, které je až o dva řády vyšší než u ostatních zdrojů. To ovšem platí pouze u venkovních aplikací, kde jsou harvestery vystaveny slunečnímu světlu, zatímco uvnitř budov je množství získané energie podstatně nižší (viz. Tabulka 2.1).
- **Voda:** Je na okraji pozornosti co se zdroje pro energy harvesting týká. Nejčastěji se pracuje s využitím přílivu, mořských proudů a vln.
- **Tepló:** V současnosti se jako efektivní projevuje využití tepla. Důvod je jednoduše takový, že ve většině technických odvětvích se můžeme setkat s teplem jako odpadním produktem, proto není divu, že se vymýšlejí stále nové aplikace jak toto teplo využít. Nejčastěji k výrobě elektřiny z tepla slouží termogenerátory (TEG), které využívají rozdíl teplot (*teplotního gradientu*).
- **Vibrace:** Jsou jedním z nejperspektivnějších zdrojů energie. Mezi jejich nespornou výhodou patří, že je nalezneme prakticky všude. Jako zdroj vibrací mohou složit třeba otřesy lidského těla při pohybu, otřesy mostních konstrukcí, různé strojní zařízení, rádiové vlny, atd. [4] Například společnost Nokia ve spolupráci s Queen Mary University of London's pracuje na využití vibrací z okolního šumu (doprava, hudba, hlasy, atd.) k dobíjení mobilních telefonů.
- **Ostatní:** Mezi další „exotičtější“ zdroje patří například využití tělesné teploty a krevního cukru. Poslední uvedené je důkladně zkoumáno pro budoucí možné využití v biomedicíně.

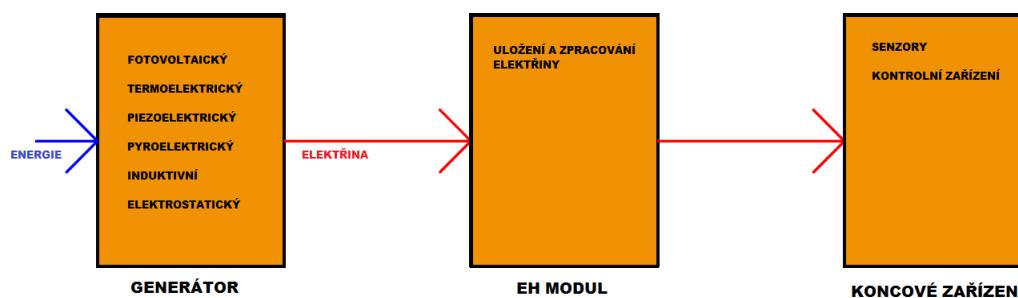
## 2.2 Systém pro energy harvesting

Systém pro získávání volné energie je zjednodušeně řečeno zařízení pro převod jiného druhu energie na energii elektrickou.[1] V praxi se skládá z několika klíčových součástí (viz. obrázek 2.2), které mohou být doplněny o další součásti. Mezi klíčové součásti patří generátor pracující na jednom z principů uvedených v následující podkapitole. Dále je to modul, který energii zachytí, uloží a řídí její spotřebu. Poslední klíčovou součástí je koncové zařízení, které získanou elektřinu spotřebovává. Běžně používané systémy se navíc skládají z dalších součástí [5] jako je například mikrokontrolér, senzory, měnič napětí, usměrňovač a další „doplňkové“ zařízení pro uložení energie.

Je nutno také zmínit, že se často pro zlepšení efektivity a výkonnosti systému přistupuje k použití tzv. „multi-modal energy harvesting“.[8] Jedná se vlastně o využití více zdrojů energie. V praxi pak jde o kombinaci dvou harvesterů do jednoho systému, kdy jeden harvester podporuje svou činností druhý.

### 2.2.1 Klíčové součásti systému

**Generátor** je zařízení, které dokáže zachytit volnou energii z okolního prostředí a převést ji na energii elektrickou. Těchto zařízení je několik druhů, které se od sebe liší především principem činnosti. Pravděpodobně nejběžnějším typem generátorů jsou generátory vibrační, ty využívají rovněž jeden z principů uvedených níže.



Obrázek 2.2: Blokový diagram klíčových částí EH systému

**EH modul** má jak již bylo zmíněno několik funkcí. Kromě řízení spotřeby a zachycení energie je to také její uložení. To je nejčastěji realizováno pomocí kondenzátoru nebo superkondenzátoru v případě, že očekáváme u napájeného zařízení napěťové špičky. Pokud napájené zařízení vyžaduje stálý přísun energie používají se baterie.

**Koncové zařízení** je zařízení, které získanou energii spotřebovává.

## 2.2.2 Další součásti systému

Tyto další součásti systému pro energy harvesting složí převážně pro zlepšení celého procesu a mohou mít zásadní význam pro chod celého systému.

**Mikrokontrolér** slouží k řízení celého systému, tedy hlavně k přepínání z pohotovostního režimu do pracovního, při němž dochází k distribuci získané elektrické energie. Pokud je tedy systém v pohotovostním režimu, harvester sice přeměňuje energii na elektřinu, ale nedochází k dodávce elektřiny do koncového zařízení. Tato elektřina je uložena a využita pouze po přechodu do režimu pracovního.

**Usměrňovač a napěťový měnič** jsou dva prvky systému, které se „starají“ o získanou energii. Usměrňovač slouží k usměrnění získané elektrické energie (u většiny principů harvestingu získáme střídavé napětí, zatímco většina zařízení, pro které se energy harvesting používá vyžaduje napětí stejnosměrné). Napěťový měnič je v systému kvůli úpravě napětí (změna velikosti).

**Další zařízení** v systému pro energy harvesting může být vysílač, který by například v případě senzoru přenášel získaná data k uživateli nebo do nějakého kontrolního systému.

## 2.3 Principy

Jak bylo výše uvedeno můžeme se setkat s několika různými druhy harvesterů, které se liší principem činnosti a druhem využívané energie. Tyto odlišné principy jsou přiblíženy v této podkapitole.

### 2.3.1 Piezoelektrický

Tento druh harvesterů využívá piezoelektrického jevu, tedy schopnosti materiálu při jeho mechanickém namáhání (deformaci) generovat napětí. Tato jeho schopnost nám umožňuje využít jinak nevyžité zdroje energie. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen. Tento princip energy harvestingu je v současnosti poměrně populární a to i přes to, že většina harvesterů na tomto principu je schopna vyprodukovat výkon pouze v řádech miliwattů.

#### Materiály

Materiálů pro piezoelektrický energy harvesting je hned několik. Tyto materiály mají samozřejmě odlišné vlastnosti, [14] mezi nejsledovanější patří *piezoelektrický vazební činitel  $k$* , který nám udává schopnost materiálu převést jednu formu energie na druhou. Jsou definovány jako druhá odmocnina poměru elektrického výkonu ku celkovému mechanickému příkonu. Další sledovanou vlastností jsou tzv. *piezoelektrické koeficienty  $d$*  doplněné indexem, který nám udává směry vstupů a výstupů. Posledním sledovaným parametrem piezoelektrických materiálů je *činitel  $g$* , který udává velikost napětí vztáženého na jednotku mechanického namáhání. Při výběru vhodného materiálu jsou nejvíce důležité poslední dvě jmenované vlastnosti.

„Jsou dva materiály, které mají vysokou výkonovou hustotu a to je **PVDF piezoelektrický polymer** a **piezoelektrický monokrystal**.“ [8] Ovšem oba tyto materiály mají tu nevýhodu, že jejich výroba ve větším množství je nejen náročná, ale i drahá. To je hlavní důvod, proč se pro masovou aplikaci využívá převážně polykrystalická keramika.

Nejpoužívanější piezoelektrické materiály jsou:

- Polykrystalická keramika
- Texturovaná keramika
- Monokrystaly
- Tenké filmy
- Polymery

#### Základy piezoelektrického energy harvestingu

Jak vyplývá z úvodu této podkapitoly piezoelektrické energy harvestery převádějí mechanickou energii na elektrickou. U piezoelektrického energy harvesteru jsou hlavním zdrojem mechanické energie vibrace. V níže uvedené tabulce můžeme vidět porovnání nejběžněji používaných zařízení, které generují vibrace (viz. Tabulka 2.2).

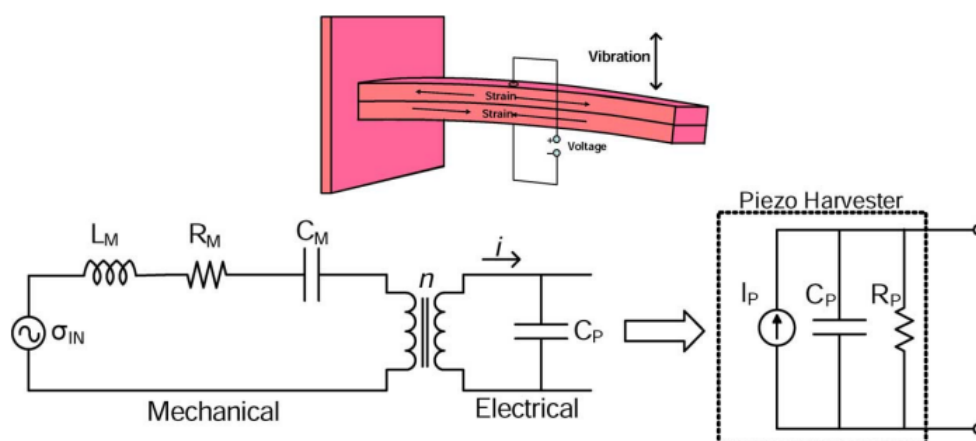
Tabulka 2.2: Frekvence a zrychlení nejběžnějších vibračních zdrojů [14]

Zdroj vibrací	Zrychlení $A$ [m/s]	frekvence $f_{peak}$ [Hz]
Motorový prostor automobilu	12,0	200
Podstava 3-osého obráběcího stroje	10,0	70
Kryt mixéru	6,4	121
Přístrojová deska automobilu	3	13
Malá mikrovlnná trouba	2,5	121
Okno v blízkosti rušné ulice	0,7	100
Sušička na prádlo	3,5	121
Rám dveří hned po jejich zavření	3,0	125

„Vibrace tuhého tělesa mohou být způsobeny několika faktory, jako například nevyváženou hmotou, natržením nebo opotřebením materiálu a může k nim dojít v každém dynamickém systému. Chování je unikátní pro jednotlivé systémy a může být jednoduše popsáno dvěma parametry.“ [8] Těmi jsou **tlumící konstanta** a **přírozená frekvence**.

### Ekvivalentní obvod

Samotný piezoelektrický harvester se dá rozdělit na dvě části, a to na mechanickou a elektrickou. Mechanická část je piezoelektrický materiál (membrána), na který působí vibrace, způsobující jeho mechanické namáhání. Toto namáhání je přeměněno na elektrický náboj.



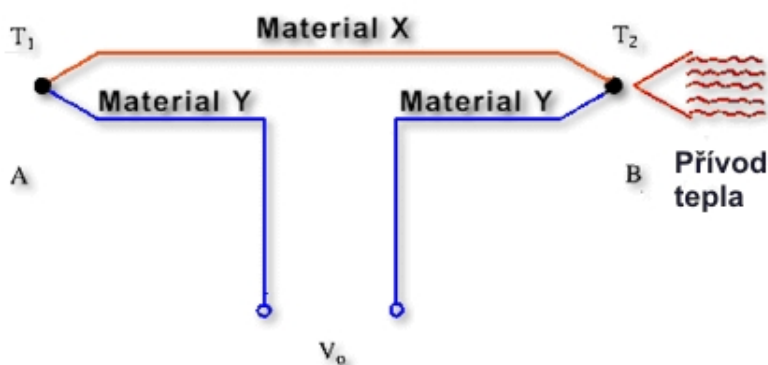
Obrázek 2.3: Ekvivalentní obvod piezoelektrického harvesteru [15]

Jak je vidět v ekvivalentním obvodu na obrázku (viz. Obrázek 2.3) mechanická část je zastoupena pružinovým systémem [15], kde  $L_M$  reprezentuje mechanickou hmotu,  $C_M$  mechanickou tuhost a  $R_M$  mechanické ztráty. Mechanická část je připojena k elektrické pomocí transformátoru, který mění namáhání na proud. V elektrické části pak  $C_P$  představují kapacitu piezoelektrického materiálu (dalo by se říci, že se jedná o deskový kondenzátor). Při rezonanci může být celý obvod transformován na elektrickou část. Potom můžeme při sinusových vibracích pohlížet na piezoelektrický prvek jako na sinusový proudový zdroj s paralelní kapacitou  $C_P$  a odporem  $R_P$ . „Jedním z problémů u generátorů tohoto typu je návrh a výroba efektivního obvodu pro přeměnu energie získané z piezoelektrického materiálu.“ [15]

### 2.3.2 Termoelektrický

Princip využívající jako zdroj teplo. Harvestery užívající tohoto principu se nazývají termogenerátory. Tato zařízení ke své činnosti využívají rozdílných teplot (teplotního gradientu). Pokud je na každé straně zařízení jiná teplota, vytvoří se nám mezi nimi tepelný tok, od teplejší strany ke studenější. Tento tok má za následek přenos nosičů náboje a vznik napětí, jehož velikost je závislá na rozdílu obou teplot.

Pojem Termoelektrický jev ve skutečnosti zahrnuje jevy tři (Seebeckův, Peltierův a Thomsonův). Seebeckův jev by se dal jednoduše vysvětlit takto: „*Jsou-li spojeny dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a mají-li spoje různou teplotu  $T_1$  a  $T_2$ , protéká obvodem elektrický proud (viz. Obrázek 2.4)*“ [7].



Obrázek 2.4: Seebeckův jev [7]

Peltierův jev je opakem jevu Seebeckova. Při průchodu proudem obvodem, který se skládá ze dvou rozdílných vodičů zapojených v sérii. Přičemž, jedna ze styčných ploch se ochlazuje a druhá se naopak zahřívá.

„*Thomsonův jev je podobný Seebeckovu jevu, rozdíl je v tom, že Thomsonův jev vzniká při ohřátí pouze jednoho vodiče (u Seebeckova jevu jsou nutné vodiče dva). I proto je měřené termoelektrické napětí u Thomsonova jevu velmi malé.*“ [22]



### 2.3.3 Indukční

Je to princip založen na elektromagnetické indukci  $B$ . Ze zákona o elektromagnetické indukci (Faradayova indukčního zákona) vyplývá, že pokud umístíme uzavřený elektrický obvod do magnetického pole dojde ke vzniku napětí, ovšem pouze pokud je magnetické pole časově proměnné, tedy nestacionární. Zjednodušeně řečeno elektromagnetická indukce je vznik indukovaného napětí a proudu, způsobený v důsledku časové změny magnetického indukčního toku  $\Phi$ .

Zatím hlavní nevýhodou systémů založených na tomto principu je jejich velikost, která je značně znevýhodňuje pro užití v mobilních zařízeních a v místech s omezeným prostorem.

### 2.3.4 Pyroelektrický

Pracuje na pyroelektrickém principu, tedy převádí změnu teploty na napětí. Tato metoda vychází ze schopnosti určitých materiálů, při jejich ohřátí či zchlazení generovat napětí. Při změně teploty materiálu dojde, ke změně polohy atomů jeho krystalové struktury, tím se změní i polarita materiálu. Změna polarity způsobí vznik napětí. Pokud se teplota ustálí, velikost napětí začne klesat.

### 2.3.5 Kapacitní

U tohoto principu jsou základem na vibracích závislé proměnné kondenzátory. Vibrace oddělí desky proměnného kondenzátoru, při tom se mechanická energie přemění na elektrickou. Tyto harvestery potřebují pro tento převod energií zdroj polarizace v řádech stovek voltů, to způsobuje zvýšení nároků na napájecí obvod. Alternativou pro zdroj polarizace jsou elektrety, tedy elektricky nabitá dielektrika schopná udržet polarizaci po dlouhou dobu.

### 2.3.6 Fotovoltaický

Tento princip využívá solární energie, kterou pomocí fotovoltaických článků (polovodičů projevujících se fotovoltaickým jevem) převede na stejnosměrnou elektřinu. [6] Fotovoltaický jev vzniká v polovodičích, když foton s dostatečnou energií uvolní elektron z valenčního pásu do pásu vodivostního. Ve valenčním pásu zůstane tzv. díra (chybějící elektron), kterou lze považovat za elementární kladný náboj. Zjednodušeně lze prohlásit, že dopadem fotonu se vytvoří pár pohyblivých nábojů elektron-díra. Tyto náboje se difúzí nebo působením elektrického pole v okolí PN přechodu, pohybují ve směru k elektrodě se stejnou polaritou. Při propojení elektrod vnějším obvodem putují elektrony k opačné elektrodě, kde rekombinují s dírami. Jinak řečeno vnějším obvodem prochází elektrický proud. Tento princip se dá použít pro venkovní aplikace, kde je získaný výkon až o dva řády vyšší, než u vnitřní aplikace.

### 2.3.7 Ostatní

Mezi další „exotičtější“ způsoby získávání elektřiny patří bio palivové články, které jako využívají jako zdroj chemickou reakci, jako je například oxidace krevního cukru a další. Dalším principem je získávání energie ze změn atmosferického tlaku, čehož využívají například hodiny Atmos.

## 2.4 Současný stav

Potenciálem volné energie a jejího využití se lidstvo zabývalo už od úsvitu civilizace. Zařízení jako jsou pasivní solární systémy (skleníky, sušárny, zimní zahrady), větrné a vodní mlýny, byli používány už ve starověku. [9] Začátky „skutečného“ energy harvesting můžeme datovat do sedmdesátých let minulého století, kdy můžeme hovořit o první energetické krizi. To mělo za následek zvýšený zájem o rozvíjející se technologie získávání elektřiny. Mezi tyto nové „módní“ technologie patřilo hlavně využití solární energie a dále se začaly objevovat rozsáhlé větrné farmy. Původní prognózy, že tyto energie zcela nahradí fosilní paliva ve výrobě elektřiny, se nenaplnily a jejich rozvoj se zpomalil.

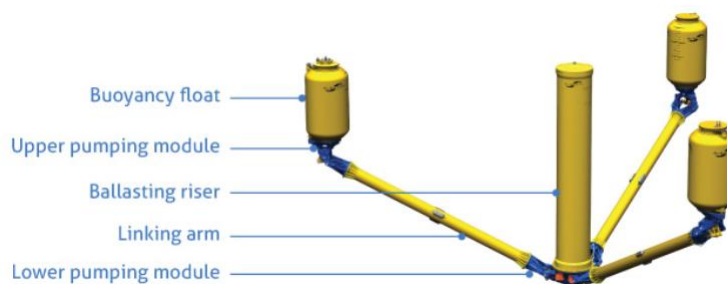
Rozsáhlejší výzkum a vývoj energy harvesting se skutečně rozjel až se začátkem 21. století. Od té doby se na něm založené technologie vyvinuly a stali se vhodnými pro praktické využití. Mnoho výzkumníků se věnuje hledání nových reálných řešení. Tento neustále probíhající vývoj, který čerpá z již získaných znalostí a zkušeností, se začíná projevovat ve stále větší „zralosti“ systémů.

### 2.4.1 Inovace v oboru

Právě tato podkapitola má za cíl tento vývoj přiblížit a uvést příklady nových poznatků v oboru energy harvesting i v ostatních přidružených oborech.

#### Nová metoda získávání energie z mořských vln

Skotská společnost Albatern Wave Energy [13] vytvořila WaveNet (viz. Obrázek 2.5) nebo-li „pobřežní pole“ využívající energii z pohybu vln ke generování elektřiny. Tato plovoucí struktura, pružná ve všech směrech, dokáže zachytit energii z oceánu bez ohledu na směr vln a orientace pole. První vyvinuté pole bylo zkonstruováno pro provoz v minimální hloubce 20 metrů a generování elektřiny při velikosti vln 0,3-6 metrů a je schopné dodat výkon až  $300 \text{ MW}/\text{km}^2$ .



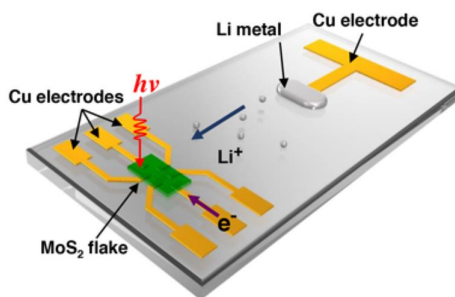
Obrázek 2.5: Model systému WaveNet [13]

### Nová baterie

Jak již bylo zmíněno, harvestery nejsou ve většině případech schopny kompletně pokrýt energetické požadavky napájeného zařízení. Z toho důvodu je ve většině systémů součástí, která má za cíl získanou energii uložit. V současné době se k tomuto účelu ve velké míře používají baterie. Proto je pro rozvoj energy harvestingu důležitý i vývoj nových a lepších baterií.

Největší úsilí ve vývoji baterií se zaměřuje na hledání nových materiálů a výrobních postupů, s cílem zajistit vyšší kapacitu a delší životnost baterie. [12] Avšak výzkumnému týmu z univerzity v Marylandu se při měření výkonnosti baterie podařilo zjistit, že existuje jiný způsob jak toho dosáhnout. Při jejich měření zjistili, že kapacita baterie je závislá na způsobu jejího nabíjení. Klíčem k jejich měřicímu postupu bylo navržení takové baterie, která mohla být současně pozorována a nabíjena v sondovací stanici.

Pro tento účel navrhli lithium-iontovou mikrobaterii (viz. Obrázek 2.6) s elektrodami z dvourozměrných krystalů sulfidu molybdenu MoS<sub>2</sub> (materiál, který je v současné době zkoumán pro využití ve fotonických, optoelektrických a energetických zařízeních). Právě při testování rezistivity elektrod na úrovni nanošupin (polovodičová nanostruktura s potenciálním využitím v solárních článcích) u této nové mikrobaterie si uvědomili, že způsob jejího nabíjení je stejně důležitý jako způsob výroby. Objevili nový způsob rychlo nabíjení, který vedl ke zvýšení vodivosti a trojnásobnému zvýšení kapacity oproti tradiční metodou nabité baterii. Tato nabíjecí technika je v současné době omezena pouze na Li-ion baterie s MoS<sub>2</sub>.



Obrázek 2.6: Model mikrobaterie vyvinuté týmem z Marylandské univerzity [12]

### Nová konstrukce větrné turbíny

Španělská firma Vortex Bladeless [20] vyvinula nový způsob využití větru pro výrobu elektřiny. Jejich větrná turbína neobsahuje lopatky (elektřina se generuje díky oscilacím stožáru), čímž je oproti klasickým větrným turbínám značně snížen hluk. Další výhodou je možnost umístit je blíže u sebe (díky absenci lopatek). Výrobce také udává, že vyrobená elektřina je zhruba o 40 procent levnější, než u klasických větrných turbín.

Turbíny společnosti Vortex využívají víření vzduchu. Tvar turbíny byl navržen tak, aby byl pohyb vzduchu rozprostřen po celém stožáru. Oscilace stožáru způsobená vzdušnými víry má za následek pohyb magnetů u paty stožáru, což vede ke generování elektřiny.

### Solární cyklostezka

V Nizozemském městě Krommenie je již rok v testovacím provozu solární cyklostezka. [21] Od jejího prvního otevření cyklostezka vyrobila již 3000 kWh (odhadem roční spotřeba jednoho člena domácnosti), tedy více než se původně předpokládalo. Během provozu byla vylepšována hlavně vrchní centimetrová vrstva, po které již projelo více než 150 000 cyklistů. Samotná testovací cyklostezka je dlouhá 70 metrů a je složená z modulů dlouhých 2,5-3,5 metru.

### 2.4.2 Využití

#### Bezdrátové senzorové sítě neboli WSN (wireless sensor network)

Jsou to sítě, sestávající se z množství komponentů (senzorových uzlů) umístěných v prostředí, které slouží k monitorování okolí (dopravy, pohybu, počasí, ...). [10] Tyto sítě vyžadující dlouhodobý provoz, pokud možno bez údržby jsou většinou napájeny bateriemi. Vzhledem k tomu, že senzorové uzly byly navrženy jako nízko napěťové a vzhledem k rozvoji energy harvesting, se jeho užití v této oblasti jeví stále atraktivnější.

V současné době slouží energy harvesting v těchto sítích většinou „jen“ k prodloužení doby životnosti baterií. Cílem dalšího vývoje je provoz bez baterií, tomu v současnosti brání několik faktorů. Jedním z nich je, že množství získané energie harvesterem za daný časový úsek je značně nepředvídatelné. Jako příklad se dají použít solární články, u nichž množství získané energie nejen, že závisí na účinnosti článků, ale také na počasí, denní době, jejich umístění a čistotě.



Obrázek 2.7: Blokový diagram solárního harvesteru společnosti Silicon Laboratories Inc.[11]

Využitím energy harvesting pro napájení WSN sítí se zabývá hned několik společností. Za příklad může posloužit společnost Silicon Laboratories Inc. (SiLabs). [11] Jejich řešení (systémy řady Si10xx) je založeno na jednočipových mikrokontrolérech a obvodech rádiového vysílače, navržených speciálně pro zajištění řízení a přenosu dat při extrémně nízké spotřebě energie. Proto není divu, že společnost nedávno představila řešení bezdrátových senzorových systémů s velmi vysokou účinností, určených pro napájení ze solárních článků a jiných alternativních zdrojů energie (viz. Obrázek 2.7).

#### Dobíjení baterií

Jak již bylo zmíněno, harvestery se často používají pro dobíjení baterií. Například se uvažuje o jejich využití k dobíjení baterie mobilního telefonu. [4]

# 3

## Návrh systému

Tato kapitola se zabývá návrhem technického řešení měření teploty v proměnném magnetickém poli a napájením navrženého zařízení, tedy výběrem vhodného energy harvesteru. Celé zařízení, tedy jak měřicí část, tak energy harvester, bude umístěno na hřídeli elektromotoru. Toto umístění má za následek omezení co se týče rozměrů a prací se získanými hodnotami (přenos nebo záznam).

### 3.1 Měření teploty v proměnném magnetickém poli

Tato část se zabývá bližším popisem samotného měření teploty, tedy různými způsoby, které byly pro danou aplikaci uvažovány a samozřejmě popisem nakonec vybraného způsobu.

Již zpočátku návrhu bylo rozhodnuto, použít jako teplotní senzor termočlánek. Ten má oproti jiným senzorům teploty, jako je například termistor několik výhod. Mezi tyto výhody patří:

- Velký teplotní rozsah: ( $-200^{\circ}\text{C}$  až  $+2500^{\circ}\text{C}$ ) v závislosti na vybraném typu termočlátku.
- Robustnost: Termočláanky jsou robustní zařízení, a proto jsou odolné vůči otřesům a vibracím. Jsou vhodné pro provoz v nepříznivých podmínkách.
- Rychlá odezva: Termočláanky mají malou teplotní kapacitu, proto rychle reagují na změny teploty. (v řádech stovek milisekund)
- Nevzniká na nich žádné samozahřívání: Termočláanky nevyžadují žádné buzení, které by vytvářelo odpadní teplo.

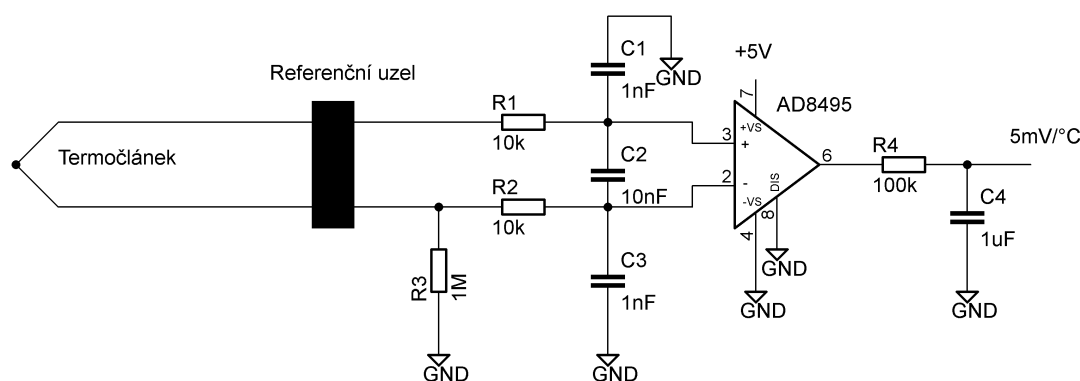
Jak je výše uvedeno je několik typů termočláanků. Tyto jednotlivé typy se od sebe liší podle toho, z jakých kovů jsou vyrobeny. Odlišné kovy mají za následek různé teplotní rozsahy jednotlivých typů termočláanků, stejně tak jejich rozdílnou přesnost.

Na několika následujících stránkách jsou přiblíženy některé uvažované způsoby měření teploty.

### Měření teploty s použitím AD8495

Toto konkrétní zapojení (viz. Obrázek 3.1) pro měření teploty je výhodné pro svou cenu (AD8495 spolu se zbytkem součástek celkově vyjde zhruba na 400 Kč) a jednoduchost. Na výstup AD8495 stačí připojit voltmetr a změřenou hodnotu napětí přepočítat na teplotu. Bohužel jako omezení by u tohoto zapojení mohlo být vnímáno, že je vhodné pro termočlánek typu K. Ten má sice poměrně dostačující teplotní rozsah, ale jeho přesnost je oproti termočládkům jiných tříd poměrně malá (při 25°C je to  $\pm 3^\circ\text{C}$ ).

Termočlánekový zesilovač AD8495 zesiluje se ziskem 122, což má za následek výstupní hodnotu  $5\text{mV}/^\circ\text{C}$ . Jeho minimální napájecí napětí je 2,7V. Součástí zapojení je RFI filtr pro odstranění vlivů vysokofrekvenčního rušení.

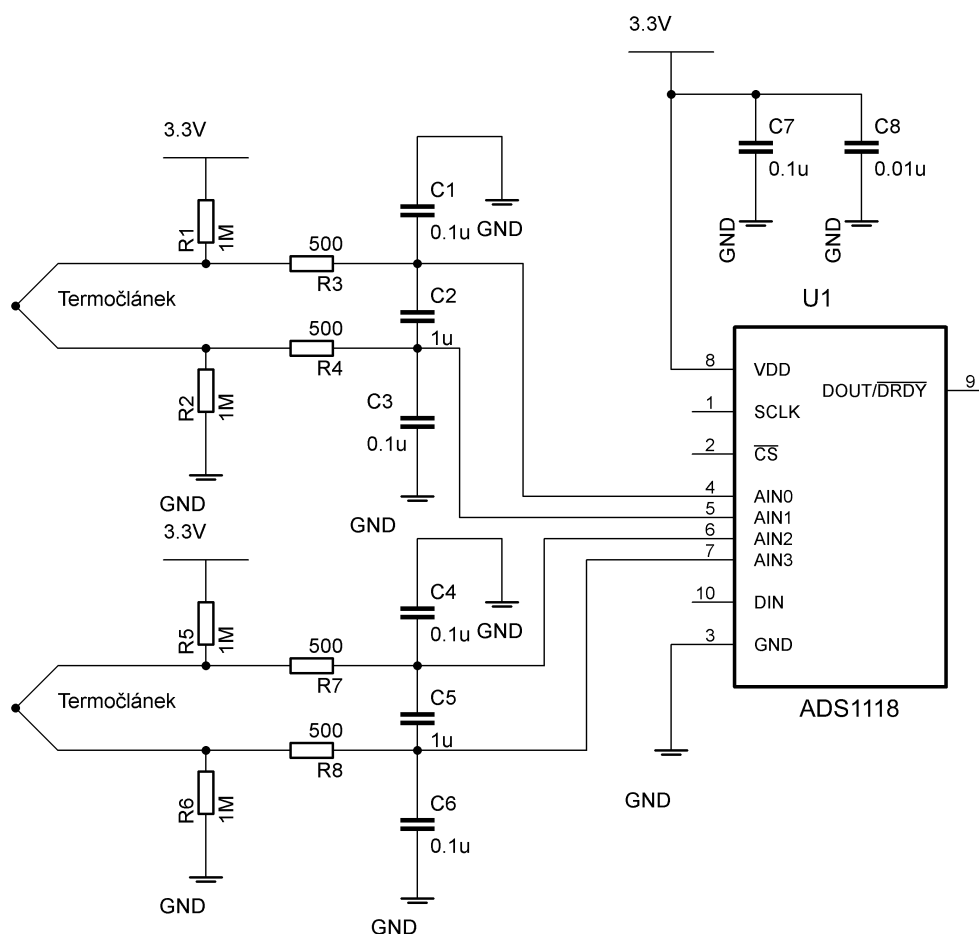


Obrázek 3.1: Schéma zapojení AD8495

### Měření teploty s použitím ADS1118

Zapojení s použitím ADS1118 (viz. Obrázek 3.2) je oproti předchozímu o mnoho složitější a i cena je několikanásobně vyšší. Naopak mezi výhody zapojení patří užití dvou termočláneků, jedná se tedy o dvoukanálový systém. Dále pak naměřené výstupní hodnoty jsou pomocí ADS1118 převedeny do digitální podoby, která se dá lépe využít pro další operace (například komunikace s PC). Mezi zajímavé parametry ADS1118 patří minimální  $-40^\circ\text{C}$  a maximální  $125^\circ\text{C}$  operační teplota. Požadované napájecí napětí je minimálně 2V a maximálně 5,5V. ADS1118 má také programovatelnou přenosovou rychlost (8-860 vzorků za sekundu).

Jak můžeme vidět zapojení obsahuje filtry pro odstranění šumu. Filtr se skládá z diferenčních odporů o hodnotě  $500\Omega$  ( $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_7$  a  $R_8$ ) a diferenčního kapacitoru o hodnotě  $1\mu\text{F}$  ( $C_2$  a  $C_5$ ). Kapacitory  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  a  $C_6$  jsou pro zmenšení útlumu způsobeného vysokofrekvenčním „common-mode“ šumem. Je doporučeno, aby měl diferenční kapacitor řádově 10x vyšší hodnotu než „common-mode“ kapacitory.



Obrázek 3.2: Schéma zapojení ADS1118

Tato dvě zapojení nejsou pro naši aplikaci nejvhodnější. Samotné jsou při daném umístění (hřídel elektromotoru) nepoužitelné. V prvním bylo by nutno doplnit ho A/D převodníkem. V obou případech pak paměti pro uschování naměřených hodnot, popřípadě vysílačem pro bezdrátový přenos dat. Tyto další součástky vyžadují dodatečné místo a v našem případě ho není nazbyt.

### Zvolené řešení pro měření teploty (Omega MWTC)

Pod názvem tohoto zařízení vyráběného společností OMEGA Engineering se skrývá chytrý bezdrátový termočlánekový konektor, nebo-li zařízení, které má za úkol změřit teplotu a pomocí vysílače přeposlat naměřené hodnoty do přijímače. Přijímač je připojen k počítači, na němž je možné s naměřenými hodnotami pracovat přímo v software od výrobce. Tento software nám umožňuje nejen zobrazit naměřené hodnoty, ale také je uložit do paměti a vykreslit charakteristiku.



Obrázek 3.3: Omega MWTC [16]

Jak je možno vyčíst z katalogu [16], tak zařízení (samotný vysílač) je dlouhé jen 7,6 cm, široké 2,54 cm a vysoké 1,3 cm. Tyto rozměry jsou pro umístění na hřídel elektromotoru dostatečně malé. Navíc zařízení je na rozdíl od dvou předešlých způsobů již umístěno v nylonovém pouzdře, což zaručuje ochranu zařízení proti mechanickému poškození. Teplotní rozsah a přesnost je závislá na použitém typu termočlánku. Četnost měření a odesílání hodnot je nastavitelná. Nejmenší možná „pauza“ mezi hodnotami jsou 2 sekundy a největší 2 minuty. Vzdálenost, na kterou je vysílač schopen přenášet data je až 90 metrů ve venkovních prostorech (pokud nejsou v cestě signálu žádné překážky), uvnitř budov je tato vzdálenost až 39 metrů. Zařízení je napájeno jednou baterií velikosti AAA (1.5V lithium, která je součástí balení), ale lze použít i jiné (1.5V alkaline nebo 3.6V lithium). V našem případě použijeme k napájení zařízení místo baterie energy harvester.

### 3.2 Výběr energy harvesteru

Výběr vhodného energy harvesteru pro danou aplikaci má řadu úskalí. Podobně jako u samotného zařízení pro měření teploty musíme brát na zřetel velikost a také samotný princip činnosti harvesteru, tedy jestli bude v dané aplikaci fungovat. Na první pohled by se mohlo zdát, že ideálním pro danou aplikaci je indukční energy harvester. Bohužel, jak již bylo zmíněno výše, tak bohužel právě velikost je v současnosti hlavním problémem tohoto druhu energy harvesterů. Naopak jako slibné se ukázaly harvestery využívající piezoelektrického principu. Na několika následujících stranách je přibliženo několik energy harvesterů, které byly zkoumány pro užití na napájení termočlánekového konektoru.



### 3.2.1 Perpetuum Vibration Energy Harvester (VEH)

Jeden z původně uvažovaných je i tento vibrační energy harvester společnosti Perpetuum (viz. Obrázek 3.4). Tento harvester se vyrábí v několika provedeních, lišících se přednastavenou rezonanční frekvencí. Mezi hlavní modely patří harvestery pro získávání energie z vibrací o frekvencích 50Hz, 60Hz, 100Hz a 120Hz, tyto frekvence odpovídají síťové frekvenci a jejímu dvojnásobku (50Hz, 100Hz v Evropě a 60Hz, 120Hz ve Spojených státech), ale také 25Hz a 30Hz. Výběr těchto frekvencí má uživatel usnadnit optimalizování harvesteru pro uvažovanou aplikaci a zajistit tak získání maximálního možného výkonu.



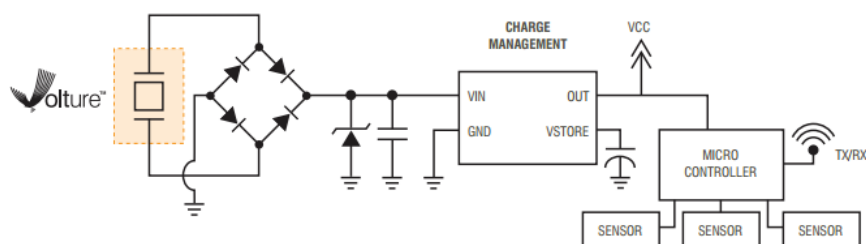
Obrázek 3.4: Perpetuum Vibration Energy Harvester [17]

Samotný VEH je kombinací elektromagnetického vibračního energy harvesteru a inteligentního power managementu. Jeho výkon je 27mW při 5V a 24mW při 8V. Nejčastější využití tohoto harvesteru je v průmyslovém provozu pro napájení WSN, kde neslouží jako primární zdroj energie, ale spíše pro prodloužení životnosti baterií.

Po prozkoumání tohoto harvesteru je víc než jasné, že v situaci, kdy potřebujeme napájet zařízení na hřídeli elektromotoru je harvester, který má být umístěn na stator naprosto nepoužitelný.

### 3.2.2 Vulture Vibration Energy Harvester

Vulture je série piezoelektrických energy harvesterů od americké společnosti Midé Technologies využívající jako zdroj energie mechanické vibrace. Ty jsou harvesterem přeměněny na střídavou elektrinu. Série Vulture se od ostatních energy harvesterů na piezoelektrickém principu liší převážně unikátním obalem piezoelektrického měniče. [18] Pomocí výrobního procesu, který je patentem, společností je kolem samotného měniče vytvořena ochranná vrstva s před-připojenými vodiči. Výsledkem je „robustní“ harvester, jehož ochranná vrstva poskytuje také elektrickou izolaci, ochranu proti vlhkosti a nečistotám.



Obrázek 3.5: Schéma typické aplikace harvesteru [18]

Série Vulture se vyrábí v šesti standardních velikostech. Hlavním rozdílem je velikost získatelného výkonu, rozsah použitelných frekvencí pro převod na elektřinu, velikost generovaného napětí a cena. Detailnější porovnání jednotlivých velikostí je možné vidět v následujících tabulkách.

Tabulka 3.1: Porovnání maximálních výchylek jednotlivých modelů [18]

Model	Maximální výchylka
V20W	2,54 mm
V25W	3,81 mm
V21B	1,524 mm
V21BL	4,572 mm
V22B	0,762 mm
V22BL	3,048 mm

Jak je vidět v tabulce (viz. Tabulka 3.2), každý model má jiný rozsah frekvencí. Pro maximální možnou výkonnost je potřeba daný harvester naladit na rezonanční frekvenci. Toto ladění se provádí přidáváním zátěže na konec harvesteru. Abychom mohli stanovit velikost zátěže je potřeba znát parametry zdroje vibrací (frekvenci, amplitudu). V některých aplikacích jsou nám tyto parametry známe, v jiných je musíme nejprve změřit pomocí akcelerometru.

Tabulka 3.2: Porovnání frekvenčních rozsahů jednotlivých modelů [18]

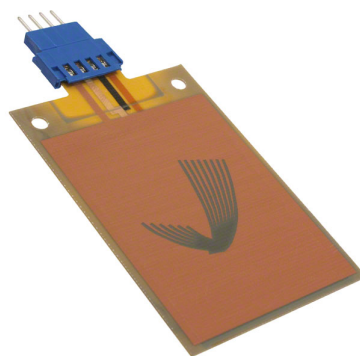
Model	Rozsah frekvencí [Hz]
V20W	75-180
V25W	40-120
V21B	105-275
V21BL	40-110
V22B	80-240
V22BL	30-110

Každý harvester série Volture se skládá ze dvou vzájemně odizolovaných piezoelektrických vrstev. V následující tabulce jsou porovány jednotlivé modely dle elektrických vlastností (sériová kapacita a rezistivita) jedné vrstvy při dvou vybraných frekvencích. Jak je z tabulky (viz. Tabulka 3.3) vidět sériová kapacita vrstvy se ze změnou frekvence nezmění, naopak rezistivita s vyšší frekvencí klesá.

Tabulka 3.3: Porovnání charakteristických elektrických vlastností jednotlivých modelů [18]

Model	kapacita při 100 Hz	rezistivita při 100 Hz	kapacita při 120 Hz	rezistivita při 120 Hz
V20W	69 nF	390 $\Omega$	69 nF	340 $\Omega$
V25W	130 nF	210 $\Omega$	130 nF	175 $\Omega$
V21B	26 nF	950 $\Omega$	26 nF	770 $\Omega$
V21BL	26 nF	950 $\Omega$	26 nF	770 $\Omega$
V22B	9 nF	2400 $\Omega$	9 nF	2000 $\Omega$
V22BL	9 nF	2400 $\Omega$	9 nF	2000 $\Omega$

Každá piezoelektrická vrstva má dva výstupní piny + a - (viz. Obrázek 3.6). Při získávání elektřiny se ale používají obě vrstvy současně. V praxi máme dvě možnosti jak tyto dvě vrstvy spojit. Jednou možností je sériové spojení, jehož výhodou je dvojnásobné generované napětí. Generovaný proud má stejnou velikost jako proud jedné vrstvy a kapacita je poloviční. Druhou možností je zapojení paralelní, které nám sice nezvýší velikost generovaného napětí, ale zvýší nám na dvojnásobek proud a kapacitu.



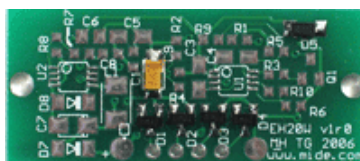
Obrázek 3.6: Vibrační energy harvester série Volture (konkrétně typ V25W) [18]

Typická aplikace harvesterů série Volture je napájení různých senzorů. Konkrétním příkladem jejich využití je u vlakových souprav, kde se umísťují na podvozek vlaku a napájí senzory zodpovědné za monitorování stavu brzd.

Protože se harvestery používají převážně pro napájení senzorů, je potřeba doplnit je o obvod pro usměrnění a další zpracování. Společnost Midé Technologies nabízí několik řešení přímo pro užití ve spolupráci s harvestery série Volture.

### Zesilovací desky EHE001c a EHE001nc

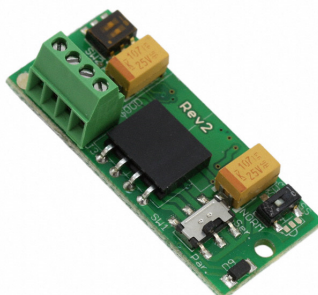
Tyto zesilovací desky obsahují dvoucestný usměrňovač a dávají nám neregulovanou stejnosměrnou výstupní hodnotu. Tyto dva prodávané typy se liší pouze v tom, že součástí modelu EHE001c je  $10\ \mu\text{F}$  kondenzátor pro vyhlazení průběhu. Hodnota výstupního napětí je omezena na 0-15 Voltů. U modelu EHE001nc (bez kondenzátoru) je výstupní stejnosměrné napětí v rozmezí 0-70 Voltů.



Obrázek 3.7: Zesilovací deska EHE001c [19]

### Energy harvesting conditioning circuit EHE004

Zjednodušeně řečeno, jedná se o upravenou a vylepšenou verzi předchozích zesilovacích desek. Stejně jako ony slouží k zesílení a usměrnění. Liší se tím, že je možné ji nastavit pomocí přepínačů. Tyto přepínače nám umožňují nastavit například velikost výstupního stejnosměrného napětí (1,8V; 2,5V; 3,3V a 3,6V). Další přepínač umožňuje přepínání mezi sériovým a paralelním chodem. Poslední přepínač slouží k přepínání mezi normálním režimem a tzv. „superseries“ režimem. V normálním režimu je usměrňovací můstek provozován v tzv. plno-můstkovém módu a jeho výstupní napětí je polovina vstupního napětí špička-špička bez úbytku na dvou diodách. Tento režim je doporučen pro maximální výkon při mírném vstupním napětí. V režimu superseries zesilovač operuje v tzv. půl-můstkovém módu s úbytkem pouze jedné diody a dovoluje nám provoz při poměrně malých vstupních napětích.



Obrázek 3.8: Energy harvesting conditioning circuit EHE004 [19]

### Energy Harvesting Battery Life Extender Circuit EHE005

Tato deska slouží pro prodloužení životnosti baterií. Toto konkrétní řešení kombinuje spolehlivost baterií s obnovitelností harvesteru. Baterie umístěná na desce dodává energii do zátěže kdykoli je potřeba a je dobíjena harvesterem z vibrací, kdykoli jsou k dispozici.



Obrázek 3.9: Energy Harvesting Battery Life Extender Circuit EHE005 [19]

### 3.3 Měření harvesteru

V rámci bakalářské práce byl zakoupen piezoelektrický energy harvester společnost Midé Technologies série Volture, konkrétně model V22B na němž bylo provedeno měření.

Měření bylo prováděno na vibrační plošce připojené ke generátoru značky digimess ve frekvenčním rozsahu V22B pomocí osciloskopu pro několik různých uchycení harvesteru. Pomocí akcelerometru bylo nastaveno konstantní zrychlení  $10,9 \text{ m/s}^2$ . Kromě různých uchycení bylo měření provedeno ve dvou provedeních bez bodové hmotnosti (pouze oboustranně lepící páska) a s bodovou hmotností (oboustranně lepící páska s matkou  $\approx 0,8$  gramu).

K měření byl použit osciloskop značky Hewlett Packard typ 54603B, akcelerometr byl připojen k měřicímu zesilovači typu 2525. Vibrační plošku poháněl generátor značky digimess typ TG 100, který byl připojen přes výkonový zesilovač Europower EP1500 ( $2 \times 700 \text{ W}$ ).

#### Výsledky měření

Měření bylo zjištěno, že velikost harvesterem získaného napětí je závislá z velké části na způsobu jeho uchycení. Tedy jak na umístění přichycovacích svorek vzhledem k samotnému harvesteru, tak i na materiálu, z kterého jsou vyrobeny. Z tabulek a grafů (viz. Příloha A) je patrné, že čím větší je vzdálenost uchycení od počátku harvesteru (tedy čím blíže je ke konektoru), tím menší je rezonanční frekvence a velikost napětí při ní získaného je větší.

Dalším faktorem ovlivňujícím jak rezonanční frekvenci, tak velikost získaného napětí je tzv. bodová hmotnost. Z našeho měření vyplývá, že při měření s bodovou hmotností cca. 0,8 gramu jsme dosáhli vyšších napětí při podstatně nižších rezonančních frekvencích. S bodovou hmotností se rezonanční frekvence pohybovala mezi 100-170 Hz a velikost získaného napětí byla v rozmezí 1-1,6 Voltu. Naopak bez bodové hmotnosti bylo dosaženo rezonance při vyšších frekvencích (205 Hz v případě uchycení 3,5 cm od kraje a 292 Hz při uchycení 3 cm od kraje) a velikost získaného napětí se pohybovala pouze v řádech stovek milivoltů (487 a 340).

# 4

## Závěr

Na začátku práce je vysvětlen samotný pojem energy harvesting a seznámení s různými principy výroby elektřiny z různých zdrojů volné energie. Tato část se dále zabývá přehledem inovací v oblasti energy harvesting a samozřejmě využitím harvestingu.

V druhé části práce je řešen systém pro měření teploty uvnitř proměnného magnetického pole a výběr energy harvesteru pro jeho napájení. Jak již bylo zmíněno bylo rozhodnuto, že pro danou aplikaci je nejvhodnější užití harvesteru na piezoelektrickém principu. Důvod tohoto výběru je v první řadě plánované umístění harvesteru. Po prostudování jednotlivých principů harvestingu bylo zjištěno, že původně uvažované harvestery pracující na indukčním principu jsou v současné době moc velké, a proto nevhodné pro dané použití.

Byl tedy vybrán piezoelektrický harvester společnosti Midé Technologies typ Volture V22B. Tento harvester byl zakoupen a bylo na něm provedeno měření, s jehož závěry se bylo možno seznámit v předcházející kapitole. Dále bylo zjištěno, že tento konkrétní harvester není pro danou aplikaci nejvhodnější. Problémem tohoto harvesteru je především jeho umístění, tedy hřídel elektromotoru. Tělo harvesteru série Volture potřebuje být pro správný chod vychylováno rovnoměrně na obě strany. V dané situaci je proto nemožné umístit harvester rovnoběžně s osou hřídele, z důvodu existence odstředivých a dostředivých sil. Jedinou možností je proto umístit harvester kolmo na tuto osu. Pro správný chod je potřeba harvester kvalitně uchytit k hřídeli. Dále je potřeba ho vyladit tak, aby frekvence harvesteru odpovídala frekvenci vibračního zdroje, tedy elektromotoru. Toho lze dosáhnout především místem uchycení harvesteru a přidáním bodové hmotnosti na jeho konec.

Pokud bude vše co bylo zmíněno v předchozím odstavci provedeno dá se předpokládat, že navržený systém bude pracovat dle očekávání.

- [1] ENERGY HARVESTING FORUM: **What is Energy Harvesting?**  
Dostupný na WWW: <<http://www.energyharvesting.net/>>
- [2] NATIONAL INSTRUMENTS: **Using Energy Harvesting Devices with National Instruments Wireless Sensor Networks (WSN)**  
Dostupný na WWW: <<http://www.ni.com/white-paper/12128/en/>>
- [3] YEN KHENG TAN: **Sustainable Wireless Sensor Networks**, Vydavatelství In-Tech, Rijeka 2010, ISBN 978-953-307-297-5
- [4] ENERGY HARVESTING JOURNAL: **Charging mobile phones with sound could become a reality**, 2014,  
Dostupný na WWW: <<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/6814/charging-mobile-phones-with-sound-could-become-a-reality>>
- [5] PANDATRON: **Návrh systému Energy Harvesting**, 2010,  
Dostupný na WWW: <[http://pandatron.cz/?1215&navrh\\_systemu\\_energy\\_harvesting](http://pandatron.cz/?1215&navrh_systemu_energy_harvesting)>
- [6] ING. BRONISLAV BECHNÍK, PH.D.: **Stručná historie fotovoltaiiky**, 1.9.2014,  
Dostupný na WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiika/11652-strucna-historie-fotovoltaiiky>>
- [7] OBJECTIVE SOURCE E-LEARNING: **Elektřina z výfuku**, 2008,  
Dostupný na WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3663>>
- [8] SHASHANK PRIYA, DANIEL J. INMAN: **Energy Harvesting Technologies**, Vydavatelství Springer, 2008, ISBN 978-0-387-76463-4
- [9] BOV CHAO: **Making low-voltage energy harvesting practical: Part 1 — The history of energy harvesting**, 20.4.2012,  
Dostupný na WWW: <[http://www.electronicproducts.com/Power\\_Products/Invertors/Making\\_low-voltage\\_energy\\_harvesting\\_practical\\_Part\\_1\\_The\\_history\\_of\\_energy\\_harvesting.aspx](http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Invertors/Making_low-voltage_energy_harvesting_practical_Part_1_The_history_of_energy_harvesting.aspx)>
- [10] YEN KHENG TAN: **Sustainable Energy Harvesting Technologies – Past, Present and Future**, Vydavatelství InTech, Rijeka 2011, ISBN 978-953-307-438-2
- [11] PANDATRON: **Bezdrátová čidla s alternativním napájením**  
Dostupný na WWW: <[http://pandatron.cz/?3783&bezdratova\\_cidla\\_s\\_alternativnim\\_napajenim](http://pandatron.cz/?3783&bezdratova_cidla_s_alternativnim_napajenim)>
- [12] ENERGY HARVESTING JOURNAL: **Faster charging technique boosts battery's capacity**, 5.1.2015,  
Dostupný na WWW: <<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/7210/faster-charging-technique-boosts-batterys-capacity>>
- [13] ENERGY HARVESTING JOURNAL: **New method of harvesting wave energy**, 1.1.2015,  
Dostupný na WWW: <<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/7218/new-method-of-harvesting-wave-energy>>



## LITERATURA

---

- [14] LING BING, K., LI, T., HNG, H.H., BOEY, F., ZHANG, T., LI, S.: **Waste Energy Harvesting**, Vydavatelství Springer, 2014, ISBN 978-3-642-54633-4
- [15] Y. K. RAMADASS, A. P. CHANDRAKASAN : **An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor**, IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, číslo 45, Leden 2010
- [16] OMEGA ENGINEERING: **Miniature Wireless Thermocouple Connectors**, Dostupné na WWW: <[http://www.omega.com/pptst/MWTC\\_series.html](http://www.omega.com/pptst/MWTC_series.html)>
- [17] PERPETUUM LTD: **Perpetuum Vibration Energy Harvester (VEH)**, Dostupné na WWW: <<http://www.perpetuum.com/products/vibration-energy-harvester.asp>>
- [18] MIDE TECHNOLOGY CORPORATION: **Piezoelectric Vibration Energy Harvesters**, Dostupné na WWW: <<http://www.mide.com/products/volture/piezoelectric-vibration-energy-harvesters.php>>
- [19] MIDE TECHNOLOGY CORPORATION: **Energy Harvesting Electronics**, Dostupné na WWW: <<http://www.mide.com/products/volture/energy-harvesting-electronics.php>>
- [20] ENERGY HARVESTING JOURNAL: **A new design of wind turbine**, 21.5.2015, Dostupný na WWW: <<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/7850/a-new-design-of-wind-turbine>>
- [21] ENERGY HARVESTING JOURNAL: **SolarRoad produces more energy than expected**, 15.5.2015, Dostupný na WWW: <<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/7823/solarroad-produces-more-energy-than-expected>>
- [22] ENCYKLOPEDIA FYZIKY: **Thomsonův jev**, Dostupný na WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-thomsonuv-jev>>

# Seznam obrázků

2.1	Bezdrátová senzorová síť pro monitorování elektromotoru napájena vibračním energy harvesterem [2] . . . . .	3
2.2	Blokový diagram klíčových částí EH systému . . . . .	5
2.3	Ekvivalentní obvod piezoelektrického harvesteru [15] . . . . .	7
2.4	Seebeckův jev [7] . . . . .	8
2.5	Model systému WaveNet [13] . . . . .	10
2.6	Model mikrobaterie vyvinuté týmem z Marylandské univerzity [12] . . . . .	11
2.7	Blokový diagram solárního harvesteru společnosti Silicon Laboratories Inc.[11] . . . . .	12
3.1	Schéma zapojení AD8495 . . . . .	14
3.2	Schéma zapojení ADS1118 . . . . .	15
3.3	Omega MWTC [16] . . . . .	16
3.4	Perpetuum Vibration Energy Harvester [17] . . . . .	17
3.5	Schéma typické aplikace harvesteru [18] . . . . .	18
3.6	Vibrační energy harvester série Vulture (konkrétně typ V25W) [18] . . . . .	19
3.7	Zesilovací deska EHE001c [19] . . . . .	20
3.8	Energy harvesting conditioning circuit EHE004 [19] . . . . .	20
3.9	Energy Harvesting Battery Life Extender Circuit EHE005 [19] . . . . .	21
A.1	Měření s bodovou hmotností . . . . .	28
A.2	Měření bez bodové hmotnosti . . . . .	28
A.3	Závislost napětí na frekvenci při měření s bodovou hmotností . . . . .	30
A.4	Závislost napětí na frekvenci při měření bez bodové hmotnosti . . . . .	32

## Seznam tabulek

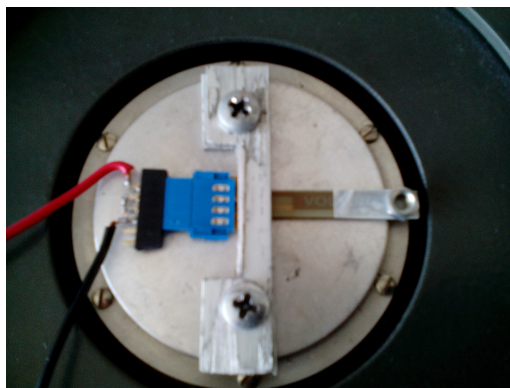
2.1	Porovnání jednotlivých zdrojů dle výkonové hustoty [3] . . . . .	3
2.2	Frekvence a zrychlení nejběžnějších vibračních zdrojů [14] . . . . .	7
3.1	Porovnání maximálních výchylek jednotlivých modelů [18] . . . . .	18
3.2	Porovnání frekvenčních rozsahů jednotlivých modelů [18] . . . . .	18
3.3	Porovnání charakteristických elektrických vlastností jednotlivých modelů [18] . . . . .	19
A.1	Naměřené hodnoty při uchycení harvesteru 2,5 cm; 3 cm a 3,5 cm od kraje s bodovou hmotností . . . . .	29
A.2	Naměřené hodnoty při uchycení harvesteru 3,5 cm a 3 cm od kraje bez bodové hmotnosti . . . . .	31



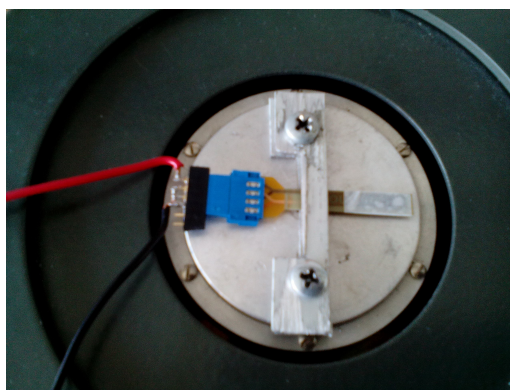
## Dodatek k měření

### A.1 Naměřené hodnoty: Tabulky a grafy

Tabulky hodnot získaných měřením piezoelektrického harvesteru Voltare V22B přichyceného na vibrační plošce a grafy zobrazující závislost velikosti získaného napětí na frekvenci a uchycení.



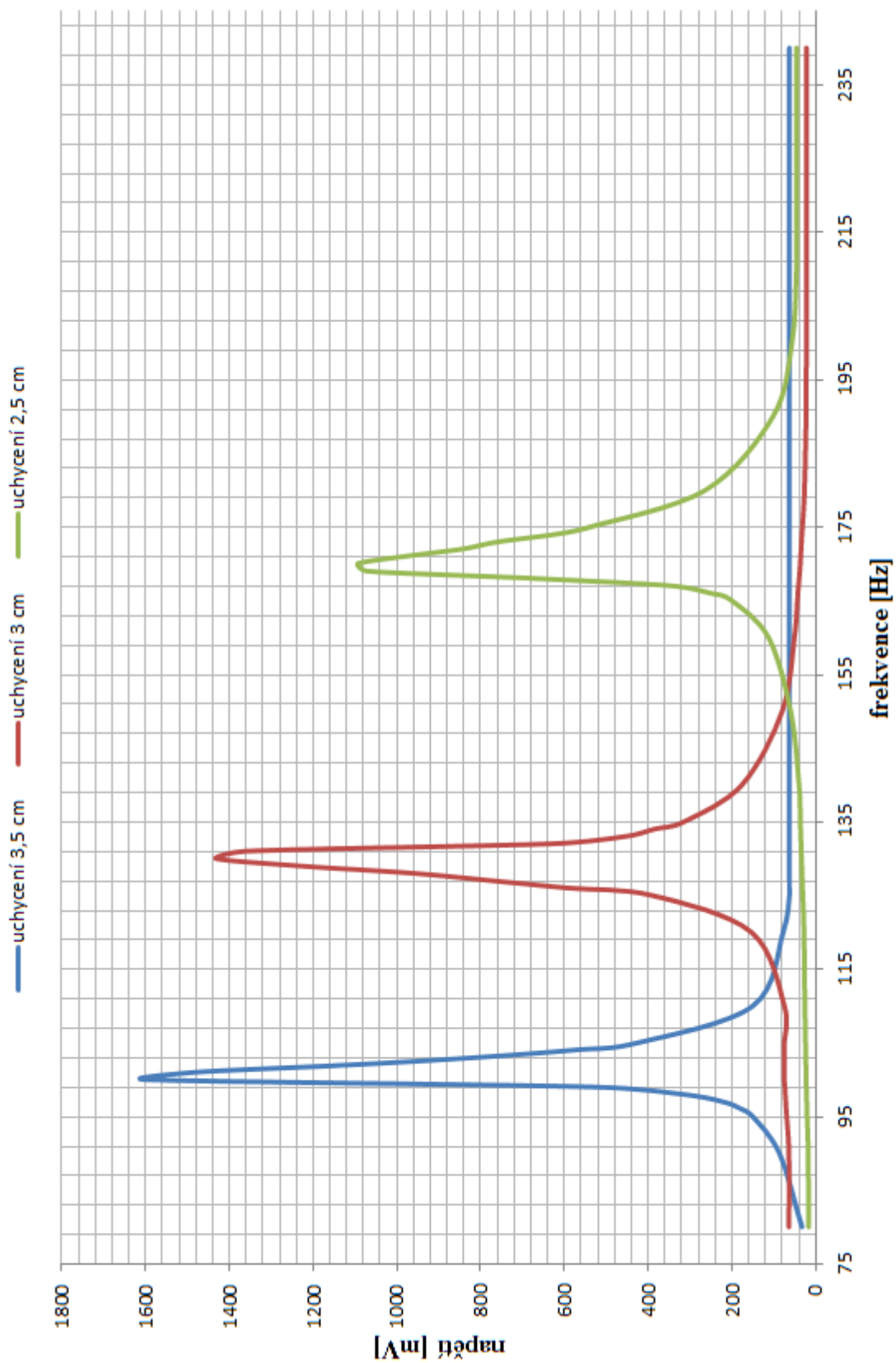
Obrázek A.1: Měření s bodovou hmotností



Obrázek A.2: Měření bez bodové hmotnosti

Tabulka A.1: Naměřené hodnoty při uchycení harvesteru 2,5 cm; 3 cm a 3,5 cm od kraje s bodovou hmotností

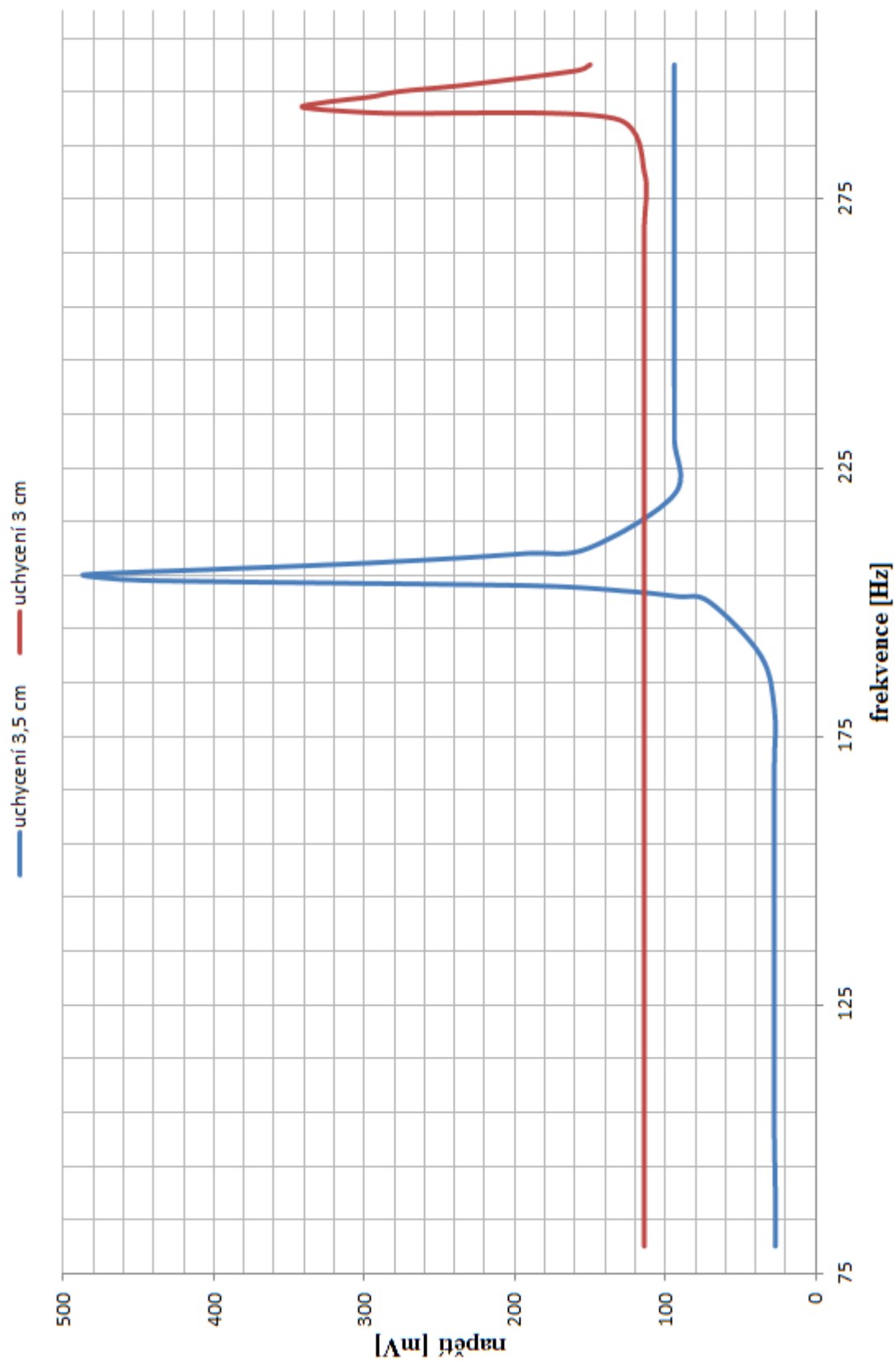
Frekvence [Hz]	Napětí	Frekvence [Hz]	Napětí	Frekvence [Hz]	Napětí
80	17 mV	80	64 mV	80	33 mV
90	18 mV	90	64 mV	90	87 mV
100	23 mV	100	75 mV	95	151 mV
110	26 mV	110	75 mV	96	178 mV
120	28 mV	120	154 mV	97	222 mV
130	34 mV	125	392 mV	98	318 mV
140	40 mV	126	594 mV	99	531 mV
150	60 mV	127	775 mV	100	1,6 V
160	113 mV	128	964 mV	101	1,479 V
165	201 mV	129	1,234 V	102	1,11 V
166	252 mV	130	1,433 V	103	810 mV
167	344 mV	131	1,361 V	104	577 mV
168	670 mV	132	632 mV	105	424 mV
169	1,073 V	133	454 mV	110	150 mV
170	1,094 V	134	385 mV	120	78 mV
171	981 mV	135	314 mV	130	63 mV
172	843 mV	140	176 mV	140	63 mV
173	756 mV	150	80 mV	150	63 mV
174	620 mV	160	51 mV	160	63 mV
175	538 mV	170	37 mV	170	63 mV
180	263 mV	180	27 mV	180	63 mV
190	102 mV	190	23 mV	190	63 mV
200	57 mV	200	22 mV	200	63 mV
210	46 mV	210	22 mV	210	63 mV
220	46 mV	220	22 mV	220	63 mV
230	46 mV	230	22 mV	230	63 mV
240	46 mV	240	22 mV	240	63 mV



Obrázek A.3: Závislost napětí na frekvenci při měření s bodovou hmotností

Tabulka A.2: Naměřené hodnoty při uchycení harvesteru 3,5 cm a 3 cm od kraje bez bodové hmotnosti

Frekvence [Hz]	Napětí	Frekvence [Hz]	Napětí
80	27 mV	80	114 mV
90	27 mV	90	114 mV
100	27 mV	100	114 mV
110	27 mV	110	114 mV
120	27 mV	120	114 mV
130	27 mV	130	114 mV
140	27 mV	140	114 mV
150	27 mV	150	114 mV
160	27 mV	160	114 mV
170	27 mV	170	114 mV
180	27 mV	180	114 mV
190	36 mV	190	114 mV
200	71 mV	200	114 mV
201	92 mV	210	114 mV
202	127 mV	220	114 mV
203	186 mV	230	114 mV
204	448 mV	240	114 mV
205	487 mV	250	114 mV
206	404 mV	260	114 mV
207	315 mV	270	114 mV
208	245 mV	280	114 mV
209	192 mV	290	134 mV
210	150 mV	291	288 mV
220	94 mV	292	340 mV
230	94 mV	293	326 mV
240	94 mV	294	296 mV
-	-	295	277 mV
-	-	296	240 mV
-	-	297	210 mV
-	-	298	182 mV
-	-	299	157 mV
-	-	300	134 mV



Obrázek A.4: Závislost napětí na frekvenci při měření bez bodové hmotnosti