



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# NÁVRH            ELEKTRONIKY            AUTONOMNÍHO MONITOROVACÍHO SYSTÉMU

DESIGN OF AUTONOMOUS MONITORING SYSTEM ELECTRONICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. KRIŠTOF HEGER

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Krištof Heger

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

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

### **Návrh elektroniky autonomního monitorovacího systému**

v anglickém jazyce:

#### **Design of autonomous monitoring system electronics**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je navrhnout elektroniku k energy harvesting zařízení, které pracuje na základě rázů. Takto vyrobená energie může sloužit pro napájení diagnostického systému. Je otázkou, kolik energie získáme z rázů a proto je potřeba v této práci navrhnout datalogger, který nám pro konkrétní aplikaci zhodnotí množství získané energie.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše v oblasti autonomního snímání s využitím mechanických rázů.
2. Volba koncepce power management elektroniky pro daný generátor.
3. Návrh dataloggeru pro měření elektrických veličin během rázů.
4. Experimentální ověření celé soustavy.
5. Zhodnocení naměřených výsledků.

Seznam odborné literatury:

Hadas, Z. et al: Energy Harvesting from Mechanical Shocks Using A Sensitive Vibration Energy Harvester, International Journal of Advanced Robotic Systems, ISSN 1729-8806, 2012.

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

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

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

## **Abstrakt**

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom elektronických prvkov autonómneho monitorovacieho systému, ktorý bude použitý na diagnostiku elektromagnetického vibračného generátora vyvinutého na VUT v Brne. Tento generátor by mal byť v reálnej praxi použitý v aplikácii, kde sa vyskytujú časté mechanické rázy, napr. v automobilovej alebo nákladnej doprave. Monitorovací systém má za úlohu zistiť, či je v takejto dopravnej aplikácii generátor schopný vyprodukovať dostatočné množstvo elektrickej energie, ktoré by zabezpečilo bezproblémovú prevádzku rôznych bezdrôtových snímačov používaných v podobných aplikáciách. Súčasťou práce je prehľad autonómnych diagnostických systémov z vedeckej a komerčnej oblasti, stručný popis použitého vibračného generátora ako aj rešerš komerčne dostupnej power management elektroniky. Ďalšie kapitoly uvádzajú podrobný popis jednotlivých funkčných prvkov energy harvesting systému, simuláciu chovania generátora pre optimálnu záťaž v troch rôznych modelových aplikáciách a najdôležitejšiu časť – samotný návrh autonómneho monitorovacieho systému. Na záver sú zhodnotené dosiahnuté výsledky a je posúdené, či je generátor pri budení rázmi použiteľný v danej aplikácii.

## **Abstract**

This master's thesis deals with the design of autonomous monitoring system electronics which will be used for diagnostics of the electromagnetic vibration generator developed at Brno University of Technology. This generator should be used in a practical application where frequent mechanical shocks are present, for example in vehicle or goods transportation. For such an application, the goal of the monitoring system is to find out whether generator is capable of producing enough electrical energy for smooth operation of wireless sensors used in similar applications. The first part of the thesis consists of the autonomous diagnostics system overview from both commercial and scientific spheres, brief description of the vibration generator used and also a summary of commercially available power management electronics. The next chapters present the detailed description of each functional element of energy harvesting system, the simulation of generator's behaviour for optimal load in three different model applications and the most important part – design of the autonomous monitoring system. In the end, achieved results are evaluated and it is considered whether the shock-driven generator is suitable for use in a given application.

## **Kľúčové slová**

energy harvesting, vibračný generátor, power management, datalogger, autonómny monitorovací systém, mechanické rázy, bočník, odporový delič napätia, akcelerometer

## **Keywords**

energy harvesting, vibration-powered generator, power management, datalogger, autonomous monitoring system, mechanical shocks, shunt resistor, voltage divider, accelerometer

## **Bibliografická citácia**

HEGER, K. *Návrh elektroniky autonomního monitorovacího systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

## **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému „ Návrh elektroniky autonómneho monitorovacího systému “ vypracoval samostatne pod vedením školiteľa a s použitím poznatkov získaných zo zdrojov uvedených na konci tejto práce.

V Brne dňa 29. 05. 2015

.....  
Podpis

## **Pod'akovanie**

Rád by som pod'akoval vedúcemu mojej diplomovej práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za cenné rady, námety a pripomienky, ako aj za jeho ochotu a priateľské jednanie. Ďalej by som rád pod'akoval Ing. Lud'ku Janákovi za postrehy a veľkú pomoc pri tvorbe tejto práce, Ing. Jakobovi Štetinovi za to, že som sa vďaka nemu dokázal dostať až sem a obom za to, že sú mi dobrými priateľmi. V neposlednom rade chcem vyjadriť vďaka aj svojej rodine, pretože ma počas celého môjho štúdia neustále podporovali a boli mi v ťažkých časoch veľkou oporou, a svojim mechatronickým spolužiakom, bez ktorých by to štúdium proste nebolo ono!

# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Ciele práce</b> .....	<b>10</b>
<b>3. Formulácia problému</b> .....	<b>11</b>
<b>4. Prehľad autonómnych diagnostických systémov využívajúcich mechanické rázy/vibrácie</b> .....	<b>12</b>
4.1. Riešenia z vedeckej sféry .....	12
4.2. Komerčné riešenia - dataloggery .....	16
<b>5. Stručný popis použitého vibračného generátora</b> .....	<b>20</b>
5.1. Štruktúra vibračného generátora a vysvetlenie princípu funkcie.....	20
<b>6. Power management</b> .....	<b>24</b>
6.1. Výber vhodnej power management elektroniky .....	24
6.1.1. Maxim Integrated MAX17710 .....	24
6.1.2. Texas Instruments BQ25504 .....	26
6.1.3. Spansion MB39C811.....	27
6.1.4. Linear Technology LTC3331 .....	28
<b>7. Vlastný návrh autonómneho diagnostického systému</b> .....	<b>29</b>
7.1. Štruktúra energy harvesting systému .....	29
7.1.1. Budenie vibračného generátora .....	30
7.1.2. Vibračný generátor a usmernenie generovaného striedavého napätia.....	32
7.1.3. Meranie požadovaných fyzikálnych veličín .....	33
7.1.4. Mikrokontrolér a pamäť .....	34
7.1.5. Napájanie, power management a výber snímača pre otestovanie funkcie ....	36
7.2. Simulácia chovania vibračného generátora v prostredí Simulink.....	39
7.3. Výpočet odporu a výkonu vybraných bezdrôtových snímacích modulov .....	45
7.3.1. Aplikácia č.1 – snímanie teploty .....	45
7.3.2. Aplikácia č.2 – meranie denného úhrnu zrážok .....	46
7.3.3. Aplikácia č.3 – analýza vibrácií v dopravnom prostriedku v reálnom čase ..	46
7.3.4. Zhodnotenie výsledkov simulácie v rámci zvolených aplikácií.....	47
7.4. Návrh prvkov obvodu merajúcich elektrické napätie a elektrický prúd .....	48
<b>8. Experiment a zhodnotenie nameraných výsledkov</b> .....	<b>52</b>
<b>9. Zhrnutie výsledkov práce a záver</b> .....	<b>64</b>
<b>10. Zoznam použitých zdrojov</b> .....	<b>65</b>
<b>11. Zoznam použitých symbolov</b> .....	<b>68</b>
<b>12. Zoznam použitých obrázkov</b> .....	<b>69</b>
<b>13. Zoznam použitých tabuliek</b> .....	<b>72</b>
<b>14. Zoznam elektronických príloh</b> .....	<b>73</b>

# 1. Úvod

Pojem “autonómny monitorovací systém” označuje zariadenie určené na snímanie fyzikálnych veličín a sledovanie javov počas prevádzky najrozličnejších technických sústav, ktorého cieľom je monitorovanie prahových hodnôt veličín za účelom zachovania bezpečného chodu týchto sústav ako aj komplexné poskytovanie informácií o ich stave. Spektrum produktov s týmto označením je na komerčnom trhu pomerne široké, avšak s prudkým rozvojom energy harvesting technológií a zariadení – zariadení vyrábajúcich elektrickú energiu z iných okolitých foriem energie – sa otvárajú v tejto oblasti ďalšie významné možnosti uplatnenia, ktoré boli doteraz z ekonomického alebo technického hľadiska nevýhodné.

Jednou z takýchto možností je použitie autonómnych monitorovacích systémov na takých miestach, ktoré sú pre človeka z dôvodu údržby alebo chodu sústavy ťažko dostupné. V systémoch, ktoré sú napájané primárnymi (nenabíjateľnými) alebo sekundárnymi (nabíjateľnými) zdrojmi energie je nutné po určitej dobe prevádzky tieto zdroje vymeniť za nové, čo môže byť nielen problematické po technickej stránke, ale zároveň je takéto riešenie aj ekonomicky nerentabilné. V tomto prípade sa javí ako veľmi výhodné práve použitie energy harvesting zariadení ako zdroja elektrickej energie, keďže všeobecne sa dá povedať, že tento zdroj vydrží oveľa dlhšie ako iné konvenčné zdroje energie a v podstate sa oň netreba starať, a preto odpadá riešenie komplikácií s údržbou a výmenou, resp. dobíjaním batérií. V neposlednom rade je taktiež na rozdiel od batérií šetrný k životnému prostrediu a nevznikajú problémy spojené s recykláciou.

Keďže energy harvesting generátory generujú relatívne malé elektrické výkony (mikrowatty až miliwatty), monitorovací systém musí byť navrhnutý na nízko-výkonovú (“ultra-low power”) prevádzku tak, aby dokázal čo najefektívnejšie využiť takéto malé množstvo vyrobenej elektrickej energie, a teda aby zbytočne v obvode nevznikali straty. Dôležité je použiť vhodnú power management elektroniku, ktorá sa dokáže o toto efektívne využitie energie postarať, rovnako dôležité je správne navrhnuť aj meracie časti obvodu, aby zbytočne neskresľovali informácie o meraných hodnotách a aby ani tu nedošlo k zásadným stratám na výkone. Veľmi podstatné je aj impedančné prispôsobenie zátáže vzhľadom k použitému generátoru.

## 2. Ciele práce

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce je návrh elektroniky autonómneho monitorovacieho systému – dataloggeru pre vibračný generator vyvinutý na Fakulte strojního inžinýrství VUT v Brne, ktorý bude schopný zaznamenávať na pamäťové médium hodnoty fyzikálnych veličín napätia, prúdu a zrýchlenia pri buzení generátora mechanickými rázmi. Medzi ďalšie ciele patria:

- rešerš autonómnych monitorovacích systémov z vedeckej a komerčnej oblasti využívajúcich určitým spôsobom nechanické rázy
- voľba vhodnej power management elektroniky pre daný generátor
- experimentálne overenie navrhnutého elektronického obvodu a zhodnotenie nameraných výsledkov

### **3. Formulácia problému**

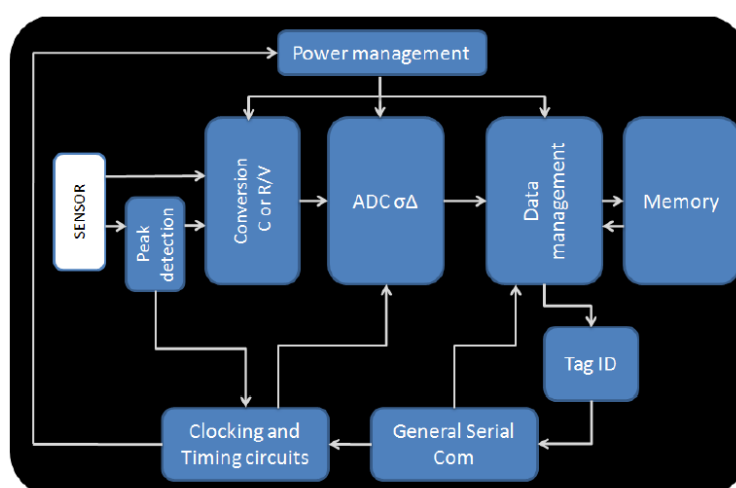
Na to, aby sme vôbec mohli rozmýšľať o použití vibračného generátora, ktorý bol vyvinutý na našej univerzite, na napájanie diagnostických alebo monitorovacích systémov napr. v dopravných prostriedkoch, musíme najprv zistiť, či je takýto generátor schopný vygenerovať z okolitého zdroja vibrácií (v tomto prípade z mechanických rázov) množstvo elektrickej energie, ktoré postačuje na napájanie a celkovo chod takéhoto systému. Preto sa v tejto práci zaoberáme návrhom a praktickou realizáciou diagnostického systému, ktorý bude po pripojení na vibračný generátor zaznamenávať hodnoty generovaného elektrického napätia a prúdu (spolu s hodnotami zrýchlenia budiacich vibrácií), a teda bude schopný poskytnúť informácie o hodnotách generovaného výkonu. Na základe získaných výsledkov sa potom rozhodne, či má zmysel použiť tento generátor na zamýšľaný účel, alebo je pre túto aplikáciu z hľadiska množstva generovaného elektrického výkonu nevhodný.

## 4. Prehľad autonómnych diagnostických systémov využívajúcich mechanické rázy/vibrácie

Ešte predtým, ako bude uvedených niekoľko zaujímavých riešení autonómnych diagnostických systémov z vedeckej a komerčnej oblasti, je nutné podotknúť, že technických článkov, ktoré by sa vyslovene zaoberali systémami špecializovanými na mechanické rázy, je veľmi málo. Väčšinou sú rázy spomínané len v súvislosti s harmonickými vibráciami, takže ich niektoré články zahŕňajú práve pod pojem “vibrácie”, iné rázy úplne opomínajú. V prehľade riešení z vedeckej sféry sú preto zahrnuté aj také, v ktorých sa rázy vyslovene nespomínajú, ale sú pre tieto neperiodické signály (po prípadnom menšom prispôbení) použiteľné.

### 4.1. Riešenia z vedeckej sféry

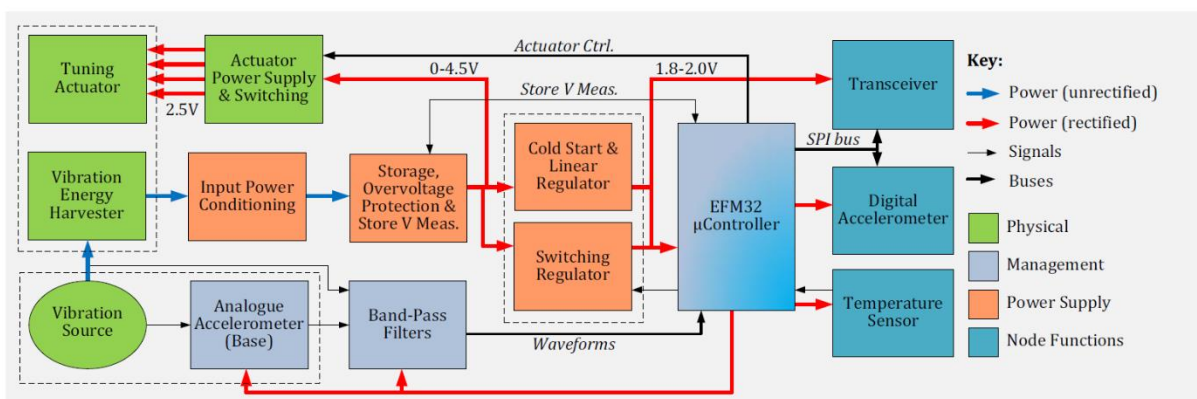
V príspevku [1] je uvedený systém pre snímanie opotrebovania podvozku helikoptéry, ktorého základná schéma je znázornená na obr. 4.1. Základom je MEMS akcelerometer od spoločnosti Ridgetop Group napájaný piezoelektrickým energy harvesting generátorom. Medzi generátor a senzor je vložený integrovaný obvod LTC3588 od firmy Linear Technology, ktorý má za úlohu usmernenie a reguláciu vygenerovaného napätia. Ďalšie tri bloky v schéme majú na starosti získanie a spracovanie signálu z akcelerometra. Ak je detekovaná príliš veľká zmena medzi hodnotami počas merania (blok “Peak detection”), zvýši sa vzorkovacia frekvencia, aby bola hodnota zo senzora zaznamenaná s vysokou presnosťou. Potom nastáva prevod nameraných hodnôt z jednotiek kapacity alebo odporu na jednotky napätia (blok “Conversion C or R/V”) pri využití malého množstva energie a veľkej šírky pásma, pričom musí byť zachované nízke skreslenie informácií. Nakoniec je analógový signál prevedený na digitálny prostredníctvom sigma-delta A/D prevodníku (blok “ADC  $\sigma\Delta$ ”) s nízkou spotrebou energie. Blok “Data management” zabezpečuje zber nameraných dát a ich uloženie do internej alebo externej pamäte - v tomto prípade je realizovaný PIC mikrokontrolérom od firmy Microchip. Zabezpečenie prenosu dát z pamäte a jej následné resetovanie má za úlohu blok “General Serial Com”.



Obrázok 4.1: Blokový diagram autonómneho monitorovacieho systému pre snímanie opotrebovania podvozku helikoptéry

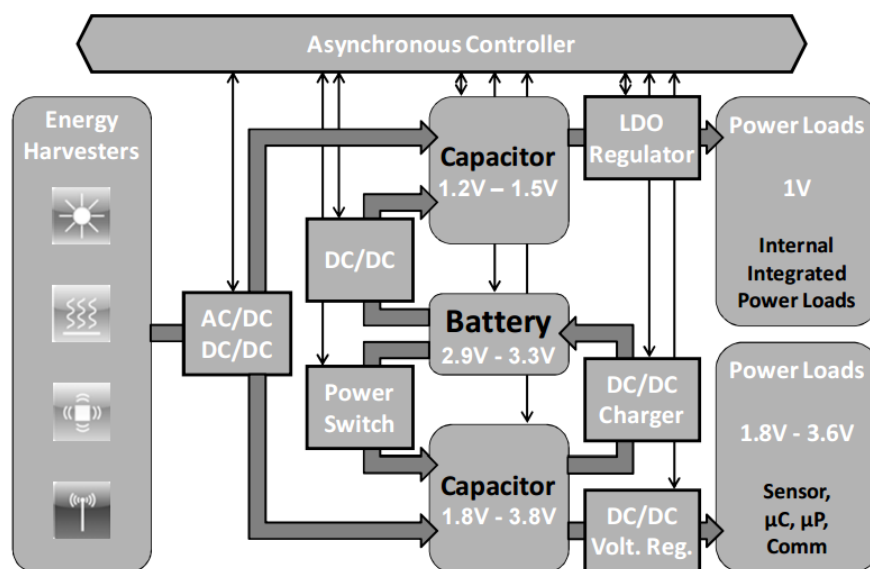
Prevzaté z: [1]

Článok [2] opisuje systém monitorujúci v pravidelných intervaloch úroveň vibrácií a teploty, ktorým je pri prevádzke vystavený motor trajektu. Schéma systému je zobrazená na obr. 4.2. Systém je napájaný elektrickým napätím z elektromagnetického vibračného generátora usmerneným mostíkovým usmerňovačom, ktorý je tvorený Schottkyho diódami s nízkym prahovým napätím. Na uskladnenie vygenerovanej energie sú použité dva sériovo zapojené superkapacity 1 F, 2.3 V od firmy Panasonic. Prepäťová ochrana obsahuje napäťový delič a buffer s jednotkovým zosilnením, pomocou ktorých sa sníma veľkosť napätia na superkapacitoroch a v prípade, že napätie presiahne bezpečnú úroveň, ochrana ho obmedzí. Aby mikrokontrolér zbytočne nespotreboval elektrický prúd v prípadoch, keď v superkapacitoroch nie je dostatočné napätie na jeho prevádzku, je v systéme zakomponovaný “Cold Start” obvod tvorený dvoma CMOS chipmi na detekciu veľkosti napätia. Ďalšou časťou je stupeň regulácie výstupnej energie, ktorý je tvorený lineárnym regulátorom (používa sa v prípade, keď je bezdrôtový vysielateľ v tzv. sleep móde a odoberaný prúd je tak malý, že postačuje použitie lineárnej regulácie) a DC-DC step-down regulátorom (používa sa v prípade, keď je bezdrôtový vysielateľ v aktívnom móde a je potrebná vysoká účinnosť prenosu energie). Zaujímavosťou tejto technickej sústavy je aj nízkonapäťový aktuátor, ktorý má na starosti ladenie vibračného generátora. Toto ladenie spočíva v porovnávaní frekvencie vibrácií motora trajektu s frekvenciou, na ktorú je generátor naladený. Vibrácie motora sú snímané analógovým akcelerometrom, signál následne putuje cez filter typu pásmová priepusť. Aby sa minimalizovali fázové rozdiely medzi výstupmi vibračného generátora a akcelerometra (a teda, aby naladenie generátora bolo čo najpresnejšie), je v systéme prítomný aj ďalší band-pass filter, ktorý zase upravuje napäťový výstup generátora. Mozgom celého systému je potom mikrokontrolér EFM32 Gecko od firmy Silicon Labs, ktorý zabezpečuje súčinnosť všetkých prvkov.



Obrázok 4.2: Detailná schéma diagnostického systému monitorujúceho motor trajektu  
 Prevzaté z: [2]

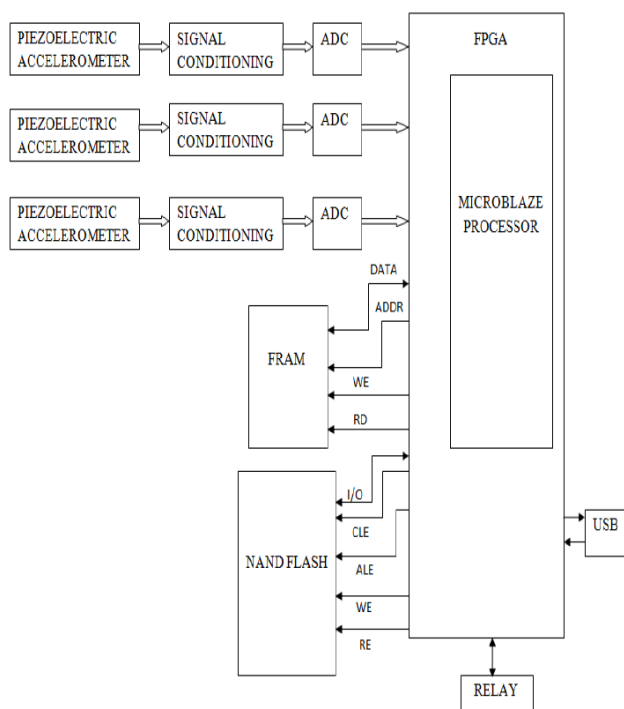
Na obr. 4.3 je znázornený pomerne inovatívny systém, ktorý sa spomína v texte [3]. Tento systém je odlišný od niektorých iných riešení v tom, že dodávanie energie do záťaže (napr. bezdrôtový vysielateľ) závisí od celkového množstva prítomnej energie (“energy-driven”) alebo je riadené dátovými udalosťami (“data-driven”). Systém teda nie je v nepretržitej prevádzke, ale iba vtedy, keď je to nutné, čím sa využitie elektrickej energie veľmi zefektívňuje. Ďalším špecifikom je schopnosť využívať energiu z viacerých okolitých zdrojov súčasne. Pri prenose energie medzi zdrojmi a záťažou existujú dve možnosti – prvou je priame napájanie záťaže z energy harvesting zariadení, pričom (na základe veľkosti napätia krátkodobo uskladneného v kapacitoroch) energia je pred výstupom spracovávaná LDO (“Low-DropOut”) regulátorom a DC-DC regulátorom. Táto možnosť zabezpečuje vysoko účinný prenos energie. Druhou možnosťou je nabíjanie batérie (pre prípad, keď žiadna z okolitých foriem energie nie je pre energy harvesting zariadenia prítomná, resp. keď hladina generovanej energie je príliš nízka na prevádzku systému), ktorá súčasne poskytuje potrebnú energiu záťaži. Jej nevýhodou je však naopak nižšia účinnosť pri prenose energie. O tom, ktorá možnosť je zvolená, rozhoduje asynchrónny digitálny kontrolér. Hlavnými výhodami použitia tohto digitálneho kontroléra je odolnosť voči kolísaniu a voči príliš nízkym hodnotám napájacieho napätia ako aj voči elektromagnetickému rušeniu.



Obrázok 4.3: Bloková schéma autonómneho diagnostického systému s multiple-input/dual-output architektúrou

Prevzaté z: [3]

Veľmi zaujímavé riešenie, aj čo sa týka oblasti aplikácie, je popísané v článku [4]. Ide o systém založený na FPGA (“Field-Programmable Gate Array”) monitorujúci úroveň vibrácií a rázov v podvodnom vozidle v troch osiach súčasne, ktorý má za úlohu kontrolovať stav vozidla a včas detekovať eventuálnu poruchu. Obsahuje piezoelektrické akcelerometre schopné snímať v horizontálnom, vertikálnom a axiálnom smere, ktoré dokážu pracovať v širokom pásme prevádzkových teplôt a ktoré sú vysoko odolné voči veľkým hodnotám snímaných veličín. Má dva módy – real-time mód, kedy sú zaznamenávané okolité signály z akcelerometrov zapisované do NAND flash pamäte, a offline mód, počas ktorého dochádza k prenosu dát z monitorovacieho systému do počítača, kde sú výsledky spracovávané a vyhodnocované. Blokový diagram tohto systému je znázornený na obr. 4.4.



Obrázok 4.4: Blokový diagram monitorovacieho systému pre podvodné vozidlo  
 Prevzaté z: [4]

Blok “Signal Conditioning” zabezpečuje zosilnenie a filtráciu snímaných analógových signálov. Ako A/D prevodník je v tomto systéme použitý vysokorýchlostný 16-bitový AD1606 od firmy Texas Instruments s veľkou presnosťou. MicroBlaze mikroprocesor od firmy Xilinx zabezpečuje zápis dát do FRAM (“Ferroelectric Random-Access Memory”), ktorá okrem iného ukladá aj informácie ohľadom counterov. Následne sa dáta zapisujú do NAND flash pamäte, odkiaľ môžu byť prostredníctvom USB rozhrania uložené do počítača. Vďaka tomu, že na ovládanie systému sa používa FPGA (taktiež od firmy Xilinx), je tento systém programovo flexibilný, veľmi rýchly a spotrebováva veľmi malé množstvo energie.

## 4.2. Komerčné riešenia - datalogery

Táto časť práce sa zameriava na datalogery, ktoré by bolo možné použiť ako finálne all-in-one riešenie pre našu aplikáciu. Na trhu existuje mnoho spoločností, ktoré sa monitorovaním úrovne vibrácií a rázov zaoberajú (z nižšie nespomenutých napr. firmy Newsteo [5], ShockWatch [6], Extech Instruments [7] alebo MadgeTech [8]), tento prehľad však pojednáva len o tých systémoch, ktoré sú schopné pracovať autonómne (tu je zohľadnené hlavne napájanie dobíjateľnými akumuláčnými prvkami z dôvodu ekonomickosti), sú ľahké, majú relatívne malé rozmery a ich konfigurácia a použitie nie sú zbytočne komplikované. Zároveň treba dodať, že tieto systémy sa nedajú, oproti vyššie spomínaným riešeniam z vedeckej oblasti, napájať priamo niektorým z energy harvesting zariadení, a práve preto je výber obmedzený len na systémy napájané akumuláčnými článkami.

Jedným zo šikovných riešení z komerčnej oblasti autonómnych diagnostických systémov sú vibračné datalogery od firmy Midé. Z nášho pohľadu je zaujímavý hlavne typ Slam Stick Lite, ktorý je určený pre menej náročné aplikácie a je aj cenovo dostupnejší na rozdiel od sofistikovanejšieho typu Slam Stick X, ktorý je určený hlavne pre väčšie hodnoty zrýchlenia vibrácií s rozsahmi  $\pm 25$  G,  $\pm 100$  G a  $\pm 500$  G. Slam Stick Lite v sebe spája trojosový akcelerometer schopný zaznamenať zrýchlenie vibrácií v rozsahu  $\pm 16$  G so vzorkovacou frekvenciou 100 Hz – 3.2 kHz a rozlíšením 13 bitov, obvody spracovávajúce signál (tzv. “signal processing”) a nahrávanie dát do internej 16 MB pamäte. To všetko je integrované v malom plastovom puzdre odolnom voči prachu s hmotnosťou 16 gramov a s rozmermi 69x23x9 mm (dĺžka x šírka x výška). Výdrž zabudovanej dobíjateľnej batérie sa pohybuje od 15 minút (pri vzorkovaní frekvenciou 3.2 kHz) do 90 minút (pri vzorkovaní frekvenciou 100 Hz). Životnosť batérie je okolo 2 rokov, batéria sa dobíja prostredníctvom USB portu, ktorý zároveň slúži aj na prenos nameraných dát do počítača, ktoré potom môžu byť vyhodnotené v bezplatnom programe Slam Stick Lab. Užívateľ si môže nakonfigurovať oneskorenie medzi jednotlivými meraniami, dobu trvania merania a úroveň vibrácií, po dosiahnutí ktorej sa meranie spustí. Datalogger Slam Stick Lite je ukázaný na obr. 4.5.



Obrázok 4.5: Datalogger Slam Stick Lite od firmy Midé (vpravo znázornený smer osí merania)

Prevzaté z: P1

Ďalší kompaktný systém ponúka spoločnosť Convergence Instruments, konkrétne modely Vibration Sentry RT64-16g a RT128-16g znázornené na obr. 4.6, ktoré sa líšia iba veľkosťou použitej internej pamäte (64, resp. 128 MB). Tieto modely s rozmermi 76x39x21 mm a hmotnosťou 65 gramov používajú na snímanie rázov a vibrácií trojosový MEMS akcelerometer s rozsahom  $\pm 16$  G a maximálnou vzorkovacou frekvenciou 3.2 kHz. Sú schopné zaznamenávať nielen minimálne, maximálne a priemerné hodnoty zrýchlenia, ale aj minimálnu, maximálnu a priemernú efektívnu hodnotu okolitých vibrácií a taktiež sklon/náklon. Design týchto systémov je čisto digitálny, preto (podľa tvrdenia výrobcu) odpadajú problémy, ktoré môžu vzniknúť pri použití analógových súčiastok. Medzi ich špecifické vlastnosti patrí funkcia umožňujúca sledovať nahraté dáta ešte počas prebiehajúceho záznamu, integrovaná funkcia osciloskopu schopná zobrazíť snímaný signál v reálnom čase a schopnosť samokalibrácie. Sú napájané internou LiPo (“Lithium Polymer”) nabíjateľnou batériou, ktorá sa dobíja prostredníctvom USB rozhrania po pripojení k počítaču. Životnosť batérie je viac ako 300 cyklov nabitia/vybitia, výdrž batérie sa pohybuje v rozpätí od 300 hodín do jedného roka, v závislosti na nastaveniach a móde, v ktorom zariadenie pracuje. Pracovné módy sú nasledujúce – stand-by mód (nízka spotreba elektrickej energie), USB pripojenie (nabíjanie batérie, zariadenie je aktívne), nahrávanie a Auto-Rec mód – systém je v sleep móde, do módu záznamu dát sa prepína iba vtedy, ak zrýchlenie vibrácií presiahne určitú konfigurovateľnú prahovú hodnotu. Celý systém je uložený v ABS (“Acrylonitrile Butadiene Styrene”) puzdre odolnom voči rôznym vplyvom počasia.



Obrázok 4.6: Vibračný datalogger RT128-16g od firmy Convergence Instruments  
Prevzaté z: [9]

Mnoho použiteľných zariadení z oblasti záznamu dát ponúka aj firma MSR Electronics. Vo svojom portfóliu ponúka systémy s rôznymi špecifikami, akými sú napr. široká možnosť výberu použiteľných interných a externých snímačov, vstavané LCD displeje, bezdrôtový prenos dát prostredníctvom technológie Bluetooth Low Energy alebo webová služba MSR SmartCloud pre monitoring dát z ľubovoľnej lokality. Pre nás najzaujímavejší je datalogger s označením MSR165 na obr. 4.7, ktorý má integrovaný vysoko výkonný trojosový akcelerometer s rozlíšením 13 bitov schopný pracovať s rozsahom zrýchlenia vibrácií  $\pm 15$  G alebo  $\pm 200$  G (v závislosti na konfigurácii). Navyše je rozširiteľný o externé snímače teploty, vlhkosti, tlaku vzduchu alebo svetla. Vstavaná pamäť dokáže zaznamenať viac ako 2 milióny nameraných hodnôt, ak by to užívateľovi nestačilo, je možné pamäť rozšíriť pomocou microSD karty s kapacitou 4 GB a viac. Na prenos dát medzi dataloggerom a počítačom slúži USB rozhranie, cez ktoré sa zároveň nabíja aj zabudovaná dobíjateľná 800 mAh LiPo batéria, ktorá umožňuje dosiahnuť dobu snímania až pol roka bez nabitia. Pre dlhšiu dobu snímania bez nutnosti nabitia, resp. výmeny batérie, je možné doplniť systém ďalšími akumuláčnými článkami. Puzdro s rozmermi 72x39x23 mm je vodotesné a vyrobené z anodizovaného hliníka a polykarbonátu. Systém celkovo váži 69 gramov.



Obrázok 4.7: Autonómny monitorovací systém MSR165 od firmy MSR Electronics so slotom pre microSD kartu na rozšírenie pamäte  
Prevzaté z: P3

Trochu rozmernejšie (72x72x22 mm), za to však funkčne a vlastnosťami porovnateľné riešenie so systémami spomenutými vyššie ponúka firma DTS. Jej model TSR Pro zobrazený na obr. 4.8 predstavuje autonómny datalogger zameraný na vibrácie a rázy, ktorý má v sebe zabudovaný trojosový MEMS akcelerometer schopný merať zrýchlenie v nastaviteľných rozsahoch  $\pm 50$  G alebo  $\pm 250$  G. Prevod analógových hodnôt na digitálne zabezpečuje A/D prevodník s rozlíšením 16 bitov a vzorkovacou frekvenciou 1 – 10 kHz. Napájanie je možné pomocou externého zdroja napätia v rozmedzí 6 – 36 V DC alebo pomocou internej LiPo batérie dobíjateľnej cez USB port s výdržou okolo troch mesiacov na jedno nabitie, resp. nedobíjateľnej lítiovej batérie s výdržou šiestich mesiacov (v závislosti od prání zákazníka). Dáta sú zapisované do flash pamäte s kapacitou 1 GB, s každou zaznamenanou hodnotou zrýchlenia sa do pamäte ukladajú aj údaje o čase a teplote. Prenos dát medzi dataloggerom a počítačom je realizovaný prostredníctvom USB rozhrania, na analýzu dát a konfiguráciu nastavení je spolu so zariadením dodávaný špeciálny software TSR Control. Prevádzkové režimy zahŕňajú mód nahrávania s nastaviteľnou dobou snímania, “Circular Buffer” mód, v ktorom je v pamäti aktívna programová slučka, ktorá čaká na software-ový alebo hardware-ový spúšťač, a dynamický mód, kedy sa systém prepína do aktívneho režimu na základe dát z akcelerometra. Samozrejmosťou sú integrované elektronické obvody zabezpečujúce spracovanie signálu. Celý systém váži 237 gramov.



Obrázok 4.8: Vibračný datalogger TSR Pro od firmy DTS  
Prevzaté z: [10]

Pre prehľadnosť a možnosť lepšieho porovnania najpodstatnejších parametrov spomínaných komerčných riešení je uvedená tabuľka 4.1:

	<b>Acceleration Range</b>	<b>Max. Sampling Rate</b>	<b>ADC Resolution</b>	<b>Weight</b>
Slam Stick Lite	$\pm 16$ G	3.2 kHz	13-bit	14 g
Vibration Sentry RTXX-16g	$\pm 16$ G	3.2 kHz	N/A	65 g
MSR165	$\pm 15$ G/ $\pm 200$ G	3.2 kHz	13-bit	69 g
TSR Pro	$\pm 50$ G/ $\pm 250$ G	10 kHz	16-bit	237 g

Tabuľka 4.1: Prehľad najdôležitejších parametrov vybraných komerčných riešení

## 5. Stručný popis použitého vibračného generátora

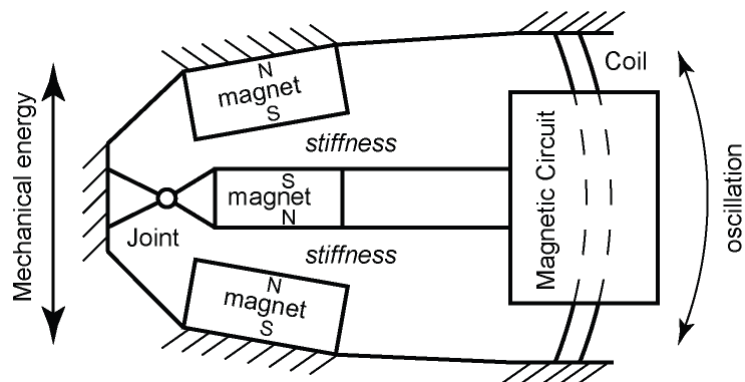
Táto kapitola vychádza z informácií uvedených v [11], [12] a v [13], pričom však nebude zachádzať do detailov, bude sa jednať o všeobecné a stručné vysvetlenie štruktúry vibračného generátora a jeho funkcie, pretože generátor sám o sebe nie je nosnou časťou tejto diplomovej práce.

### 5.1. Štruktúra vibračného generátora a vysvetlenie princípu funkcie

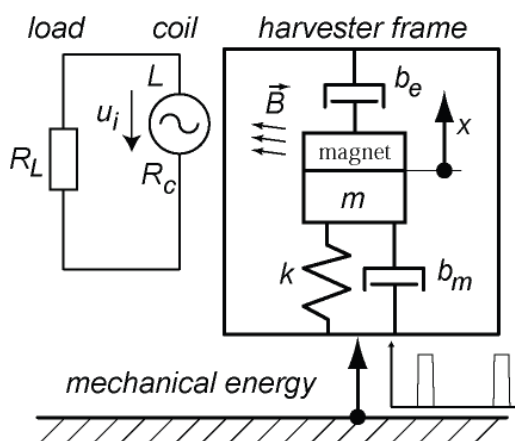
Ako sa uvádza vo vyššie spomínaných zdrojoch, vibračný generátor, ktorý reprezentuje monitorovaný prvok v našom autonómnom diagnostickom systéme, bol vyvinutý na našej fakulte s cieľom využiť ho v leteckých aplikáciách, napr. na napájanie senzorov v okolí rotoru vrtuľníka, neskôr aj v ťažkých priemyselných aplikáciách, kde sú častým javom mechanické rázy. Je špeciálne navrhnutý tak, aby dokázal produkovať dostatočné množstvo energie nielen z mechanických vibrácií, ktoré majú periodický charakter, ale taktiež aj zo spomínaných mechanických rázov, ktorých priebeh je neperiodický (nárazový) a krátky, zato však s pomerne veľkou amplitúdou.

Tento generátor patrí do kategórie elektromagnetických vibračných generátorov, ktoré premieňajú mechanické vibrácie zo svojho okolia na striedavé elektrické napätie, pričom fungujú na princípe Faradayovho zákona elektromagnetickej indukcie, teda na základe zmeny magnetického toku v magnetickom poli indukujú vo vodiči (v našom prípade cievke) uloženom v tomto magnetickom poli elektrické napätie. Princíp funkcie je pochopiteľný z obr. 5.1. Najpodstatnejšími časťami generátora sú rám, rezonančný mechanizmus a pevne zafixovaná cievka. Rám tvorí základňu generátora, cez ktorú sú prenášané vibrácie z okolia na rezonančný mechanizmus. Rezonančný mechanizmus reprezentuje páka s pólovými nastavcami na jej konci, kde sú pripevnené permanentné magnety. Ďalší pár magnetov, ktorý je súčasťou rezonančného mechanizmu, je pripevnený na ráme. Na ňom je takisto upevnená aj samonosná cievka, v ktorej sa pri pohybe rezonančného mechanizmu (a teda pri zmene magnetického poľa prechádzajúceho touto cievkou - vodičom) pri budení mechanickými vibráciami na základe Faradayovho zákona elektromagnetickej indukcie indukuje striedavé napätie. Všeobecná schéma takéhoto elektromagnetického vibračného generátora je znázornená na obr. 5.2, kde

$m$	hmotnosť pohybujúcej sa časti generátora, [kg]
$b_m$	mechanické tlmenie spôsobené trecími silami medzi pohyblivou a nepohyblivou časťou generátora, [N.s.m <sup>-1</sup> ]
$b_e$	elektromagnetické tlmenie spôsobené disipatívnymi silami pri prechode prúdu cievkou a závislé na veľkosti tohto prúdu, [N.s.m <sup>-1</sup> ]
$k$	celková tuhosť sústavy, [N.m <sup>-1</sup> ]
$x$	výchylka rezonančného mechanizmu, [rad]
$B$	magnetická indukcia, [T]
$L$	indukčnosť cievky, [H]
$u_i$	indukované napätie na cievke, [V]
$R_C$	odpor cievky, [Ω]
$R_L$	odpor záťaže, [Ω]

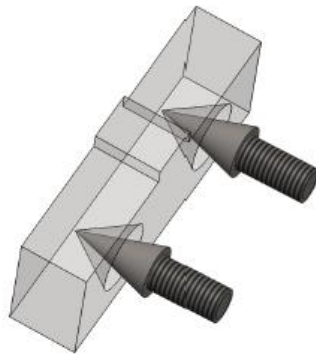


Obrázok 5.1: Nákres rezonančného mechanizmu znázorňujúci princíp funkcie vibračného generátora  
Prevzaté z: [11]



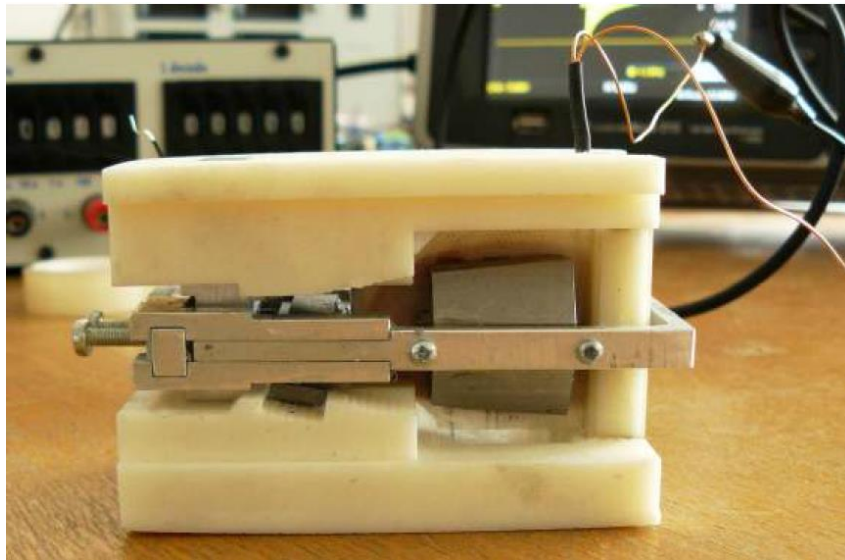
Obrázok 5.2: Všeobecná schéma elektromagnetického vibračného generátora  
Prevzaté z: [11]

To, čím sa tento generátor líši od ostatných technických riešení, je spôsob spojenia pevného rámu a páky rezonančného mechanizmu – na toto spojenie sú použité dva oceľové kužeľovité hroty upevnené na páke, ktoré po spojení rámu a páky zapadnú do jamôčiek, ktoré sa nachádzajú v oceľovej vložke rámu – obr. 5.3. Výhodou oproti iným riešeniam je veľmi malé mechanické trenie.



Obrázok 5.3: Model ocelevej vložky rámu a dvoch ocelových kužeľovitých hrotov reprezentujúcich spojenie medzi rámom a pákou rezonančného mechanizmu  
Prevzaté z: [13]

Použitý vibračný generátor je znázornený na obr. 5.4. Rozmery generátora sú 82x30x40 mm (dĺžka x šírka x výška) pri hmotnosti 125 g. Rezonančná frekvencia, t.j. frekvencia, na ktorú je generátor naladený a pri ktorej poskytuje pri buzení vibráciami s rovnakou frekvenciou najvyššie hodnoty generovanej energie, je približne 17 Hz.



Obrázok 5.4: Elektromagnetický vibračný generátor VUT v Brne použitý na diagnostiku (vľavo je možné vidieť hroty použité na spojenie rámu a páky rezonančného mechanizmu)  
Prevzaté z: [12]

Pre predstavu, v akých oblastiach sa pohybujú generované hodnoty elektrického napätia a výkonu pri rôznych hodnotách zrýchlenia budiacich vibrácií a použitej záťaže, slúži nižšie uvedená tabuľka 5.1 (platí pre periodický priebeh vibrácií):

Vibration level	Output Power RMS [mW]	Output Voltage RMS [V]	Optimal load [k $\Omega$ ]
0.1 G	7.7	5.2	3.5
0.2 G	16.67	5	1.5
0.3 G	23	4.8	1
0.4 G	31	5	800
0.5 G	35	5	700

Tabuľka 5.1: Hodnoty generovaného elektrického výkonu a napätia v závislosti od budiacich vibrácií a použitej záťaže

Prevzaté z: [11]

## 6. Power management

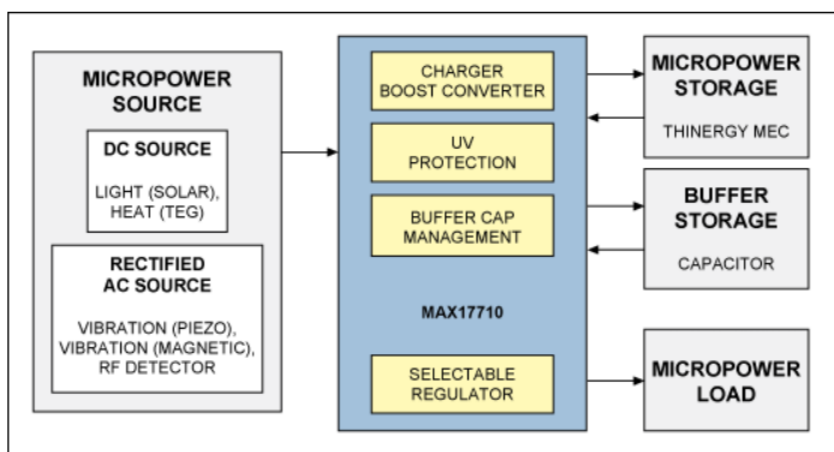
Elektronika označená slovným spojením “Power management” zohráva v autonómnych diagnostických systémoch veľmi dôležitú úlohu, pretože – ako už sám názov napovedá – zabezpečuje, aby bola elektrická energia dodávaná zdrojom využitá v napájanom zariadení čo najefektívnejšie a nevznikali pri prevádzke takéhoto zariadenia zbytočné energetické straty. Väčšinou sa jedná o elektroniku, ktorá má za úlohu reguláciu a monitorovanie úrovni jednosmerného (ak je súčasťou integrovaného obvodu usmerňovač, tak aj striedavého) napätia, veľmi často sú jej súčasťou aj prvky, ktoré majú na starosti správu energie v akumuláčnych článkoch, ktoré sú v elektronických systémoch určených na diagnostiku často využívané.

### 6.1. Výber vhodnej power management elektroniky

Celkovým prehľadom používaných systémov, vysvetlením princípov ich funkcie ako aj rešeršou dostupných riešení a finálnym výberom vhodnej power management elektroniky pre iný vibračný generátor, taktiež vyvinutý na VUT v Brne, sa zaoberala práca [14], ktorá čerpala hlavne z informácií a poznatkov uvedených v [15] a [16]. Keďže táto práca bola zameraná špeciálne na power management a zaoberala sa ním do hĺbky a keďže poznatky v nej uvedené sú všeobecne aplikovateľné na oblasť energy harvesting, budeme pri výbere power management riešenia vhodného pre aplikáciu v našom autonómnom diagnostickom systéme vychádzať z nej.

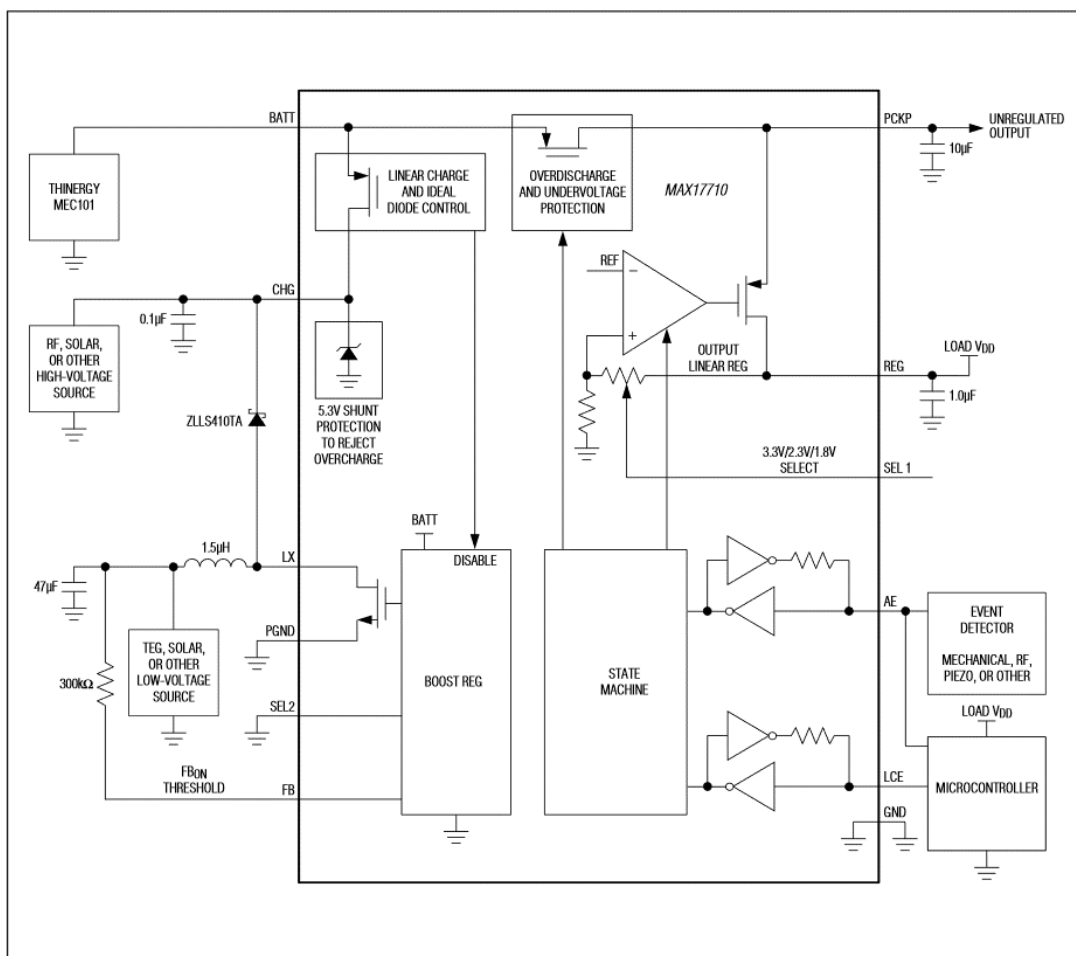
#### 6.1.1. Maxim Integrated MAX17710

Jedným z navrhovaných riešení pre vibračný generátor v práci [14] bol integrovaný obvod MAX17710 od firmy Maxim Integrated, ktorý bol následne našou fakultou zakúpený a úspešne otestovaný aj na vibračnom generátore spomínanom v kapitole 5. Na obr. 6.1 je znázornený blokový diagram tohto power management systému, ktorý ukazuje možnosti jeho použitia.



Obrázok 6.1: Schéma znázorňujúca možnosti využitia power management riešenia od firmy Maxim Integrated  
Prevzaté z: [17]

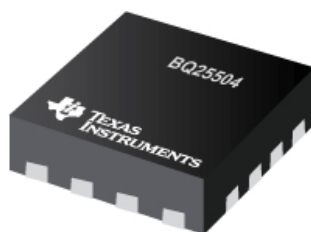
Tento integrovaný obvod s rozmermi 3x3x0.5 mm (dĺžka x šírka x výška) a UTDFN puzdrom ponúka kompletne power management riešenie špeciálne zamerané na správu energie generovanej energy harvesting zariadeniami. Chip dokáže pracovať so zdrojmi energie s výstupným výkonom 1  $\mu$ W až 100 mW. Blokový diagram jeho funkčných prvkov je znázornený na obr. 6.2. Základom je boost regulátor, ktorý dokáže zvýšiť generované napätie od úrovne 0.75 V, a lineárny regulátor, ktorý má za úlohu stabilizovať výstupné napätie a chrániť akumulačný prvok (v prípade jeho použitia) vstavanou ochranou pred preťažením a podpäťm. Na výstupe navyše obsahuje ďalší lineárny LDO (“Low-DropOut”) regulátor, ktorý reguluje výstupné napätie na užívateľom nastaviteľné hodnoty 3.3, 2.3 alebo 1.8 V a môže operovať v móde vysokého alebo nízkeho výkonu, čím sa dá kontrolovať odčerpávanie energie z použitého akumulačného článku.



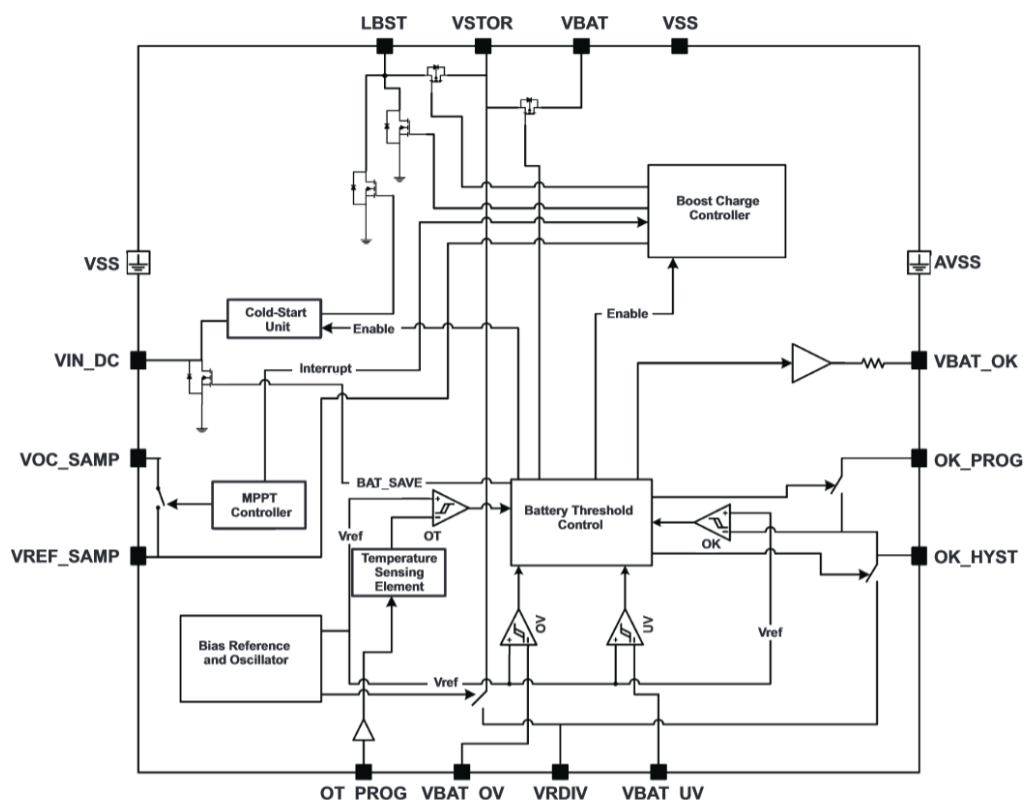
Obrázok 6.2: Blokový diagram funkčných prvkov chipu MAX17710  
Prevzaté z: P5

### 6.1.2. Texas Instruments BQ25504

Ďalšou z použiteľných možností je power management systém BQ25504 od firmy Texas Instruments, ktorý je znázornený na obr. 6.3 a ktorým naša fakulta taktiež disponuje. Blokový diagram znázorňujúci jeho súčasti a princíp funkcie je zobrazený na obr. 6.4. Tento systém je založený na DC-DC boost regulátore s vysokou účinnosťou, ktorému na rozbehnutie jeho funkcie stačí napätie 0.33 V a po rozbehu potom dokáže ďalej pracovať aj s veľmi nízkym generovaným napätím (až 80 mV). Špeciálnou súčasťou tohto systému je aj funkcia MPPT ("Maximum Power Point Tracking"), ktorá prispôsobuje hodnotu vstupnej impedancie pre zabezpečenie optimálneho prenosu energie medzi energy harvesting zariadením a týmto chipom. Taktiež sú v ňom zabudované ochrany proti podpätiu, prepätiu a prehriatiu (chip obsahuje vstavaný teplotný snímač) a systém správy energie v pripojených akumuláčnych prvkoch. To všetko sa nachádza v puzdre QFN s rozmermi 3x3x1 mm.



Obrázok 6.3: Power management integrovaný obvod BQ25504 od firmy Texas Instruments  
Prevzaté z: [18]



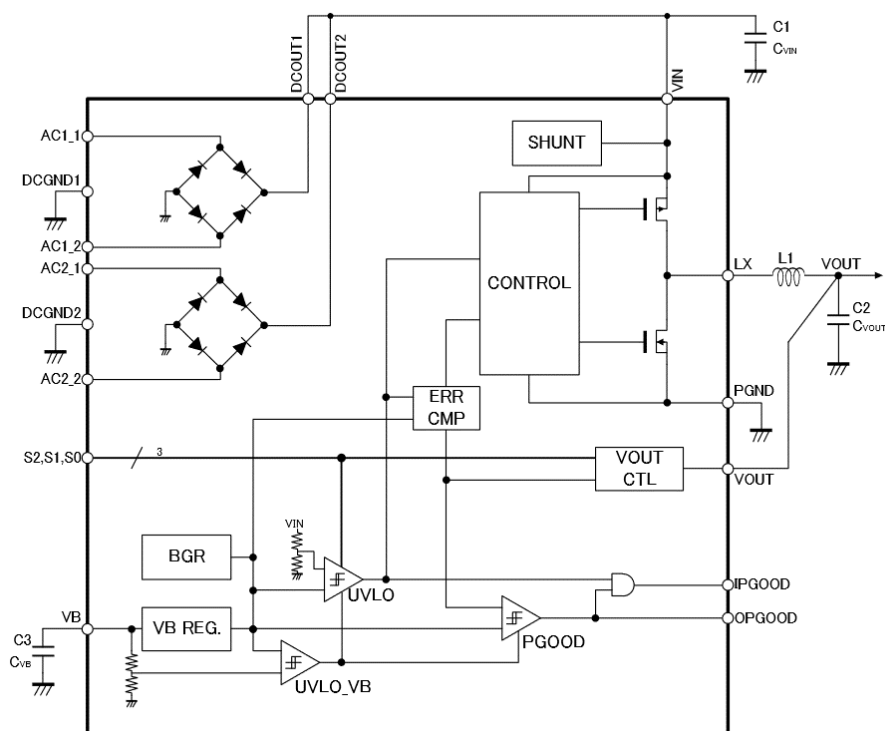
Obrázok 6.4: Blokový diagram funkčných prvkov chipu BQ25504 od firmy Texas Instruments  
Prevzaté z: P6

### 6.1.3. Spansion MB39C811

Zaujímavým riešením je aj power management chip MB39C811 od firmy Spansion na obr. 6.5 s rozmermi 6x6x0.85 mm a QFN puzdrom, ktorý je schopný spracovávať vstup z dvoch energy harvesting zdrojov zároveň. Dokáže operovať v rozsahu vstupných napätí 2.6 – 23 V, poskytuje 8 diskretné nastaviteľných hodnôt výstupného napätia v rozpätí 1.5 až 5 V a ako regulačný prvok používa DC-DC buck (step-down) regulátor. Navyše obsahuje UVLO (“Under Voltage LockOut”) ochranu (chráni integrovaný obvod pri prechodových javoch alebo náhlom poklese vstupného napätia), prepäťovú a nadprúdovú ochranu a špeciálnou vlastnosťou sú dva celovlnové mostíkové usmerňovače pre usmernenie napätia z AC na DC. Obr. 6.6 znázorňuje funkčnú štruktúru tohto chipu.



Obrázok 6.5: Power management integrovaný obvod MB39C811 od firmy Spansion  
Prevzaté z: [19]



Obrázok 6.6: Blokový diagram funkčných prvkov chipu MB39C811 od firmy Spansion  
Prevzaté z: P7

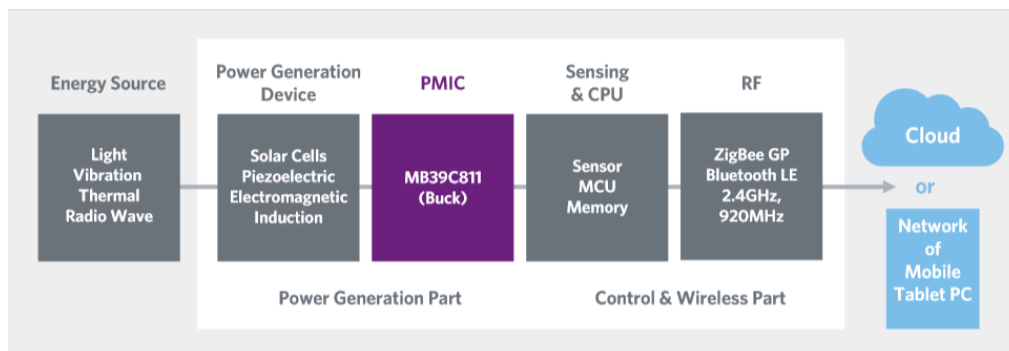


## 7. Vlastný návrh autonómneho diagnostického systému

Pri dizajne nášho diagnostického systému - dataloggeru je dôležité, aby bolo navrhované riešenie čo najjednoduchšie, spoľahlivo funkčné, teda aby pri meraní konkrétnych fyzikálnych veličín poskytovalo vierohodné a čo najmenej skreslené výsledky, a aby po pripojení na vibračný generátor spôsobovalo čo najmenšie straty pri prechode elektrickej energie, teda aby čo najmenej ovplyvňovalo monitorovanú sústavu. Pri návrhu sme čerpali jednak z myšlienok uvedených v kapitole 4, jednak sme využili znalosti nadobudnuté v priebehu štúdia na VUT v Brne.

### 7.1. Štruktúra energy harvesting systému

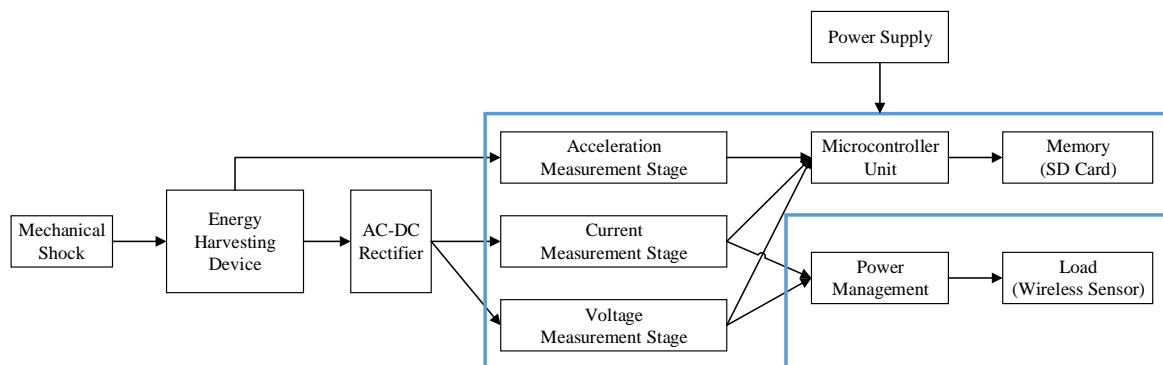
Všeobecná schéma energy harvesting systému je znázornená na obr. 7.1. Základom sú okolité formy energie (slnečná energia, teplo, vibrácie, rádiové vlny), ktoré sú premieňané vybraným energy harvesting zariadením (solárny článok, termoelektrický generátor, vibračný generátor) na elektrickú energiu. Ak je to nutné, je energia (elektrické napätie, prúd) usmernená a následne upravená a spravovaná power management systémom. Takáto spracovaná energia je potom využitá na napájanie rôznych senzorov (ktorých dáta sa potom zvyčajne ukladajú pomocou mikrokontroléra do jeho pamäte alebo na externé pamäťové médium) a bezdrôtové posielanie informácií do počítača alebo iných konečných zariadení, ktoré prijaté dáta analyzujú a vyhodnocujú.



Obrázok 7.1: Bloková schéma všeobecného energy harvesting reťazca (obrázok pochádza od firmy Spansion, preto je ako power management chip uvedený konkrétny výrobok od tejto firmy)

Prevzaté z: P7

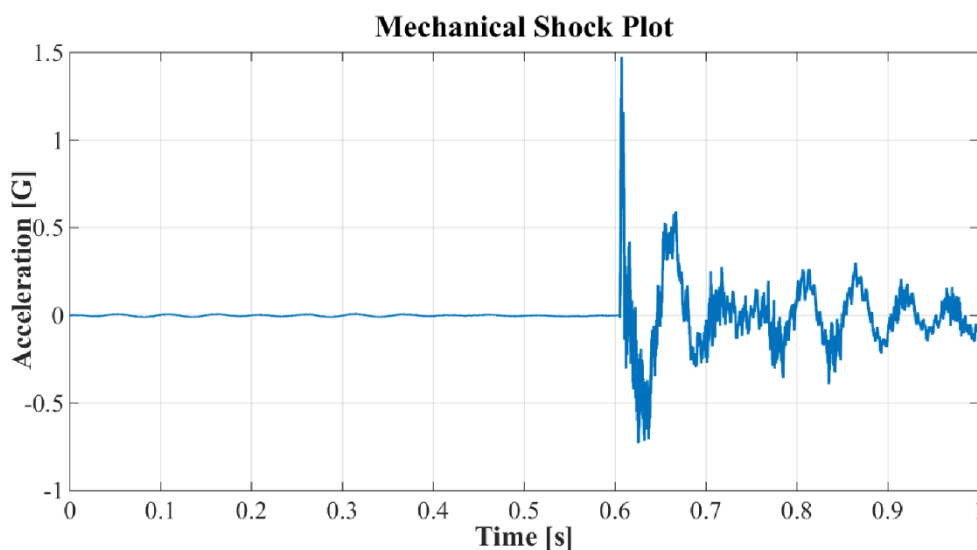
Náš konkrétny energy harvesting systém sa skladá z častí zobrazených v blokovom diagrame na obr. 7.2, pričom jeho súčasťou je aj navrhovaný autonómny diagnostický systém – datalogger. Každý samostatný blok si ďalej bližšie popíšeme.



Obrázok 7.2: Blokový diagram energy harvesting systému znázorňujúci jeho jednotlivé funkčné prvky vrátane navrhovaného autonómneho diagnostického systému (vyznačený modrou čiarou)

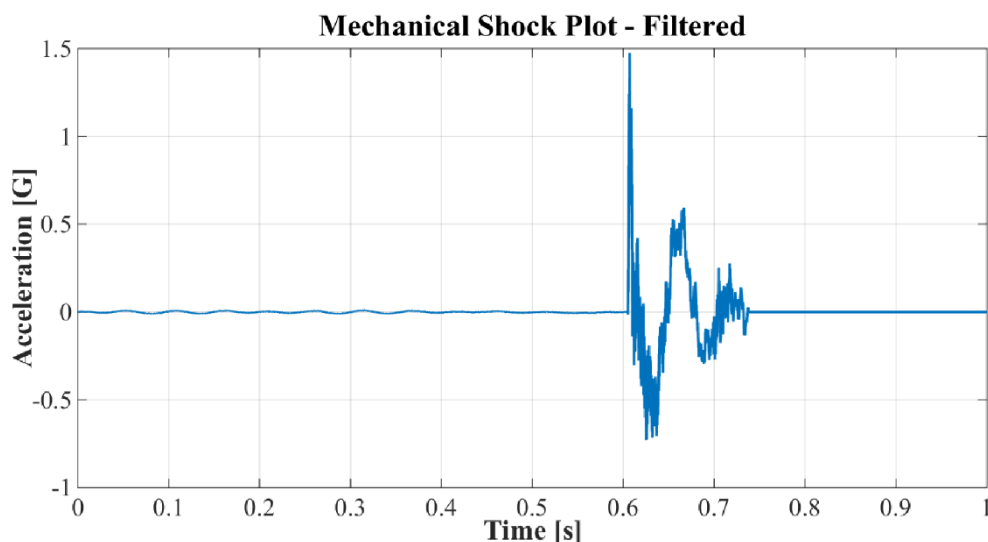
### 7.1.1. Budenie vibračného generátora

Javom, ktorý budí elektromagnetický vibračný generátor v našej aplikácii, sú mechanické rázy (blok “Mechanical Shock”). Všeobecne sa dá povedať, že ráz je aplikácia mechanických síl na určitú sústavu, ktoré pôsobia na túto sústavu v krátkom časovom intervale (t.j. jedná sa o prechodový jav), ale s pomerne veľkou amplitúdou. Vďaka ich krátkemu trvaniu sa teda podľa [1] dajú považovať za impulzy obsahujúce vo svojom frekvenčnom spektre nekonečné množstvo frekvencií, pričom väčšina týchto frekvencií má vysokú hodnotu. Ráz je ako veličina definovaný smerom a veľkosťou v jednotkách gravitačného zrýchlenia G a charakterizovaný amplitúdou, trvaním a tvarom jeho priebehu. Typický priebeh rázu, ktorý sme namerali v laboratóriu VUT, je znázornený na obr. 7.3. Aplikácie, v ktorých sa rázy podrobne analyzujú, zahŕňajú napr. testovanie účinnosti tlmičov v dopravných prostriedkoch, testovanie odolnosti rôznych druhov ochranných prilieb alebo testovanie odolnosti budov a ďalších stavebných štruktúr voči zemetraseniam a výbuchom.



Obrázok 7.3: Typický priebeh mechanického rázu

Keďže sa zaujímate iba o počiatočnú fázu rázu, keď dosahuje amplitúda zrýchlenia najväčšie hodnoty a vibračný generátor teda môže produkovať najviac elektrickej energie, zvyšnú časť priebehu vyfiltrujeme na nulové hodnoty. Graf takto upraveného rázu je vyobrazený na obr. 7.4.



Obrázok 7.4: Priebeh vyfiltrovaného mechanického rázu z obr. 7.3

Na utvorenie si obrazu, v akých hodnotách sa pohybuje zrýchlenie vibrácií u rôznych typov vozidiel, slúži tabuľka 7.1. Od nej sa bude odvíjať aj následný výber vhodného akcelerometra pre našu aplikáciu.

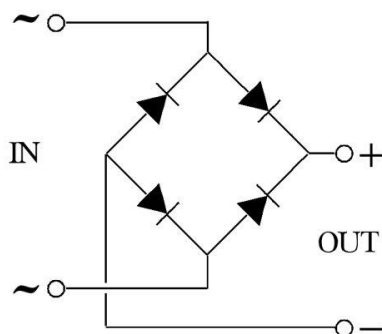
<b>Vehicle suspension “ride”</b>	<b>G-Rating</b>
Passenger car – smooth roads	1
Vans – smooth or rough roads	6
Truck/trailer – smooth roads	6
Truck/trailer – rough roads	15
Off-road vehicles	15
Rail freight cars	10

Tabuľka 7.1: Hodnoty zrýchlenia vibrácií/rázov pôsobiacich na záves kolies pre rôzne typy vozidiel a rôzne povrchy  
Prevzaté z: [21]

### 7.1.2. Vibračný generátor a usmernenie generovaného striedavého napätia

Vibračným generátorom (blok “Energy Harvesting Device”), ktorý slúži v energy harvesting aplikáciách ako nevyčerpatel’ný zdroj energie na napájanie rozličných elektronických systémov bez nutnosti použitia kabeláže alebo primárnych a sekundárnych batérií, sa zaoberá kapitola 5 tejto práce, preto sa táto časť obmedzí len na konštatovanie, že v našej aplikácii nie je vibračný generátor chápaný primárne ako napájací zdroj (aj keď súčasťou navrhovaného riešenia je jeho testovanie s pripojenou záťažou), ale skôr reprezentuje zariadenie, ktoré bude monitorované, t.j. budú sledované hodnoty elektrických fyzikálnych veličín, ktoré vygeneruje (na napájanie diagnostickej časti navrhovaného elektrického obvodu teda nebude použitý generátor, ale nejaký iný zdroj energie, vid’ časť 7.1.5.).

Ako je spomenuté v [14] a v [22], elektromagnetický vibračný generátor generuje z okolitých vibrácií striedavé elektrické napätie, ktoré však nie je vhodné na napájanie bežnej priemyselnej elektroniky (napr. bezdrôtových senzorov). Preto je nutné použiť usmerňovač striedavého napätia (blok “AC-DC Rectifier”), ktorý bude v našom prípade realizovaný Graetzovým mostíkom. Všeobecná schéma tohto AC-DC usmerňovača je znázornená na obr. 7.5.

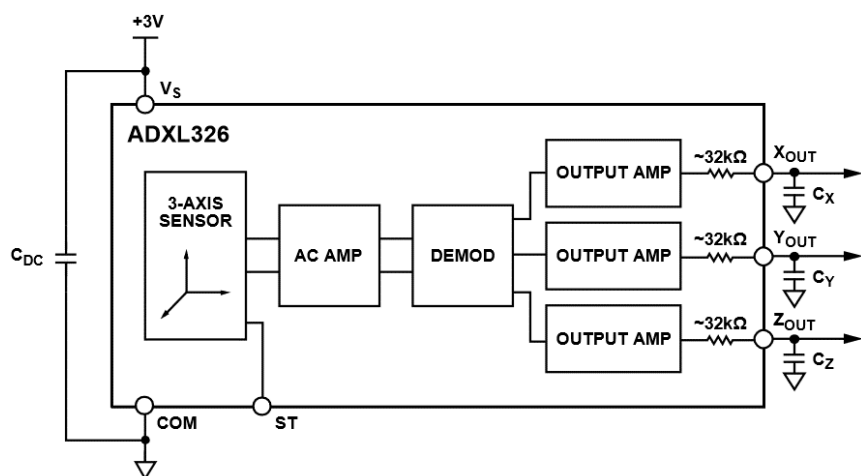


Obrázok 7.5: Všeobecná schéma Graetzovho usmerňovača  
Prevzaté z: [23]

Keďže pri prechode prúdu usmerňovačom vznikajú na diódach úbytky napätia a určitá časť vygenerovaného výkonu sa preto stráca, je nutné zvoliť pre mostík diódy s čo najnižším úbytkom napätia v priepustnom smere. Dobrou voľbou sú Schottkyho diódy, u ktorých sa hodnoty napätia pohybujú v rozmedzí 0.15 – 0.45 V. Pre našu aplikáciu preto na základe údajov z datasheetu (príloha P9 diplomovej práce) vyberáme 4 diódy s označením 1N5817 s priepustným napätím 0.25 V pri prúde 10 mA a teplote 25 °C. Aby bolo jednosmerné napätie na výstupe usmerňovača vyhladené, pridáva sa na výstup elektrolytický filtračný kondenzátor. Pri výbere jeho veľkosti sa musí zvoliť rozumný kompromis medzi zvlnením výstupného napätia a dynamikou celej sústavy, preto je navrhnutá počiatočná hodnota 10  $\mu\text{F}$ , aby sme dosiahli pre optimálnu záťaž generátora podľa článku [24] (rádovo v desiatkach  $\text{k}\Omega$ ) malú časovú konštantu. Pri návrhu napomáha aj znalosť faktu, že pre konštantné budenie vibráciami bol už pre generátor prakticky použitý filtračný kondenzátor s veľkosťou 22  $\mu\text{F}$ .

### 7.1.3. Meranie požadovaných fyzikálnych veličín

Jednou z fyzikálnych veličín, ktoré bude mať za úlohu náš autonómny monitorovací systém merať, je zrýchlenie budiacich vibrácií (blok “Acceleration Measurement Stage”). Keďže aplikáciou, na ktorú sa v tejto práci zameriavame a v ktorej bude tento systém využitý, bude snímanie rázov pri cestovaní určitým druhom dopravného prostriedku, budeme pri výbere akcelerometra vychádzať z vyššie uvedenej tabuľky 7.1. Z tej je evidentné, že potrebujeme snímač schopný merať zrýchlenie vibrácií približne v rozsahu  $\pm 15$  G. Navyše, pre zachovanie čo najväčšej jednoduchosti systému a pre zjednodušenie prepojenia akcelerometra s mikrokontrolérom, budeme požadovať snímač s analógovým výstupom, ktorý sa dá veľmi ľahko priviesť na niektorý z analógových vstupov mikrokontroléru. Na základe týchto požiadaviek volíme akcelerometer ADXL326 od firmy Analog Devices. Jedná sa o trojosový snímač s meracím rozsahom  $\pm 16$  G v puzdre LFCSP\_LQ s rozmermi  $4 \times 4 \times 1.45$  mm, ktorý môže byť napájaný napätím v rozpätí 1.8 – 3.6 V a typická spotreba prúdu pri prevádzke sa pohybuje okolo hodnoty  $350 \mu\text{A}$ . Navyše je možné na vstup pridať kondenzátor s typickou hodnotou 100 nF (vhodný pre väčšinu aplikácií) pre potlačenie šumu medzi akcelerometrom a napájacím zdrojom a na výstup pridať kondenzátory, ktoré spolu so vstavanými rezistormi vytvoria filtre typu dolná priepusť a užívateľ si tak môže vhodne zvolenou hodnotou kapacity kondenzátora nastaviť medznú frekvenciu filtra a tým zlepšiť rozlíšenie a potlačiť šum. Keďže náš generátor dokáže byť naladený na maximálnu frekvenciu 50 Hz, pričom šírka pásma, ktorá potom obsiahne v podstate všetky možné hodnoty rázov, je v takom prípade 300 Hz, zvolíme podľa datasheetu na výstupe kondenzátory (pre každú os snímania) s veľkosťou 10 nF, ktoré zabezpečia medznú frekvenciu 500 Hz. Blokový diagram tohto akcelerometra je zobrazený na obr. 7.6.



Obrázok 7.6: Blokový diagram akcelerometra ADXL326 od firmy Analog Devices  
Prevzaté z: P10

Ďalšími veličinami, ktoré budú zaznamenávané, sú elektrické napätie a elektrický prúd (bloky “Current Measurement Stage” a “Voltage Measurement Stage”). Pri výbere spôsobu ich snímania sa opäť budeme riadiť zachovaním jednoduchosti a nenáročnosti celého systému. Preto, na základe informácií uvedených v [25], použijeme na snímanie elektrického prúdu dodávaného generátorom bočník a na snímanie elektrického napätia využijeme klasický odporový delič. Bočník bude realizovaný rezistorom s malou hodnotou odporu, ku ktorému bude diferenciálne zapojený napäťový zosilovač, ktorý bude na základe prepočtu poskytovať na výstupe napätie priamo úmerné prúdu, ktorý bude pretekať cez bočník. Delič napätia bude tvorený dvojicou rezistorov, ktorých hodnoty (podobne ako hodnota rezistora

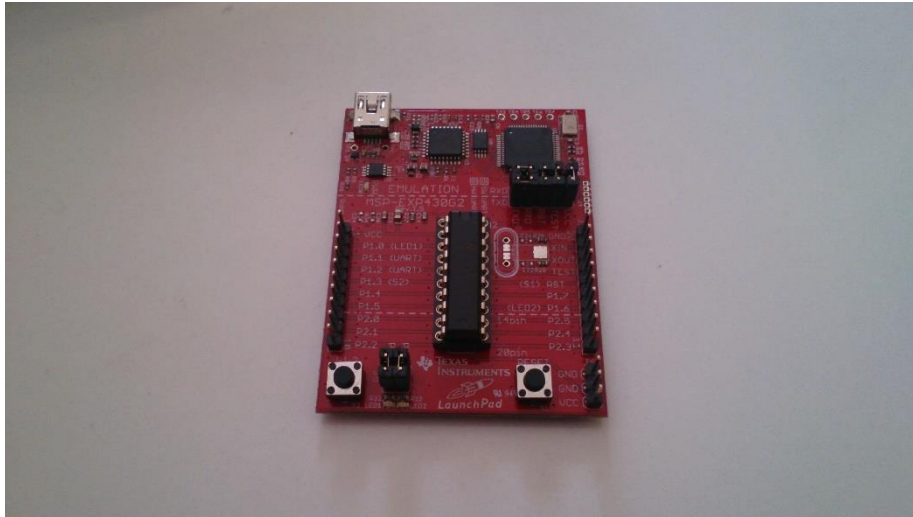
pre bočník) budú navrhnuté na základe simulácie modelu vibračného generátora v prostredí Simulink v kapitole 7.2, na výstupe bude navyše pripojený keramický filtračný kondenzátor na potlačenie potenciálnych nebezpečných špičiek výstupného napätia.

#### 7.1.4. Mikrokontrolér a pamäť

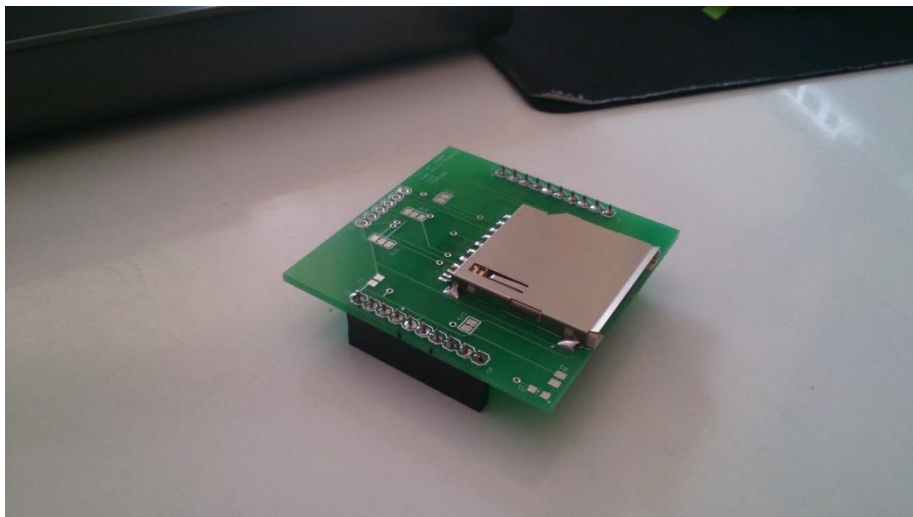
Mozgom celého diagnostického systému je mikrokontrolér M430G2553 od firmy Texas Instruments (blok “Microcontroller Unit”), ktorého základné parametre sú uvedené v tabuľke 7.2. Tento mikrokontrolér je súčasťou vývojového kitu MSP430 Value Line Launchpad znázorneného na obr. 7.7. Jeho hlavnou úlohou je zaznamenávať namerané hodnoty zrýchlenia budiacich vibrácií, elektrického napätia a prúdu a ukladať ich na pamäťové médium (blok “Memory (SD Card)”), v tomto prípade na microSDHC kartu s kapacitou 4 GB od firmy Kingston. Na to, aby sme na zápis dát mohli vôbec túto pamäťovú kartu použiť, potrebujeme pripojiť k vývojovému kitu SD Card Booster Pack zobrazený na obr. 7.8, ktorý umožňuje použitie SD karty ako externej pamäte pre mikrokontrolér. Navyše potrebujeme pre pamäťovú kartu aj adaptér (ktorý je však dodávaný s kartou v balení), pretože SD Card Booster Pack dokáže pracovať len s kartami vo formáte SD.

<b>Parameters</b>	
CPU Frequency	16 MHz
Non-volatile Memory	16 kB
SRAM	0.5 kB
GPIO	24
I2C; SPI; UART	Yes/1; Yes/1; Yes/1
ADC	8 channels, 10-bit
Comparators	8
Timers	2, 16-bit
Supply-Voltage Range	1.8 – 3.6 V
Active Power	330 $\mu$ A/MHz
Standby Power	0.7 $\mu$ A
Wakeup Time	1.5 $\mu$ s
Additional Features	Watchdog, Temp Sensor, Brown Out Reset, IrDA

Tabuľka 7.2: Základné parametre mikrokontroléru M430G2553  
Prevzaté z: [26]

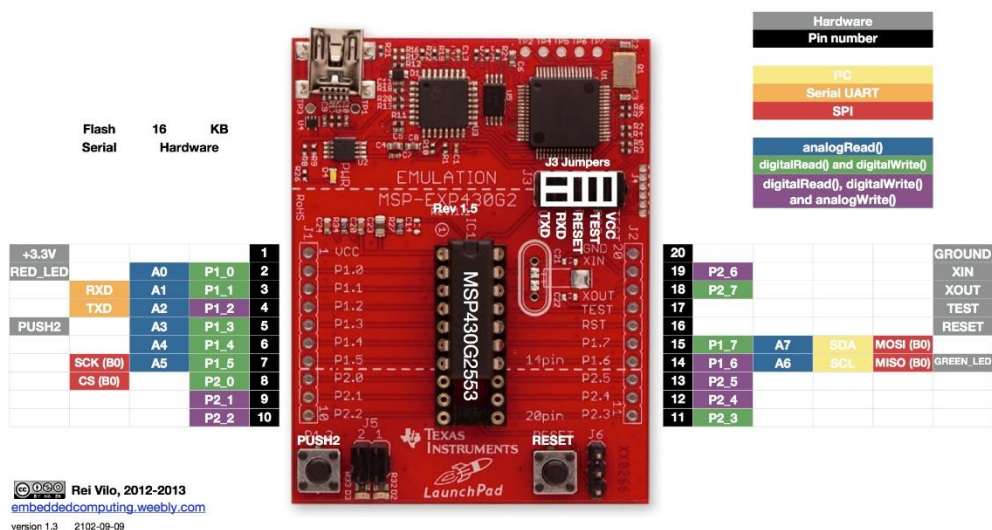


Obrázok 7.7: Vývojový kit MSP430 Value Line Launchpad s mikrokontrolérom M430G2553 od firmy Texas Instruments



Obrázok 7.8: SD Card Booster Pack vytvorený komunitou [www.43oh.com](http://www.43oh.com)

Na to, aby sme vedeli mikrokontrolér ľahko a hlavne funkčne prepojiť s ostatnými časťami navrhovaného elektronického obvodu, potrebujeme poznať rozloženie pinov na vývojovom kite. Pre tento účel nám posluží obr. 7.9, ktorý uvádza, na čo sa jednotlivé piny mikrokontroléru dajú použiť. Z neho budeme pri zapájaní mikrokontroléru do autonómneho diagnostického systému vychádzať. Na snímanie zrýchlenia budiacich rázov v osiach X, Y, Z využijeme analógové vstupy A0, A1 a A2 (piny 2, 3, 4), na snímanie napätia použijeme analógový vstup A3 (pin 5) a na snímanie napätia z bočníka analógový vstup A4 (pin 6). Napájanie bude privedené na piny 1 (+3.3 V) a 20 (GROUND). Keďže pripojenie booster pack-u k doske mikrokontroléra vyžaduje použitie všetkých pinov, na pripojenie požadovaných analógových vstupov bude musieť byť medzi tieto dve dosky vložená ešte medzidoska s vývodmi na pohodlné privedenie signálu.



Obrázok 7.9: Rozloženie pinov mikrokontroléru M430G2553 na vývojovom kite s možnosťami použitia  
Prevzaté z: [27]

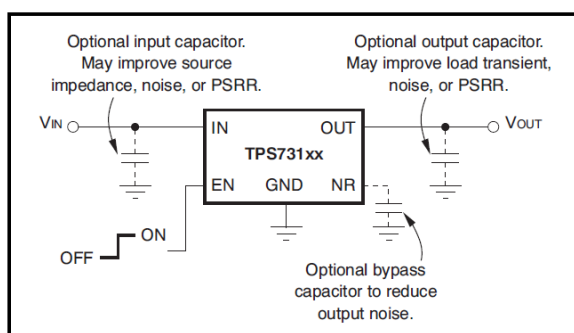
### 7.1.5. Napájanie, power management a výber snímača pre otestovanie funkcie

Pre navrhovaný obvod existuje na trhu mnoho druhov napájacích zdrojov energie (blok “Power Supply”), ktoré by mohli byť na napájanie niektorých jeho prvkov (mikrokontrolér, akcelerometer, napäťový zosilovač pre bočník) použité. Ich prehľadom sa zaoberá bakalárska práca [14], v ktorej sa uvádza okrem priebehov napätia pri nabíjaní a vybíjaní pre jednotlivé druhy aj porovnanie primárnych zdrojov (nedobíjateľných), sekundárnych zdrojov (dobíjateľných) a špeciálnych druhov akumuláčnych prvkov (superkapacitorov, batérií s tenkým filmom) z hľadiska hmotnostnej a objemovej hustoty energie. Na základe tohto prehľadu vyberáme ako najvhodnejšie riešenie lítiové sekundárne batérie, konkrétne lítium-polymérový akumulátor, ktorý vychádza z lítium-iónového článku (ten patrí v dnešnej dobe medzi komerčne najpredávanejšie zdroje energie). Medzi jeho výhody patria najvyššia hmotnostná a objemová hustota energie, vysoký počet nabíjacích cyklov (rádovo v tisícach), odolnosť voči pamäťovému efektu, veľmi nízka miera samovybijania a oproti iným druhom akumulátorov vyššie menovité napätie (okolo 3.7 V). Nevýhodami sú postupná strata kapacity článku aj v prípade, keď nie je používaný, možnosť výbuchu alebo zhorenia pri vysokých teplotách, vyššia cena a navyše sa neodporúča tento typ akumulátorov úplne vybíjať, pretože môže dôjsť k ich trvalému poškodeniu. V našom systéme bude tento zdroj energie reprezentovaný článkom od firmy Bel (obr. 7.10) s menovitým napätím 3.7 V, kapacitou 350 mAh, váhou 10 gramov a rozmermi 38x20x8 mm.



Obrázok 7.10: Líthium-polymérový akumulátor od firmy Bel  
Prevzaté z: [28]

Ďalšou dôležitou súčasťou bloku “Power Supply” je napäťový regulátor, ktorý má na starosti upravenie hodnoty elektrického napätia napájacieho akumulátora na také hodnoty, ktoré sú vhodné pre prevádzku mikrokontroléra a ostatných napájaných prvkov obvodu a ktoré zaručia, že nedôjde k poškodeniu týchto zariadení. V datasheetoch pre mikrokontrolér M430G2553 a akcelerometer ADXL326 sa uvádza, že na svoju bezproblémovú činnosť vyžadujú napätie v rozsahu 1.8 – 3.6 V, pričom ideálne hodnoty napájacieho napätia sú 3.3 V pre mikrokontrolér, resp. 3 V pre akcelerometer. Na základe týchto informácií preto zaradíme do navrhovaného obvodu za líthium-polymérový článok LDO regulátor TPS73133 od firmy Texas Instruments, ktorý dokáže regulovať vstupné napätie v rozmedzí 3.3 – 5.5 V na konštantné výstupné napätie 3.3 V, v kľudovom stave odoberá menej ako 1  $\mu\text{A}$  a hodnota jeho dropout napätia je 30 mV. Navyše má v sebe zabudovanú aj nadprúdovú a tepelnú ochranu proti poškodeniu. Špeciálnou vlastnosťou tohto regulátora je schopnosť stabilne pracovať aj bez použitia blokovacích kondenzátorov (angl. “decoupling”, “bypass” capacitors) na vstupe a výstupe. My však z dôvodu potlačenia šumu a zvlnenia napätia na výstupe použijeme (na základe informácií uvedených v P12) tri keramické kondenzátory s kapacitou 0.1  $\mu\text{F}$ . Schéma zapojenia tohto regulátora je znázornená na obr. 7.11.



Obrázok 7.11: Schéma zapojenia LDO regulátora TPS73133 od firmy Texas Instruments  
Prevzaté z: P12

Pokiaľ ide o power management (rovnomený blok), rešerš komerčných produktov, ktoré sú vhodné pre navrhovaný monitorovací systém, je uvedená v kapitole 6 tejto práce, preto v tejto časti len vyberieme konkrétne riešenie, ktoré bude v obvode použité. Tým bude buď chip MAX17710 od firmy Maxim Integrated, alebo integrovaný obvod BQ25504 od spoločnosti Texas Instruments (rozhodne sa medzi nimi na základe experimentálneho merania chovania generátora), ktoré boli už na našej fakulte úspešne odskúšané v aplikácii zaoberajúcej sa energy harvestingom a spoľahlivo a bezproblémovo fungovali.

Ako záťaž (blok “Load (Wireless Sensor)”) bude v cieľovej aplikácii navrhovaného autonómneho diagnostického systému figurovať pravdepodobne určitý druh bezdrôtového snímacieho modulu (angl. “wireless sensor node”). Takýto modul dokáže fungovať v rôznych pracovných režimoch, v ktorých odoberá vždy rôzne množstvo elektrickej energie. Na základe prehľadu uvedeného v [29] (v ktorom sú uvedené ako komerčné riešenia, tak aj riešenia z akademickej sféry) boli vybraní štyria reprezentanti uvedení v tabuľke 7.3, pričom hodnoty z nej budú využité pri počítaní priemernej spotreby elektrického prúdu v troch rôznych aplikáciách, na základe čoho bude potom vypočítaný ekvivalentný odpor záťaže pre každý modul. Tieto hodnoty budú následne porovnané s optimálnymi odpormi zistenými pomocou simulácie v prostredí Simulink a výsledkom bude zhodnotenie, či je daný vibračný generátor vôbec možné použiť na napájanie niektorého z uvedených bezdrôtových snímacích modulov.

	Current Consumed				Power Supply
	Sleep Mode	Active Mode	RX	TX	
<b>EnOcean TCM120</b>	8 $\mu$ A	13.4 mA	15.8 mA	9.9 mA	4.8 V
<b>Linear Technology LTC5800-WHM</b>	0.8 $\mu$ A	12 mA	4.5 mA	7.6 mA	3 V
<b>MEMSIC Iris</b>	8 $\mu$ A	8 mA	16 mA	13.5 mA	3 V
<b>Zolertia Z1</b>	0.5 $\mu$ A	5.3 mA	19.3 mA	17.4 mA	2.7 V

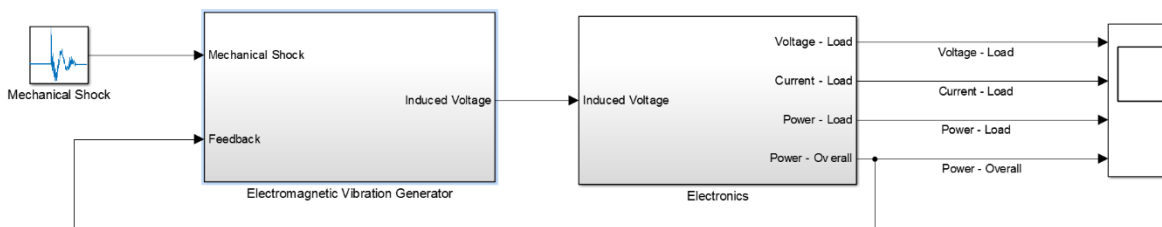
Tabuľka 7.3: Hodnoty spotreby elektrického prúdu v rôznych pracovných režimoch a napájacie napätie pre vybrané bezdrôtové snímacie moduly

## 7.2. Simulácia chovania vibračného generátora v prostredí Simulink

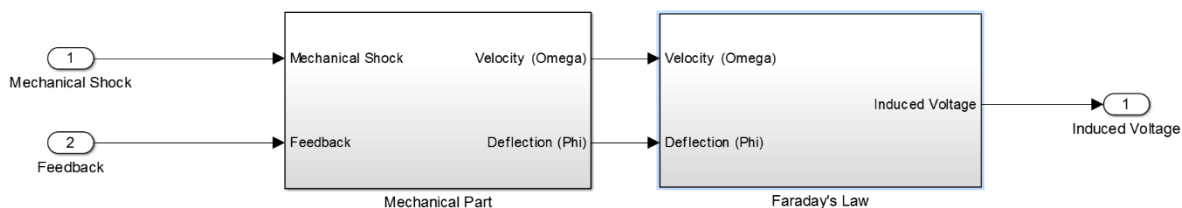
Na to, aby sme mohli navrhnuť hodnoty jednotlivých rezistorov pre časti obvodu snímajúce elektrické veličiny, t.j. pre bočník a odporový delič napätia, musíme vedieť, aké prúdy a napätia budú generované po pripojení záťaže ku generátoru. Potrebujeme preto najskôr nasimulovať chovanie generátora pre rôzne hodnoty záťaže a na základe toho zistiť, za akých okolností poskytuje vibračný generátor najväčšie množstvo výkonu, a teda aj energie. Na simuláciu chovania generátora bol v tejto kapitole použitý model, ktorý bol súčasťou riešenia diplomovej práce [13] a ktorý nám bol poskytnutý. Jeho parametre sú uvedené v tabuľke 7.4. Pre potreby nášho riešenia sme v prostredí Simulink vytvorili AC-DC usmerňovač (obsahujúci aj filtračný kondenzátor) spomínaný v kapitole 7.1.2., ktorý sme s modelom generátora prepojili. Celý model (znázornený na obr. 7.12, jednotlivé subsystemy potom na obr. 7.13 – 7.16), ktorý je súčasťou príloh tejto práce, bol následne budovaný rúžmi s frekvenciou opakovania 0.1 -1 Hz s maximálnou amplitúdou 1.5 G, ktoré približne (aj podľa tabuľky 7.1) zodpovedajú podmienkam, v ktorých bude výsledný systém nasadený. Výsledky simulácie pre rôzne hodnoty odporu záťaže sú uvedené v tabuľke 7.5.

Parametre vibračného generátora	Hodnota	Jednotka
Moment zotrvačnosti $I$	$119.3 \times 10^{-6}$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$
Hmotnosť $m$	78	[g]
Vlastná frekvencia $f_{vl}$	16	[Hz]
Počet závitov cievky $N_c$	1000	[-]
Činný odpor cievky $R_c$	158	$[\Omega]$
Činná dĺžka závitú cievky $l_c$	21	[mm]
Priemer drôtu cievky $d_{dr}$	100	$[\mu\text{m}]$
Kritické tlmenie $b_k$	0.024	$[\text{Ns}/\text{m}]$
Tuhosť $K$	0.147	$[\text{Nm}/\text{rad}]$

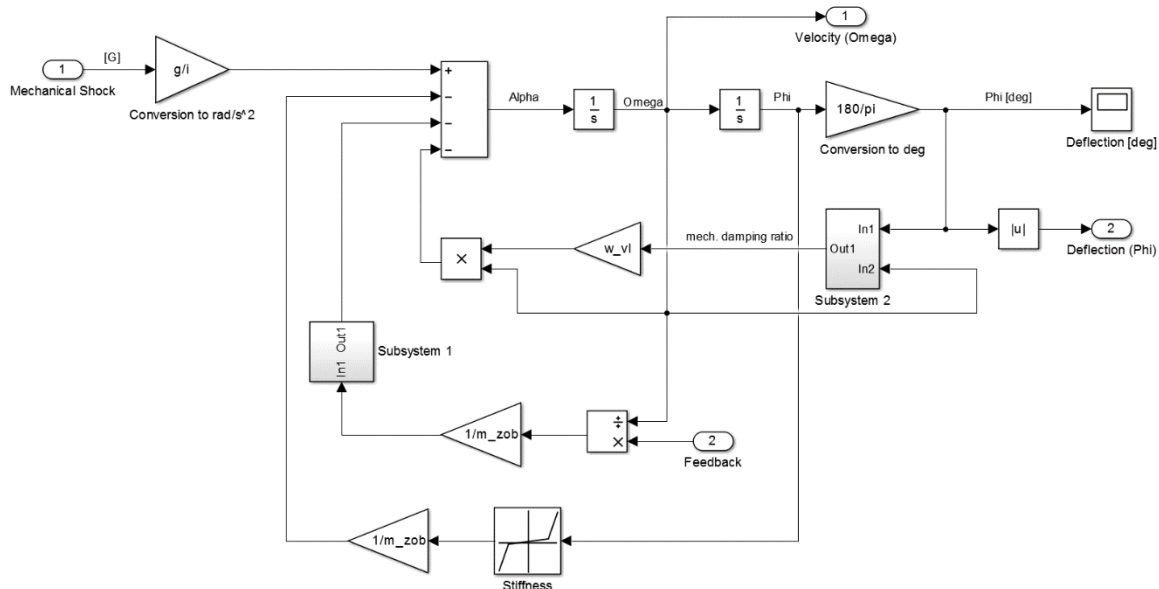
Tabuľka 7.4: Základné parametre použitého modelu vibračného generátora



Obrázok 7.12: Celkový model použitého vibračného generátora vytvorený v prostredí Simulink

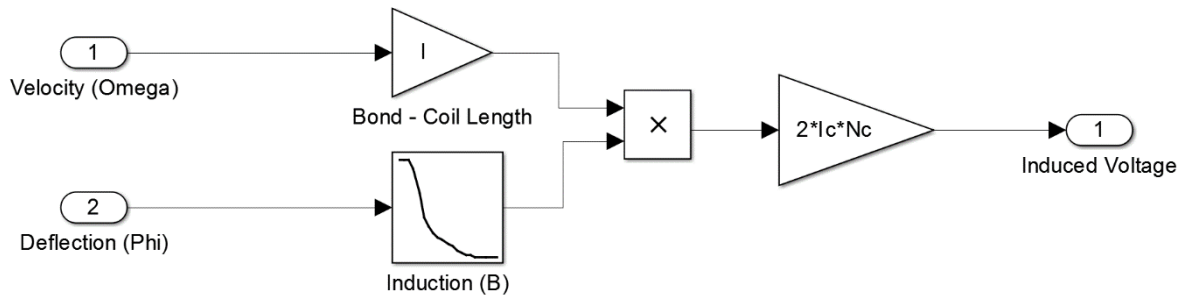


Obrázok 7.13: Subsystém “Electromagnetic Vibration Generator”

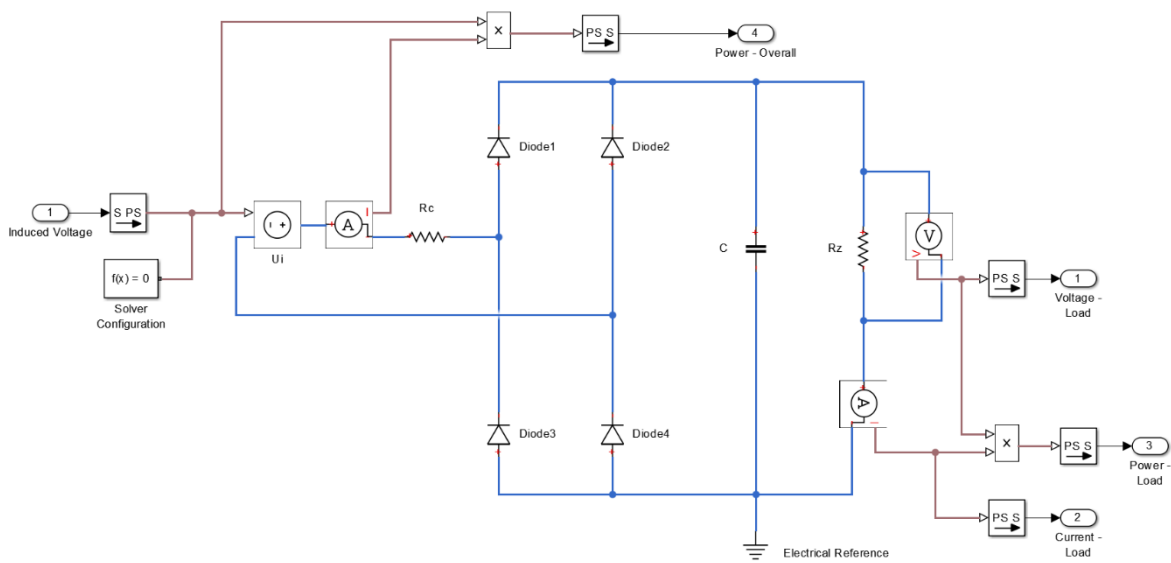


Obrázok 7.14: Subsystém “Mechanical Part”  
(tlmené lineárne kmitanie s jedným stupňom voľnosti)

Blok “Subsystem 1” na obr. 7.14 slúži ako časovač, ktorý zabraňuje vzniku singularity pri simulácii modelu. Blok “Subsystem 2” na rovnakom obrázku zabezpečuje výpočet pomerného mechanického útlmu.



Obrázok 7.15: Subsystem “Faraday’s Law” (výpočet indukovaného napätia)



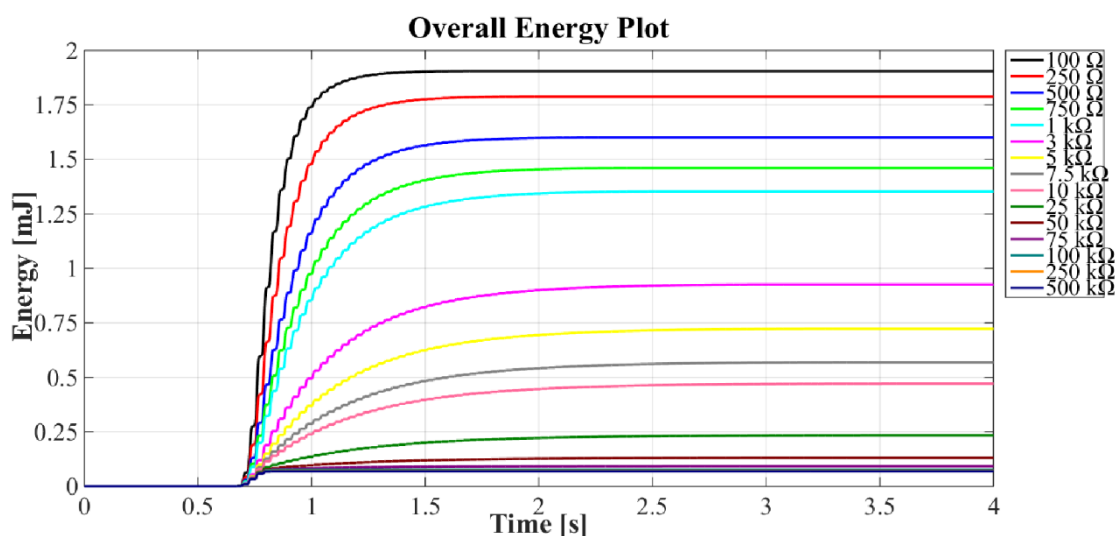
Obrázok 7.16: Subsystem “Electronics” (AC-DC usmerňovač)

Load	Repeating Frequency [Hz]					
	0.125	0.2	0.25	0.5	0.75	1
	<b>Power – Load (Max.)</b>					
100 $\Omega$	5.1 mW	3.6 mW	2.7 mW	1.9 mW	4.8 mW	7.1 mW
<b>250 <math>\Omega</math></b>	6.4 mW	4.0 mW	2.9 mW	2.2 mW	5.5 mW	8.7 mW
500 $\Omega$	5.7 mW	3.2 mW	2.3 mW	1.9 mW	4.7 mW	7.7 mW
750 $\Omega$	4.8 mW	2.6 mW	1.9 mW	1.6 mW	3.9 mW	6.6 mW
1 k $\Omega$	4.1 mW	2.2 mW	1.5 mW	1.3 mW	3.3 mW	5.8 mW
3 k $\Omega$	1.8 mW	916.3 $\mu$ W	650.9 $\mu$ W	584.5 $\mu$ W	1.4 mW	3.2 mW
5 k $\Omega$	1.2 mW	590.3 $\mu$ W	415.3 $\mu$ W	380.6 $\mu$ W	919.4 $\mu$ W	2.3 mW
7.5 k $\Omega$	798.7 $\mu$ W	433.3 $\mu$ W	287.1 $\mu$ W	266.7 $\mu$ W	635.3 $\mu$ W	1.7 mW
10 k $\Omega$	611.4 $\mu$ W	343.9 $\mu$ W	219.5 $\mu$ W	205.9 $\mu$ W	486.0 $\mu$ W	1.4 mW
25 k $\Omega$	255.1 $\mu$ W	153.8 $\mu$ W	91.5 $\mu$ W	90.0 $\mu$ W	202.1 $\mu$ W	660.0 $\mu$ W
50 k $\Omega$	129.7 $\mu$ W	80.5 $\mu$ W	46.4 $\mu$ W	45.0 $\mu$ W	102.7 $\mu$ W	358.0 $\mu$ W
75 k $\Omega$	86.9 $\mu$ W	54.5 $\mu$ W	31.2 $\mu$ W	31.6 $\mu$ W	68.9 $\mu$ W	244.8 $\mu$ W
100 k $\Omega$	65.4 $\mu$ W	41.3 $\mu$ W	23.4 $\mu$ W	23.8 $\mu$ W	51.9 $\mu$ W	188.1 $\mu$ W
250 k $\Omega$	26.3 $\mu$ W	16.9 $\mu$ W	9.5 $\mu$ W	9.6 $\mu$ W	20.9 $\mu$ W	77.3 $\mu$ W
500 k $\Omega$	13.2 $\mu$ W	8.6 $\mu$ W	4.8 $\mu$ W	4.9 $\mu$ W	10.5 $\mu$ W	39.2 $\mu$ W

Tabuľka 7.5: Hodnoty maximálneho výkonu na záťaži pre rôzne hodnoty odporu záťaže a rôzne frekvencie opakovania rázu (zvýraznený je optimálny odpor záťaže)

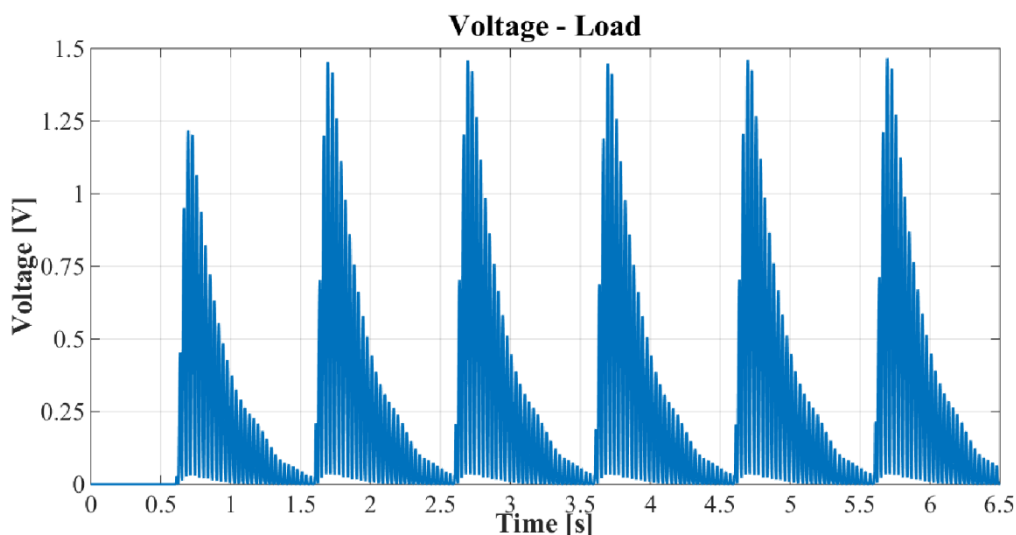
Z uvedenej tabuľky je zrejmé, že pre každú zo zvolených frekvencií opakovania rázu (vyšetrovanie frekvencií nad 1 Hz už nemá zmysel, pretože sú pri nich generované príliš nízke hodnoty výkonu) dosahuje výkon svoje maximálne hodnoty pri veľkosti odporu záťaže 250  $\Omega$ . Aby sa zistilo, či generátor neposkytuje pre iný odpor v okolí tejto hodnoty ešte lepšie výsledky, bol následne zjemnený krok simulácie, čím sa však potvrdilo, že optimálna záťaž generátora pri budení rázmi je práve 250  $\Omega$ .

Graf priebehov generovanej energie pre odpory záťaže z tabuľky 7.5 je zobrazený na obr. 7.17, , priebehy jednotlivých elektrických veličín (napätia, prúdu a výkonu na záťaži, celkového výkonu) pre optimálnu záťaž 250  $\Omega$  a frekvenciu 1 Hz (t.j. keď generátor dosahuje maximálny výkon) sú potom znázornené na obr. 7.18 – 7.21.

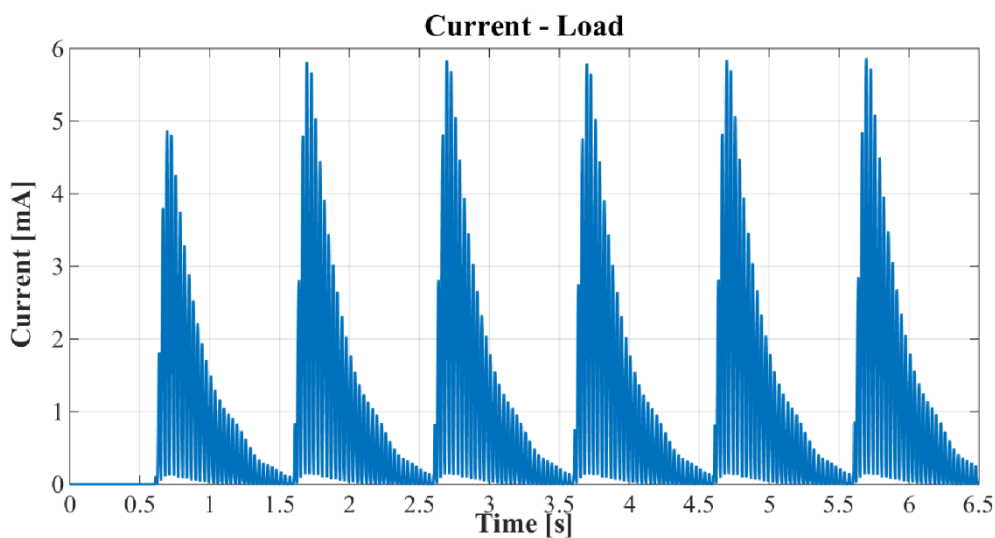


Obrázok 7.17: Priebeh energie generovanej pri rôznych hodnotách odporu záťaže

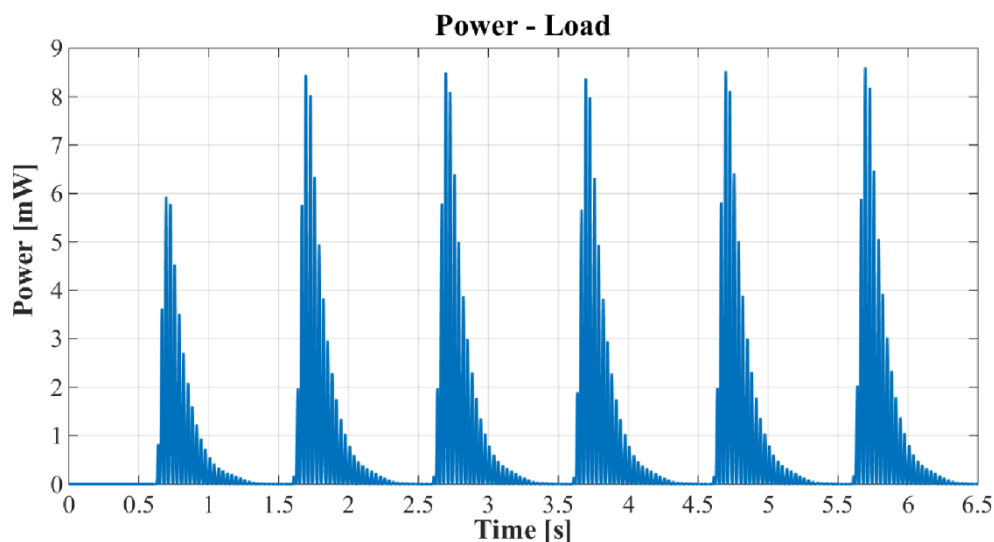
Na základe obr. 7.17 sa dá konštatovať, že maximálne množstvo energie (okolo 1.9 mJ) je generované už pri hodnote záťaže pohybujúcej sa v okolí  $100 \Omega$ , avšak pre túto hodnotu nastávajú v generátore väčšie výkonové straty, a preto poskytuje nižší maximálny výkon než zistená optimálna záťaž. Pri záťaži  $75 - 500 \text{ k}\Omega$  sú veľmi malé rozdiely medzi hodnotami generovanej energie, a teda ich priebehy sú v grafe ťažšie rozlíšiteľné a splývajú do jedného.



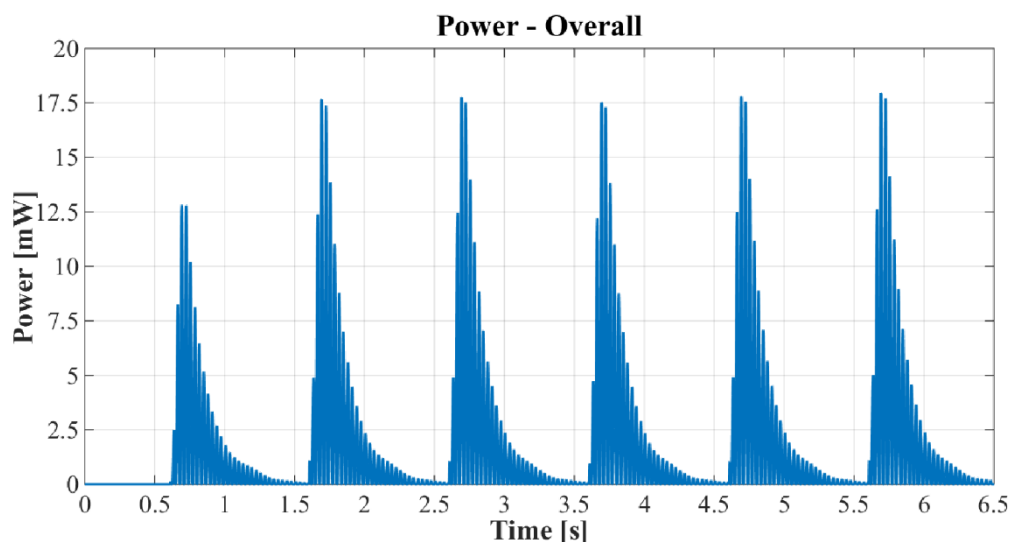
Obrázok 7.18: Priebeh napätia na záťaži pre odpor  $250 \Omega$  a frekvenciu budenia 1 Hz



Obrázok 7.19: Priebeh prúdu tečúceho záťažou pre odpor  $250 \Omega$  a frekvenciu budenia 1 Hz



Obrázok 7.20: Priebek výkonu na záťaži pre odpor  $250 \Omega$  a frekvenciu budenia 1 Hz



Obrázok 7.21: Priebek celkového výkonu pre odpor  $250 \Omega$  a frekvenciu budenia 1 Hz (celkový výkon je určený súčinom indukovaného napätia a prúdom prechádzajúcim cievkou pri pripojenej záťaži)

Z predchádzajúcich grafov sa dá vypozaorovať, že priebehy jednotlivých elektrických veličín na záťaži sú pomerne pulzujúce, aj keď doba poklesu z maximálnej na nulovú hodnotu je pomer uspokojivá (približne 0.7 – 0.8 s). Z toho vyplýva, že pre dosiahnutie hladšieho priebehu veličín na záťaži bude pravdepodobne potrebné upraviť hodnotu filtračného kondenzátora AC-DC usmerňovača a zvoliť tak rozumný kompromis medzi veľkosťou zvlnenia a dynamikou celého systému.

### 7.3. Výpočet odporu a výkonu vybraných bezdrôtových snímacích modulov

Na to, aby sme mohli posúdiť, či sú výsledky simulácie porovnateľné s hodnotami elektrických veličín v reálnych aplikáciách, a teda, či je naša sústava v týchto aplikáciách použiteľná, musíme zistiť hodnoty odporu jednotlivých bezdrôtových modulov. Na tento účel nám poslúži tabuľka 7.3, pomocou ktorej vypočítame vážený priemer spotrebovaného prúdu pre tri rôzne druhy modelových aplikácií a na základe neho spočítame hodnoty výkonu, ako aj výsledné hodnoty odporu záťaže (po použití Ohmovho zákona).

#### 7.3.1. Aplikácia č.1 – snímanie teploty

Prvou takouto aplikáciou môže byť snímanie okolitej teploty. Dopredu si stanovíme čas prevádzky pre jednotlivé režimy – v tomto prípade sme sa rozhodli, že teplota bude meraná raz za minútu s tým, že modul zotrvá v móde spánku 58 s, v aktívnom móde 1 s, v RX móde 0.5 s a v TX móde taktiež 0.5 s. Tieto časy poslúžia ako váhy pri výpočte váženého priemeru. Ten sa riadi rovnicou

$$I_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i I_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (7.1)$$

kde

$I_i$  - hodnota prúdového odberu pre daný mód, [A]

$t_i$  - doba prevádzky modulu v danom móde, [s]

$n$  - počet pracovných módov, [-]

Po dosadení hodnôt z tabuľky 7.3 do rovnice 7.1 a po aplikovaní Ohmovho zákona dostaneme nasledujúce hodnoty:

	<b>Current Consumed (Weighted Average)</b>	<b>Supply Voltage</b>	<b>Average Power Consumed</b>	<b>Equivalent Resistance</b>
<b>EnOcean TCM120</b>	445.2 $\mu$ A	4.8 V	2.1 mW	10 k $\Omega$
<b>Linear Technology LTC5800-WHM</b>	301.6 $\mu$ A	3 V	904.8 $\mu$ W	8.2 k $\Omega$
<b>MEMSIC Iris</b>	386.9 $\mu$ A	3 V	1.2 mW	6.8 k $\Omega$
<b>Zolertia Z1</b>	394.7 $\mu$ A	2.7 V	1.1 mW	6.8 k $\Omega$

Tabuľka 7.6: Hodnoty spotrebovaného prúdu, napájacieho napätia, výkonu a odporu pre jednotlivé bezdrôtové snímacie moduly pre aplikáciu snímania teploty (hodnoty odporov sú zaokrúhlené na najbližšiu nižšiu hodnotu zo štandardizovanej rady E12 pre rezistory s toleranciou  $\pm 10\%$ )

### 7.3.2. Aplikácia č.2 – meranie denného úhrnu zrážok

Ďalšou možnou aplikáciou je napr. snímanie denného úhrnu zrážok pomocou automatickej meteorologickej stanice, ktorá obsahuje skupinu snímačov, pomocou ktorých sa meteorologické veličiny prevádzajú na veličiny elektrické a sú zapisované do pamäte. V tomto prípade si stanovíme váhy pre výpočet váženého priemeru nasledovne – meranie prebehne raz za 24 hodín v určitú konkrétnu hodinu. Aktívny mód bude trvať 30 sekúnd, vysielanie dát 60 s, príjem dát 10 s, zvyšok dňa bude stanica v sleep móde. Výsledky sú pre jednotlivé bezdrôtové moduly uvedené v tabuľke 7.7.

	<b>Current Consumed (Weighted Average)</b>	<b>Supply Voltage</b>	<b>Average Power Consumed</b>	<b>Equivalent Resistance</b>
<b>EnOcean TCM120</b>	21.3 $\mu$ A	4.8 V	102.2 $\mu$ W	220 k $\Omega$
<b>Linear Technology LTC5800-WHM</b>	10.8 $\mu$ A	3 V	32.4 $\mu$ W	270 k $\Omega$
<b>MEMSIC Iris</b>	22.0 $\mu$ A	3 V	66.0 $\mu$ W	120 k $\Omega$
<b>Zolertia Z1</b>	16.7 $\mu$ A	2.7 V	45.1 $\mu$ W	150 k $\Omega$

Tabuľka 7.7: Hodnoty spotrebovaného prúdu, napájacieho napätia, výkonu a odporu pre jednotlivé bezdrôtové snímacie moduly pre aplikáciu merania úhrnu zrážok (hodnoty odporov sú zaokrúhlené na najbližšiu nižšiu hodnotu zo štandardizovanej rady E12 pre rezistory s toleranciou  $\pm 10\%$ )

### 7.3.3. Aplikácia č.3 – analýza vibrácií v dopravnom prostriedku v reálnom čase

Poslednou aplikáciou môže byť snímanie vibrácií akcelerometrom v reálnom čase v dopravnom prostriedku pri prejazde po určitej trase, na základe čoho sa potom môže vyhodnocovať napr. nerovnosť vozovky. Tu skúsime váhy nastaviť takto – perióda merania bude 1 s, pričom režim spánku (z dôvodu real-time aplikácie) bude vynechaný, aktívny režim bude trvať 0.4 s, vysielanie dát 0.5 s a príjem dát 0.1 s. Po použití rovnakých krokov ako v predchádzajúcich prípadoch dostaneme hodnoty uvedené v tabuľke 7.8.

	<b>Current Consumed (Weighted Average)</b>	<b>Supply Voltage</b>	<b>Average Power Consumed</b>	<b>Equivalent Resistance</b>
<b>EnOcean TCM120</b>	11.9 mA	4.8 V	57.1 mW	390 $\Omega$
<b>Linear Technology LTC5800-WHM</b>	9.1 mA	3 V	27.3 mW	270 $\Omega$
<b>MEMSIC Iris</b>	11.6 mA	3 V	34.8 mW	220 $\Omega$
<b>Zolertia Z1</b>	12.8 mA	2.7 V	34.6 mW	180 $\Omega$

Tabuľka 7.8: Hodnoty spotrebovaného prúdu, napájacieho napätia, výkonu a odporu pre jednotlivé bezdrôtové snímacie moduly pre aplikáciu analýzy vibrácií (hodnoty odporov sú zaokrúhlené na najbližšiu nižšiu hodnotu zo štandardizovanej rady E12 pre rezistory s toleranciou  $\pm 10\%$ )

### 7.3.4. Zhodnotenie výsledkov simulácie v rámci zvolených aplikácií

Maximálne dosiahnuté hodnoty jednotlivých elektrických veličín (napätia, prúdu, výkonu na záťaži a celkového výkonu pre posúdenie účinnosti prenosu elektrickej energie) pre optimálnu záťaž  $250 \Omega$  a zvolené frekvencie sú uvedené v tabuľke 7.9. Na základe porovnania tejto tabuľky a tabuliek uvedených pri jednotlivých modelových aplikáciách môžeme skonštatovať, že elektromagnetický vibračný generátor poskytuje v spojení s AC-DC usmerňovačom pri pripojenej optimálnej záťaži pre každú zvolenú frekvenciu opakovania rázov výkon, ktorý postačuje na napájanie bezdrôtových snímacích modulov v aplikáciách č.1 a č.2, ale pre aplikáciu č.3 sa javí ako nevhodný. Keďže ani pri optimálnej záťaži nedokáže vygenerovať dostatočné množstvo elektrickej energie na prevádzku modulov v tejto aplikácii, dá sa z tohto faktu vyvodiť záver, že vibračný generátor budený zvolenými rázmi sa nedá použiť ako napájací zdroj pre také aplikácie, kde je modul činný prakticky nepretržite. Pokiaľ ide o prvé dve aplikácie, generátor neposkytuje síce elektrické napätie samo osebe postačujúce na napájanie vybraných modulov, dosahuje však také hodnoty, ktoré je vhodne zvolený power management systém (zvyšuje účinnosť prenosu elektrickej energie a tým znižuje výkonové straty, napr. v kapitole 7.1.5. spomínaný BQ25504 od firmy Texas Instruments alebo MAX17710 od firmy Maxim Integrated) schopný regulovať a tým zabezpečiť zásobovanie modulov elektrickou energiou postačujúcou na ich prevádzku. V aplikácii č.2 sa navyše javí ako veľmi výhodné použitie určitého typu akumuláčného článku, pretože je energia generovaná vibračným generátorom využívaná záťažou iba zlomok času, a tak sa môže v článku nazbierať také množstvo energie, ktoré dokáže zabezpečiť bezproblémový chod napájaného zariadenia a jeho plnú funkčnosť. Chovanie snímacích modulov, ktoré sa na základe výsledkov simulácie dajú pre zvolené aplikácie použiť, by bolo ďalej simulované pomocou komplexnejšieho modelu energy harvesting systému, ktorý by obsahoval aj model použitej power management elektroniky. Ako záťaž by sa zvolil ekvivalentný odpor modulu podľa tabuliek 7.6 – 7.8.

	Frequency [Hz]					
	0.125	0.2	0.25	0.5	0.75	1
<b>Voltage – Opt. Load (Max.)</b>	1.3 V	1.0 V	0.8 V	0.7 V	1.2 V	1.5 V
<b>Current – Opt. Load (Max.)</b>	5.1 mA	4.0 mA	3.4 mA	3.0 mA	4.7 mA	5.9 mA
<b>Power – Opt. Load (Max.)</b>	6.4 mW	4.0 mW	2.9 mW	2.2 mW	5.5 mW	8.7 mW
<b>Power - Overall</b>	13.8 mW	9.0 mW	7.0 mW	5.4 mW	12.2 mW	18.1 mW

Tabuľka 7.9: Maximálne hodnoty elektrického napätia, prúdu, výkonu na záťaži a celkového výkonu pre zvolené frekvencie opakovania rázov a záťaž  $250 \Omega$

## 7.4. Návrh prvkov obvodu merajúcich elektrické napätie a elektrický prúd

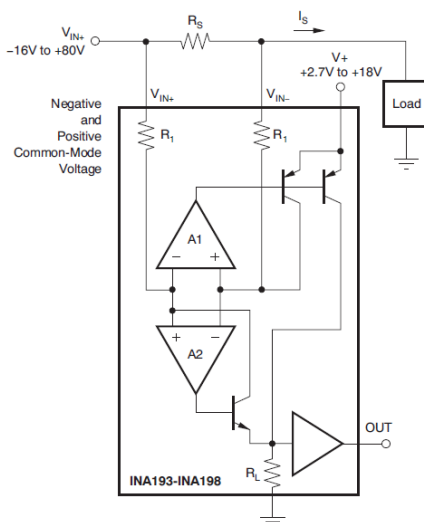
Ako už bolo spomenuté v kapitole 7.1.3., snímanie elektrických veličín bude realizované bočníkom a odporovým deličom. Na základe simulácie vykonanej v predchádzajúcej kapitole teraz môžeme, vychádzajúc z [25], pristúpiť k návrhu konkrétnych hodnôt odporov pre tieto prvky obvodu. Pri výpočte hodnoty odporu bočníka je nutné vychádzať z hodnoty maximálneho prúdu  $I_{max}$ , ktorý ním bude pretekať, a vhodne zvolenej hodnoty stratového výkonu  $P_{max}$ . Vzťah medzi týmito veličinami a maximálnym snímaným napätím vyjadruje rovnica

$$U_{max} = \frac{P_{max}}{I_{max}} \quad (7.2)$$

Stratový výkon zvolíme na základe tabuľky 7.9 – vidíme, že hodnoty výkonu na záťaži sa pohybujú rádovo v jednotkách mW. Vyberieme teda hodnotu  $350 \mu\text{W}$  a po dosadení hodnoty maximálneho prúdu (taktiež z tabuľky 7.9) do rovnice 7.2 dostávame maximálne napätie na bočníku  $U_{max} = 59.3 \text{ mV}$ . Na výpočet hodnoty odporu bočníka už stačí len dosadiť číselné hodnoty vypočítaného napätia a prúdu do rovnice

$$R = \frac{U_{max}}{I_{max}} \quad (7.3)$$

Dostávame hodnotu odporu  $R = 10.1 \Omega$ . Z rady E96 (tolerancia  $\pm 1 \%$ ) preto volíme rezistor  $R = 10 \Omega$ . Ďalšou dôležitou súčasťou je napäťový zosilovač, ktorý diferenciálne pripojíme k bočníku. Ten bude mať na starosti zosilnenie meraného signálu a poskytnutie napäťového výstupu pre analógový vstup mikrokontroléra, aby mohla byť meraná hodnota následne zapísaná na pamäťové médium. Z komerčných riešení vyberáme zosilovač INA197 od spoločnosti Texas Instruments znázornený na obr. 7.22, ktorý poskytuje zosilnenie  $50 \text{ V/V}$ , dokáže pracovať s hodnotami napätia v rozsahu  $-16 \text{ V} - +80 \text{ V}$  a v kludovom stave odoberá prúd okolo  $0.9 \text{ mA}$ . Pre potlačenie šumu pridáme na výstup zosilovača aj filtračný kondenzátor s hodnotou kapacity  $10 \text{ nF}$ .



Obrázok 7.22: Zjednodušená schéma napäťového zosilovača pre snímanie prúdu INA197 od firmy Texas Instruments  
Prevzaté z: P13

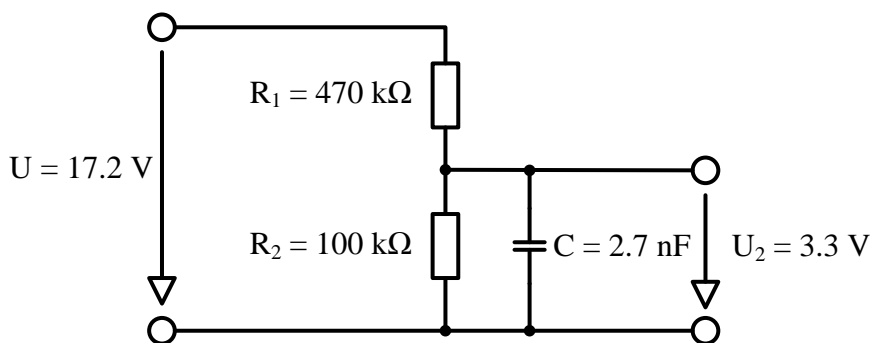
Odporový delič, ktorého schéma je zobrazená na obr. 7.23, popisuje vzťah medzi vstupným napätím  $U$  a výstupným napätím  $U_2$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (7.4)$$

Pri návrhu hodnôt jednotlivých rezistorov budeme vychádzať z faktu, že je v našom prípade potrebné, aby na výstupe deliča hodnota napätia nepresiahla 3.3 V, pretože výstup je pripojený na analógový vstup mikrokontroléra a ak by bola táto hranica prekročená, mohlo by dôjsť k jeho vážnemu poškodeniu. Preto za výstupné napätie  $U_2$  dosadíme túto hodnotu a za vstupné napätie  $U$  hodnotu zo simulácie chovania vibračného generátora (17.2 V) pri chode naprázdno (odpor záťaže 100 M $\Omega$ ) pre najväčšiu hodnotu zrýchlenia vibrácií z tabuľky 7.1 (15 G), čím dostaneme vzťah medzi rezistorom  $R_1$  a rezistorom  $R_2$  v tvare

$$R_2 = 0.24R_1 \quad (7.5)$$

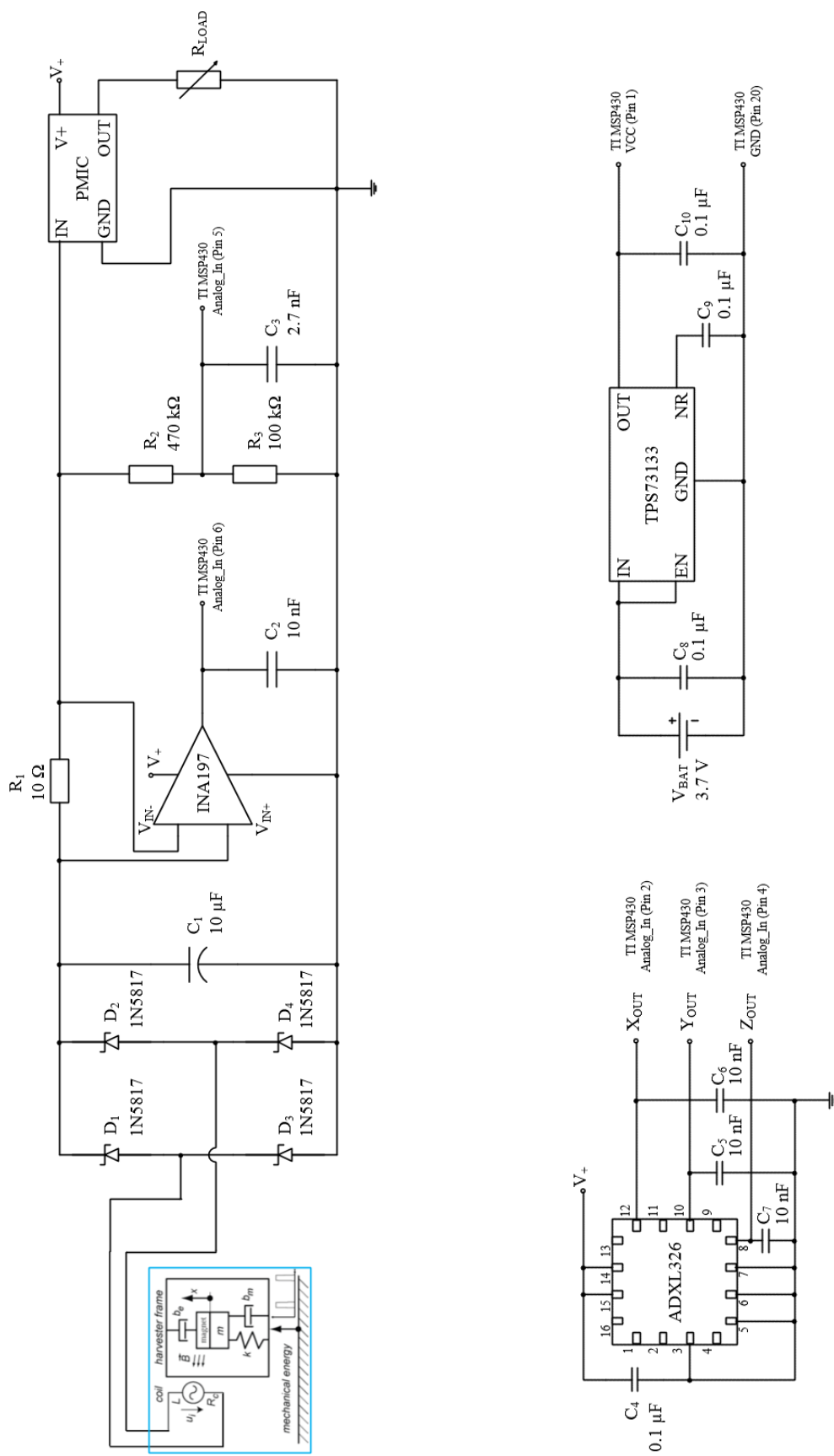
Na základe vzťahu 7.5 navrhujeme rezistory z rady E12 s hodnotami  $R_1 = 470 \text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ .



Obrázok 7.23: Odporový delič napätia

Navyše, na výstup odporového deliča pre potlačenie veľkých špičkových hodnôt výstupného napätia a šumu pripojíme keramický filtračný kondenzátor. Časová konštanta takto vzniknutého filtra typu dolná priepusť musí byť iba tak veľká, aby neovplyvňovala požadovanú dynamiku celého systému, teda musí byť menšia, ako je časová konštanta u akcelerometra ADXL326 z kapitoly 7.1.3. (320  $\mu$ s). Pre odpor filtra 82.5 k $\Omega$  (dostaneme ho paralelnou kombináciou rezistorov  $R_1$  a  $R_2$ ) volíme preto kondenzátor s veľkosťou 2.7 nF.

Pre úplnosť a prehľadnosť je na ďalšej stránke uvedená celková elektrická schéma energy harvesting systému, pričom v tabuľke 7.10 sú uvedené aj hodnoty všetkých prvkov navrhovaného autonómneho monitorovacieho systému, ktoré obvod obsahuje. Pod touto schémou je znázornená aj schéma napájania s napäťovým regulátorom, ktoré dodáva elektrickú energiu mikrokontroléru, napäťovému zosilovaču bočníka a akcelerometru.



Obrázok 7.24: Elektrická schéma celkového energy harvesting systému, schéma zapojenia zvoleného akcelerometra a schéma napájania s napät'ovým regulátorom (modrou farbou je vyznačený vibračný generátor)

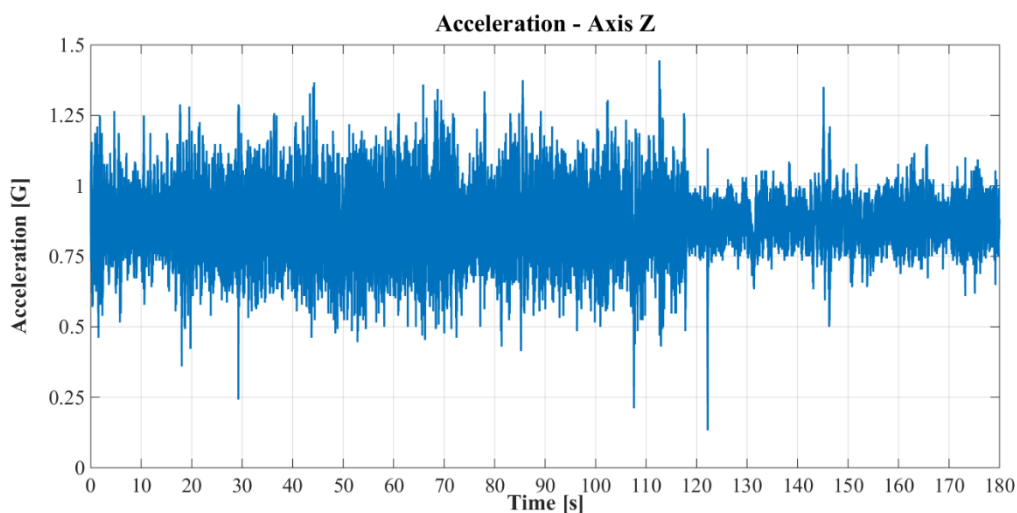
<b>Navrhované hodnoty prvkov autonómneho monitorovacieho systému</b>	
<b>D<sub>1</sub> – D<sub>4</sub></b>	Schottky diódy 1N5817 (0.45 V/1 A)
<b>C<sub>1</sub></b>	elektrolytický filtračný kondenzátor 10 $\mu$ F
<b>C<sub>2</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 10 nF
<b>C<sub>3</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 2.7 nF
<b>C<sub>4</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 0.1 $\mu$ F
<b>C<sub>5</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 10 nF
<b>C<sub>6</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 10 nF
<b>C<sub>7</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 10 nF
<b>C<sub>8</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 0.1 $\mu$ F
<b>C<sub>9</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 0.1 $\mu$ F
<b>C<sub>10</sub></b>	keramický filtračný kondenzátor 0.1 $\mu$ F
<b>R<sub>1</sub></b>	bočník 10 $\Omega$
<b>R<sub>2</sub></b>	vrchný rezistor odporového deliča 470 k $\Omega$
<b>R<sub>3</sub></b>	spodný rezistor odporového deliča 100 k $\Omega$
<b>R<sub>LOAD</sub></b>	odpor záťaže (v závislosti na použitom module)
<b>V<sub>BAT</sub></b>	napätie Li-Pol batérie 3.7 V
<b>V<sub>+</sub></b>	napájacie napätie (viď datasheety)

Tabuľka 7.10: Navrhované hodnoty prvkov autonómneho monitorovacieho systému

## 8. Experiment a zhodnotenie nameraných výsledkov

V priebehu vypracovávaní tejto diplomovej práce boli, čo sa týka experimentálneho overenia sústavy, prehodnotené priority – upustilo sa od overenia funkčnosti navrhnutého autonómneho monitorovacieho systému a prednosť dostalo experimentálne meranie pomocou komerčného produktu, konkrétne dataloggeru Slam Stick Lite od firmy Midé spomínaného v kapitole 4.2., ktorý bol našou fakultou zakúpený. Cieľom bolo vyšetriť hodnoty zrýchlenia rázov pri ceste osobným automobilom (datalogger bol umiestnený na palubnej doske vozidla, pričom nás zaujímalo zrýchlenie v smere osi Z, t.j. v smere kolmom na vozovku) počas rôznych rýchlostí a na rôznych typoch ciest a na základe výsledkov simulácie pre tieto hodnoty určiť, či vôbec je možné použiť vibračný generátor budený rázmi ako autonómny zdroj energie v dopravnej aplikácii.

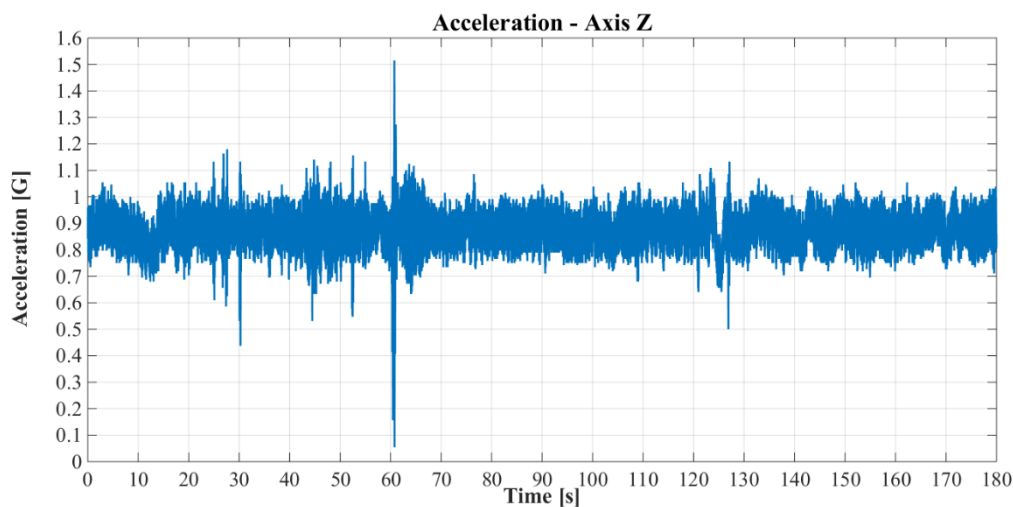
Dohromady boli vykonané štyri merania na rôznych typoch vozoviek. Meranie č.1, ktorého priebeh je znázornený na obr. 8.1, bolo uskutočnené na relatívne hladkej ceste medzi dvoma obcami:



Obrázok 8.1: Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde po hladkej ceste medzi obcami

Z grafu je zrejmé, že prevažujúce hodnoty zrýchlenia oscilujú medzi 0.75 – 1 G, pričom pri prejazde väčšími nerovnosťami môžu dosiahnuť až hodnotu okolo 1.4 G. Je taktiež vidno, že v čase okolo 120. sekundy auto výraznejšie spomalilo, pretože rozptyl špičkových hodnôt zrýchlenia nie je taký veľký ako v priebehu do 120. sekundy.

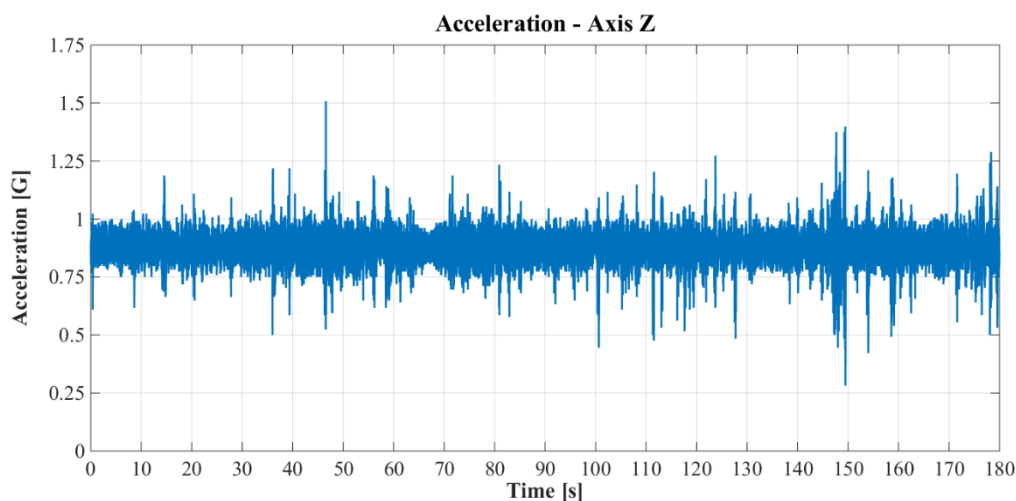
Meranie č.2 bolo vykonané pri jazde v obci, pričom bola dodržiavaná najvyššia povolená rýchlosť 50 km/h. Jeho priebeh je zobrazený na obr. 8.2:



Obrázok 8.2: Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde v obci počas dodržiavania maximálnej povolenej rýchlosti

Tu môžeme pozorovať, že na rozdiel od predošlého prípadu, kde sa vozidlo pohybovalo väčšou rýchlosťou, pri jazde obcou sa priemerná hodnota zrýchlenia rázov pohybuje okolo 0.9 G, pričom pri prejazde nerovnosťami zrýchlenie nedosahuje také špičky ako v priebehu na obr. 8.1. Takisto si môžeme všimnúť, že v okolí 60. sekundy automobil prešiel cez veľkú nerovnosť (výtlk), čím sa hodnota zrýchlenia vyšplhala až na 1.5 G.

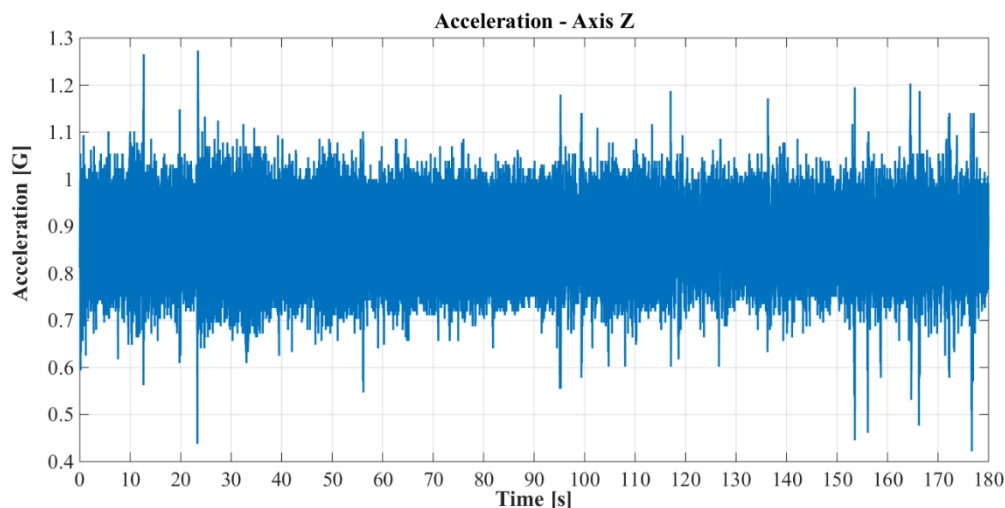
Meranie č.3 prebiehalo opäť v obci (Holešov), tentokrát bola ale vozovka značne rozbitá. Výsledky tohto merania sú na obr. 8.3:



Obrázok 8.3: Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde v obci Holešov po výrazne rozbitej vozovke

Tento priebeh zrýchlenia je podobný tomu na obr. 8.2, pričom však vozidlo neprešlo žiadnou extrémnejšou nerovnosťou ako v predošlom prípade, zato je však zjavné, že cesta bola poškodená viac-menej rovnomerne počas celej doby merania. Naznačujú to pravidelne sa opakujúce špičky zrýchlenia.

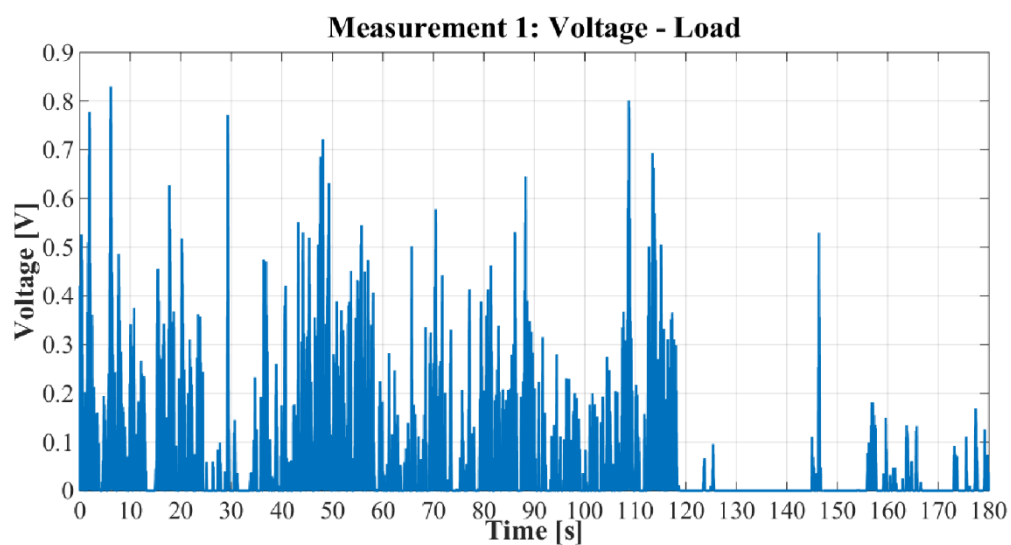
Posledné meranie, č.4, sa uskutočnilo pri jazde po diaľnici D1 na cementobetónovom povrchu (tzv. “panely”). Jeho výsledky sú znázornené na obr. 8.4:



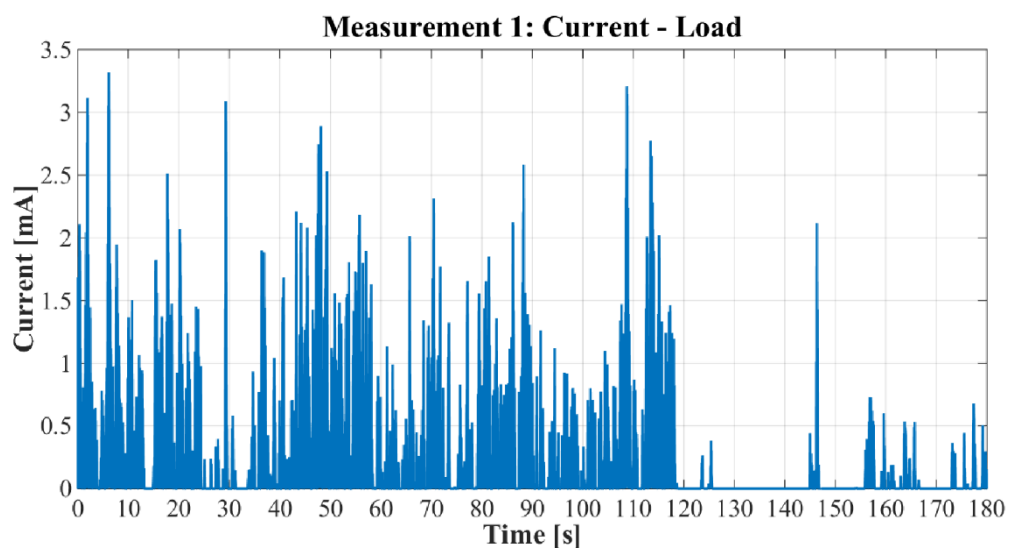
Obrázok 8.4: Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde na diaľnici D1 po panelovom úseku

V tomto grafe sú badateľné pravidelné prejazdy automobilu rozhraniami jednotlivých panelov na diaľnici a celkovo je tento priebeh porovnateľný s priebehom z obr. 8.1 (pred znížením rýchlosti), avšak zrýchlenie dosahuje v tomto prípade menšie špičkové hodnoty, z čoho sa dá usúdiť, že odhliadnuc od panelových rozhraní bola vozovka v dobrom stave bez väčších nerovností.

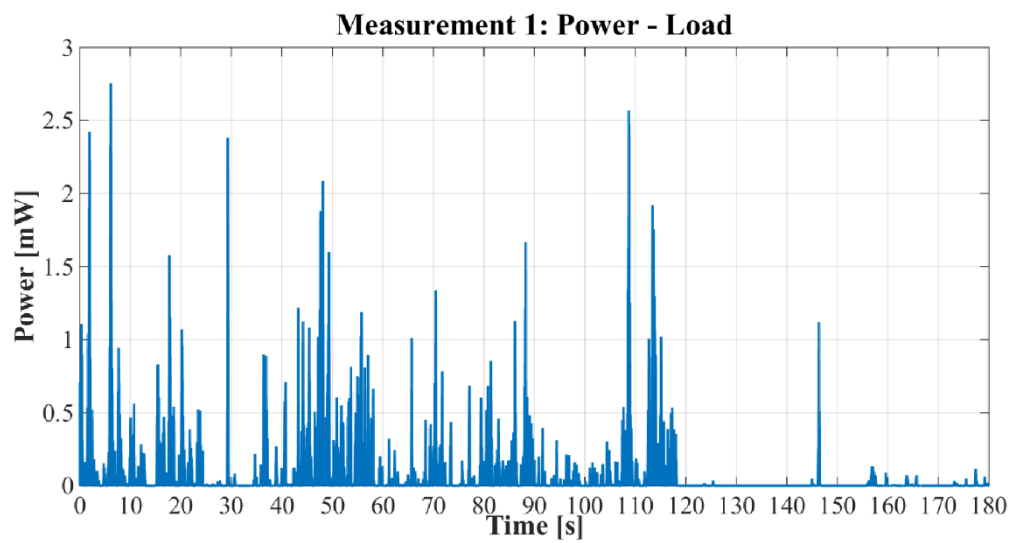
Priebehy zrýchlenia z obr. 8.1 – 8.4 sme následne použili ako vstup pre simuláciu chovania vibračného generátora pri optimálnom odpore zistenom v kapitole 7.2.. Grafy jednotlivých veličín pre tieto štyri prípady sú znázornené na obr. 8.5 – 8.20:



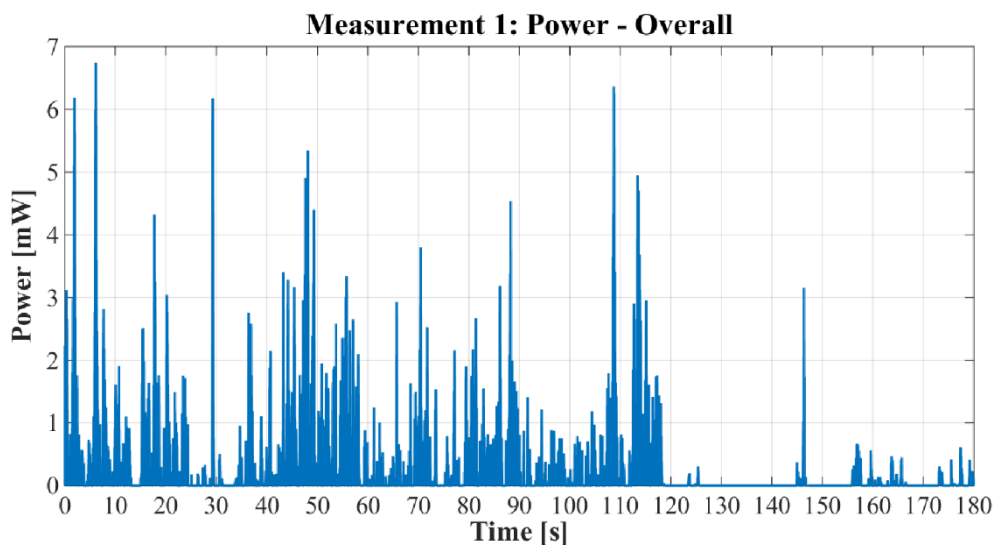
Obrázok 8.5: Priebeh napätia na záťaži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.1



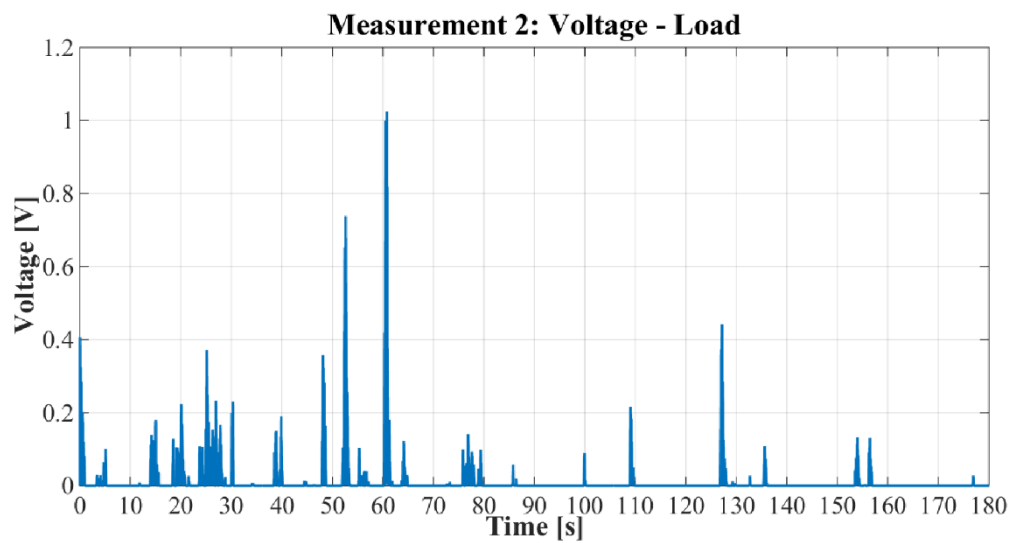
Obrázok 8.6: Priebeh prúdu na záťaži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.1



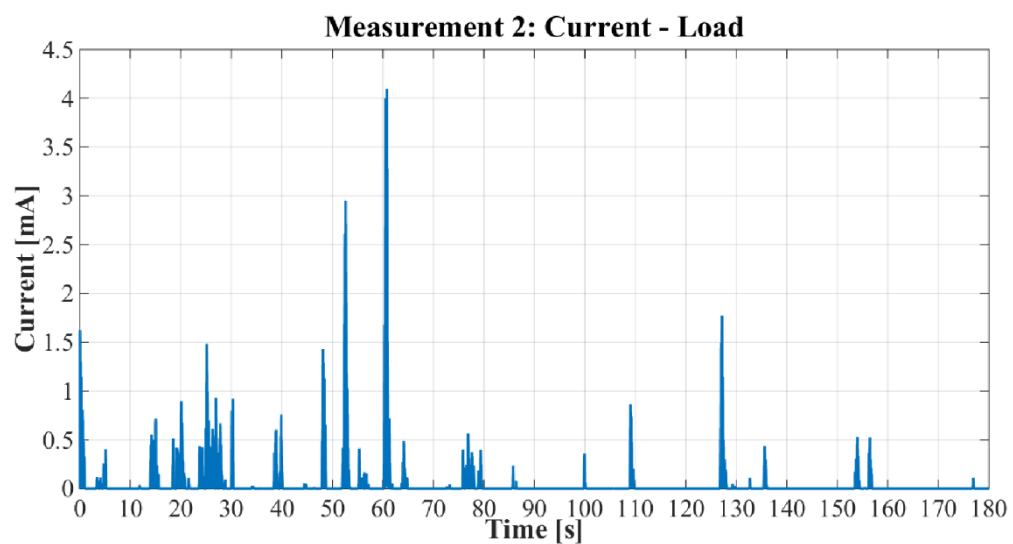
Obrázok 8.7: Priebek výkonu na záťaži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.1



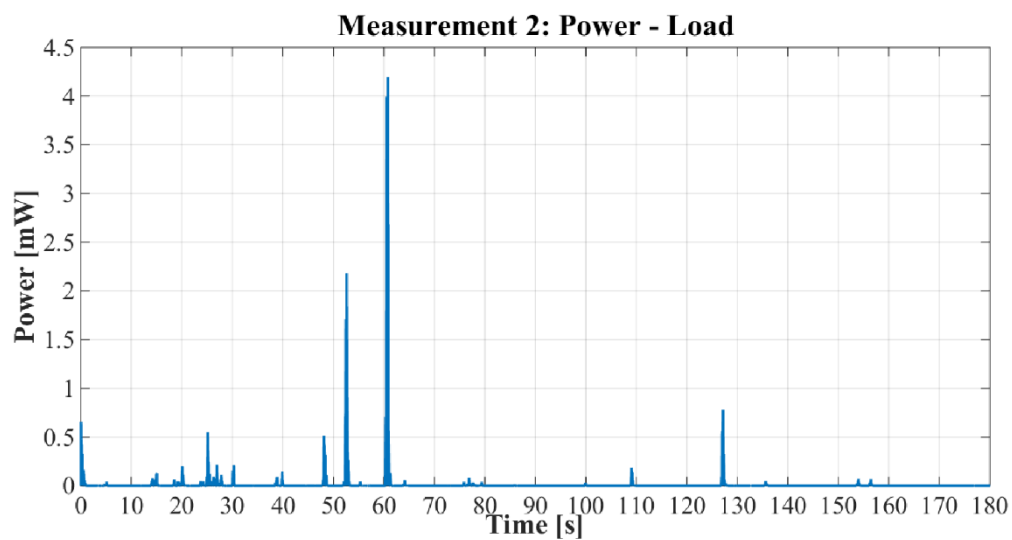
Obrázok 8.8: Priebek celkového výkonu pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.1



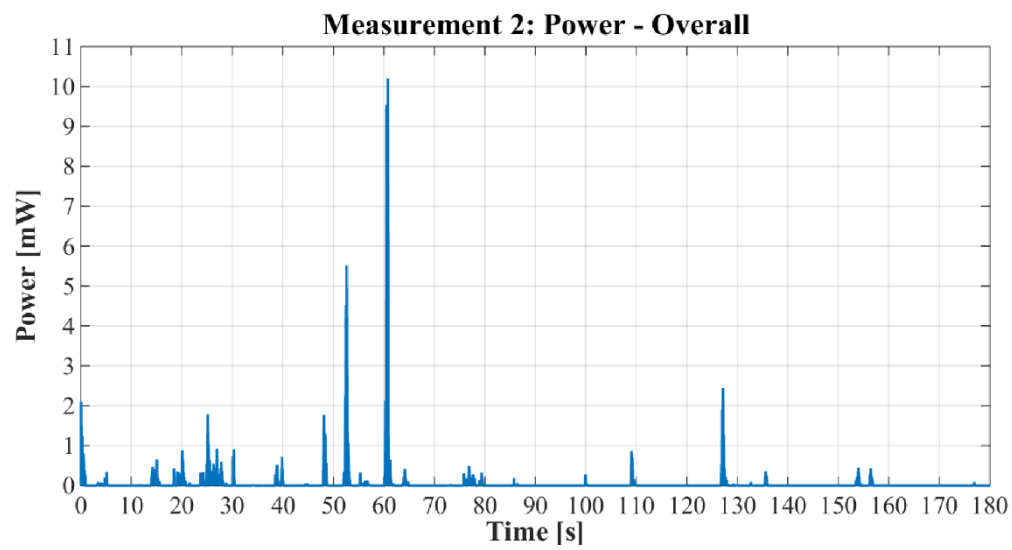
Obrázok 8.9: Priebek napätia na zát'aži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.2



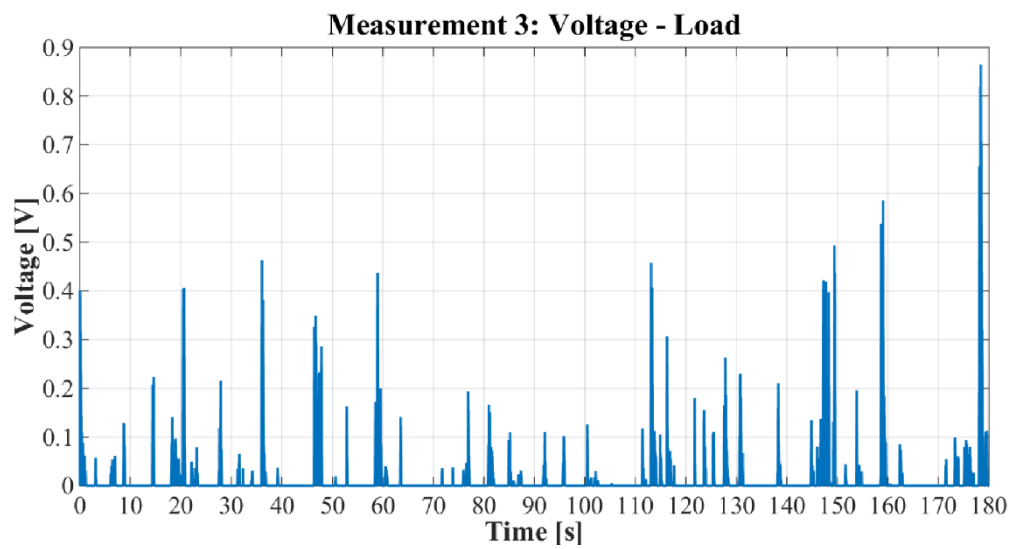
Obrázok 8.10: Priebek prúdu na zát'aži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.2



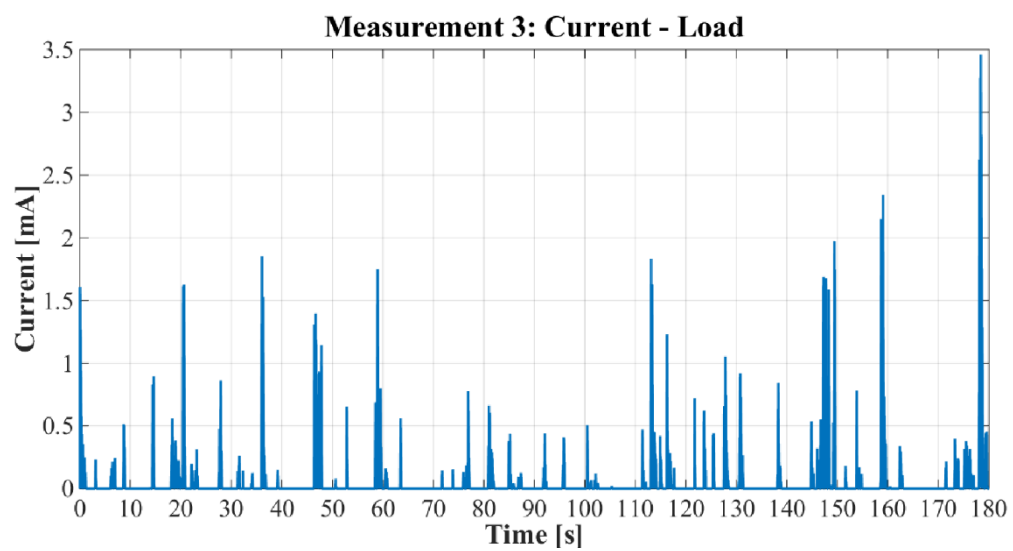
Obrázok 8.11: Priebeh výkonu na záťaži pri odpore 250  $\Omega$  pre meranie č.2



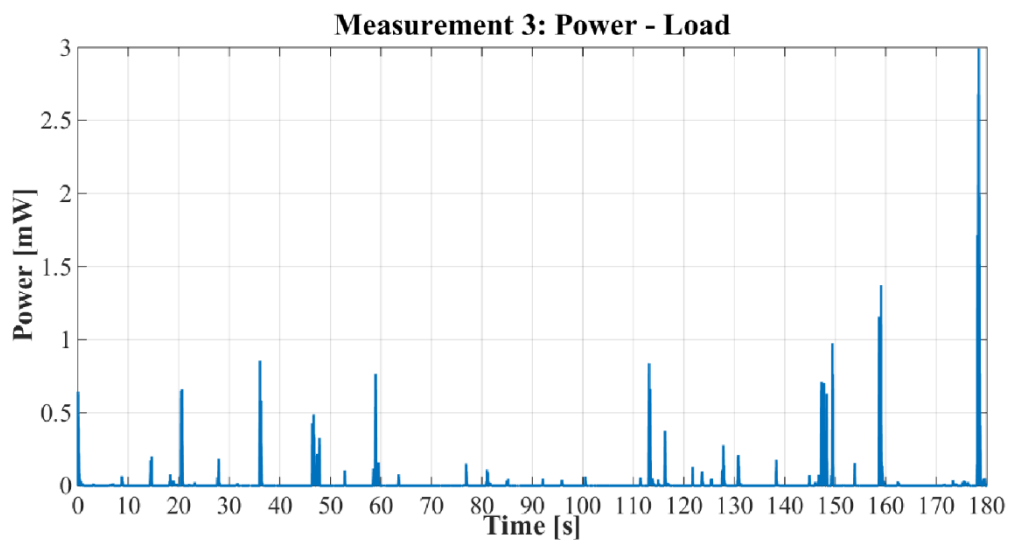
Obrázok 8.12: Priebeh celkového výkonu pri odpore 250  $\Omega$  pre meranie č.2



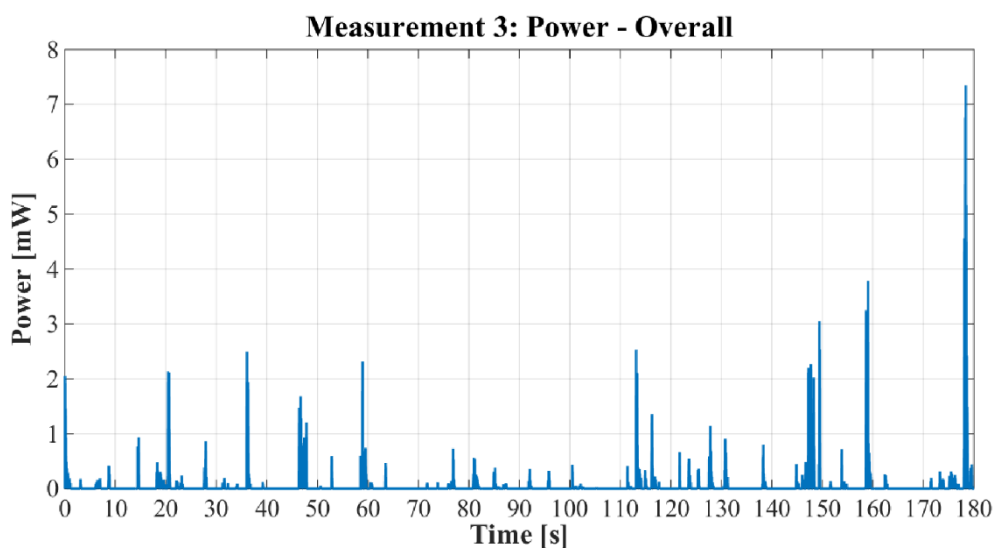
Obrázok 8.13: Priebeh napätia na zát'aži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.3



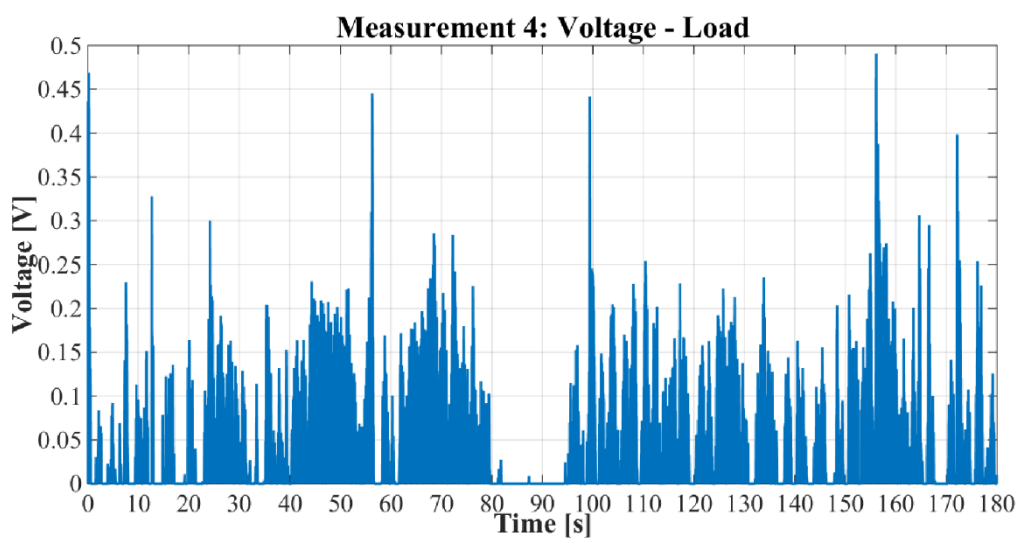
Obrázok 8.14: Priebeh prúdu na zát'aži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.3



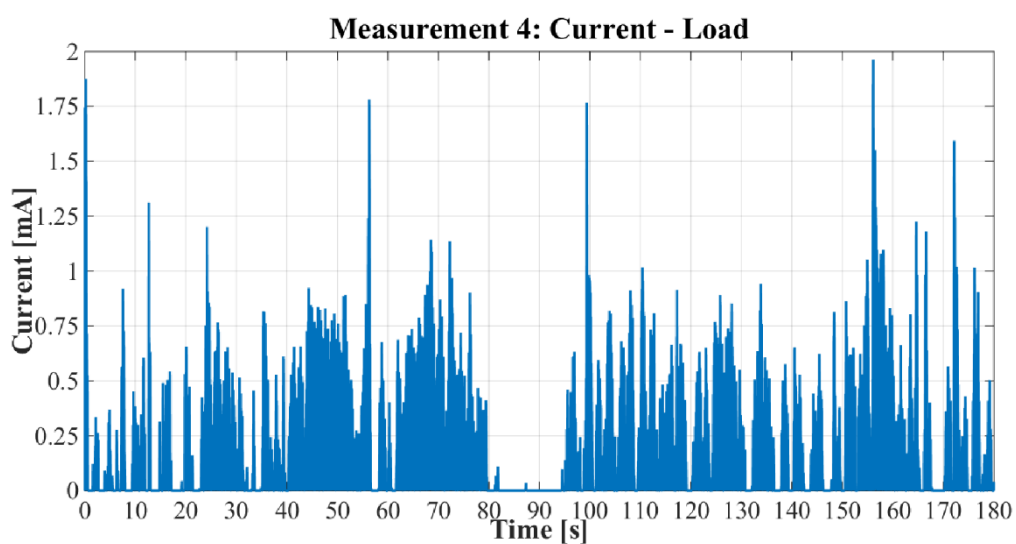
Obrázok 8.15: Priebeh výkonu na záťaži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.3



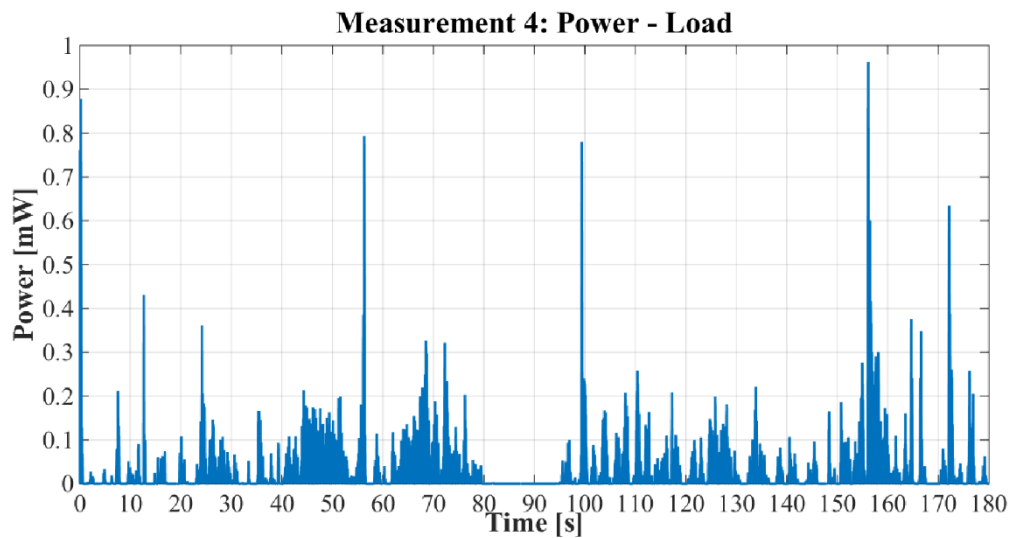
Obrázok 8.16: Priebeh celkového výkonu pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.3



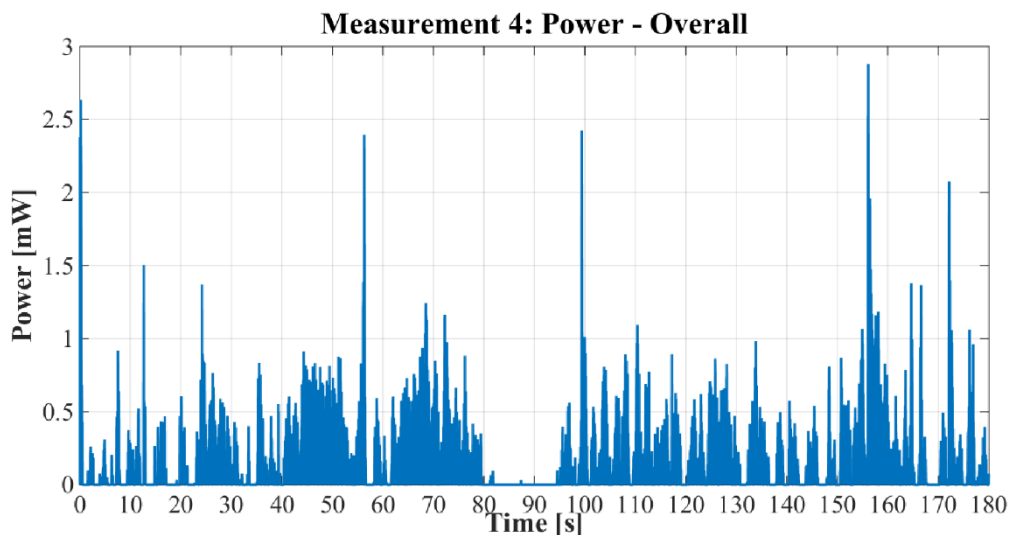
Obrázok 8.17: Priebek napätia na zát'aži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.4



Obrázok 8.18: Priebek prúdu na zát'aži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.4



Obrázok 8.19: Priebek výkonu na záťaži pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.4



Obrázok 8.20: Priebek celkového výkonu pri odpore  $250 \Omega$  pre meranie č.4

Na základe výsledkov simulácie pre experimentálne namerané hodnoty zrýchlenia môžeme skonštatovať, že priemerné a maximálne hodnoty (špičky) výkonu generovaného na záťaži sú nasledovné:

	<b>Average Power - Load</b>	<b>Max. Power (Peak) – Load</b>
<b>Measurement 1</b>	27.6 $\mu$ W	2.8 mW
<b>Measurement 2</b>	5.8 $\mu$ W	4.2 mW
<b>Measurement 3</b>	5.0 $\mu$ W	3.0 mW
<b>Measurement 4</b>	9.7 $\mu$ W	1.0 mW

Tabuľka 8.1: Priemerné a maximálne hodnoty výkonu generovaného na záťaži pre 4 experimentálne merania

Z tabuľky 8.1 je zrejmé, že meranie č.1 poskytuje najvyššiu priemernú hodnotu generovaného výkonu napriek tomu, že bolo uskutočnené na hladkej ceste medzi obcami. To je spôsobené faktom, že aj keď boli merania č.2 a č.3 vykonané na vozovke s horšou kvalitou (vidno na základe hodnôt špičkového výkonu), kvôli nutnosti dodržiavania maximálnej povolenej rýchlosti 50 km/h v obci nebolo možné získať väčšie výkony na záťaži. Najhoršie výsledky poskytuje meranie č.4, pretože pri jazde veľkou rýchlosťou po najkvalitnejšom povrchu (aj napriek pravidelne sa opakujúcim rozhraniam medzi diaľničnými panelmi) dosahuje výkon veľmi malé hodnoty, ktoré sú prakticky nepoužiteľné pre aplikácie č.1 a č.3 z kapitoly 7.3.. Rovnako tak sú nevhodné pre aplikáciu č.3 (ktorá vyžaduje, aby bol napájaný bezdrôtový snímací modul prakticky neustále aktívny) aj hodnoty zo zvyšných meraní. Pre aplikáciu č.1 by sa dali použiť hodnoty z merania č.1, avšak iba pod podmienkou použitia vhodného power management systému. Pokiaľ ide o aplikáciu č.2, bolo by možné využiť hodnoty zo všetkých meraní, pretože v tejto aplikácii je modul aktívny iba krátku chvíľu, a preto sa zvyšok času môže využiť na nabíjanie voliteľného akumuláčného článku, ktorý potom bude schopný poskytnúť modulu dostatočné množstvo elektrickej energie na jeho prevádzku.

## 9. Zhrnutie výsledkov práce a záver

Kapitola 4 sa zaoberá rešeršou vybraných riešení autonómnych diagnostických systémov z vedeckej a komerčnej oblasti, ktoré využívajú na svoju prevádzku mechanické rázy, resp. vibrácie. Pri jednotlivých systémoch z vedeckej sféry sú uvedené ich funkčné prvky a je popísaný princíp ich činnosti a v prípade, ak ich daná sústava obsahuje, sú spomenuté aj ďalšie špeciálne prvky. Pri riešeníach z komerčnej sféry sú potom uvedené tie najpodstatnejšie parametre z hľadiska použitia a na konci kapitoly sa nachádza tabuľka, ktorá jednotlivé komerčné systémy porovnáva.

V kapitole 5 je uvedený veľmi stručný popis elektromagnetického vibračného generátora vyvinutého na našej univerzite, v skratke je vysvetlený princíp jeho činnosti a sú uvedené aj niektoré jeho parametre (rozmery, hmotnosť, rezonančná frekvencia). Kapitola 6 sa zameriava na výber power management integrovaného obvodu, ktorý by bol vhodný pre náš energy harvesting systém. Sú zvolené 4 komerčné chipy, ktoré by bolo možné použiť, pri každom sú vymenované najdôležitejšie vlastnosti a prvky a na záver je opäť uvedená tabuľka slúžiaca na ich vzájomné porovnanie.

Kapitola 7 je najrozsiahlejšou kapitolou celej práce. V prvej časti rozoberá detailne každý prvok energy harvesting systému, v druhej časti prezentuje výsledky simulácie vibračného generátora pre rôzne frekvencie opakovania budiacich rázov a pre rôzne hodnoty odporu záťaže, na základe čoho je potom zvolená optimálna záťaž generátora a následne sú uvedené priebehy jednotlivých elektrických veličín (napätia, prúdu, výkonu na záťaži a celkového výkonu). V tretej časti sú zvolené tri modelové aplikácie, u ktorých sa vyšetruje vhodnosť použitia generátora budeného rázmi ako napájacieho zdroja pre bezdrôtový snímací modul. V poslednej časti sa pristupuje k samotnému výpočtu hodnôt prvkov navrhovaného autonómneho monitorovacieho systému, pričom na konci je uvedená kompletná elektrická schéma systému a tabuľka s navrhnutými hodnotami jednotlivých elektrických prvkov.

Obsahom kapitoly 8 je experimentálne meranie hodnôt zrýchlenia rázov pomocou zakúpeného komerčného dataloggeru počas jazdy osobným automobilom za rôznych podmienok, simulácia chovania generátora na základe nameraných hodnôt a zhodnotenie získaných výsledkov, ktoré sú uvedené pre každé meranie v tabuľke 8.1. Z tých je zrejmé, že náš vibračný generátor je určite možné použiť ako napájací zdroj pre určité typy bezdrôtových snímacích modulov v aplikácii č.2, pri použití power management systému by sa dal použiť za určitých podmienok aj v aplikácii č.1, pre aplikáciu č.3 však generátor nie je pre zvolenú optimálnu záťaž vyprodukovať dostatočné množstvo energie. Pre zlepšenie jeho vlastností, najmä pre zvýšenie hodnoty napätia na záťaži (keďže generované napätie v grafoch v kapitole 8 je pomerne malé), by bolo potrebné pre toto zariadenie použiť cievku s väčším počtom závitov, čím by sme dostali vyššie hodnoty napätia. Generovaný výkon by bol potom približne rovnaký, znížila by sa ale veľkosť prúdu tečúceho záťažou.

Na záver treba podotknúť, že aj keď navrhovaný autonómny monitorovací systém z kapitoly 7 nebol zatiaľ prakticky odskúšaný, v budúcnosti sa počíta s overením jeho funkčnosti v praxi a v prípade, ak bude poskytovať uspokojivé výsledky, mohol by sa stať vhodnou alternatívou ku komerčne dostupným systémom na dnešnom trhu.

## 10. Zoznam použitých zdrojov

- [1] ENGELMAN, M.; JUDKINS, J.; VOHNOUT, S.; ENIKOV, E. Miniature MEMS-based Data Recorder for Prognostics and Health Management (PHM). In *2010 IEEE AUTOTESTCON. Orlando, 13-16 September, 2010*. IEEE, 2010, pp. 1-8. ISBN 978-1-4244-7960-3.
- [2] WEDDELL, A.S.; MERRETT, G.V.; BARROW, S.; AL-HASHIMI, B.M. Vibration-powered sensing system for engine condition monitoring. In *IET Conference on Wireless Sensor Systems (WSS 2012). London, 18-19 June, 2012*. IET, pp. 1-5. ISBN 978-1-84919-625-3.
- [3] CHRISTMANN, J.F.; BEIGNE, E.; CONDEMINE, C.; WILLEMIN, J.; PIGUET, C. Energy Harvesting and Power Management for Autonomous Sensor Nodes. In *2012 49th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC). San Francisco, 3-7 June, 2012*. IEEE, pp. 1049-1054. ISBN 978-1-4503-1199-1.
- [4] KUMARI, P.R.; CHAITANYA, S.P.K.; NIRMALA, M. Implementation of embedded shock and vibration monitoring system for underwater vehicles. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, December 2014, vol. 3, no. 12, pp. 8854-8857. ISSN 2278-1021.
- [5] *Newsteo Wireless Monitoring* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.newsteo.com>
- [6] *ShockWatch – Smart Solutions for Safe Transit* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.shockwatch.com/>
- [7] *Extech Instruments* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.extech.com/instruments/>
- [8] *MadgeTech – We Build Data Loggers* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.madgetech.com/>
- [9] *Vibration Meter Data Logger / Vibration Sentry RT128-16g* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://convergenceinstruments.com/product/vibration-data-logger-vibration-sentry-rt128-16g/>
- [10] *TSR PRO & TSR PRO-HB Shock Recorder with Triax Accelerometer* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://dtsweb.com/products/dtstsr.php>
- [11] HADAŠ, Z. et al. Energy Harvesting from Mechanical Shocks Using A Sensitive Vibration Energy Harvester. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, November 2012, vol. 9, no. 225. ISSN 1729-8806.
- [12] STEJSKAL, J. *Testování vibračního generátoru s podélnou cívkou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

- [13] JUROSZ, P. *Mechatronický návrh elektromagnetického vibračního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [14] HEGER, K. *Volba vhodné komerční elektroniky pro vibrační generátory VUT*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [15] VOREL, P.; PATOČKA M. *Průmyslová elektronika – skriptá*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2007. 151 p.
- [16] PRIYA, S.; INMAN, D. J. *Energy Harvesting Technologies*. New York: Springer Science+Business Media, 2009. 517 p. ISBN 978-0-387-76463-4.
- [17] *Achieving Significant Power from Renewables* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5330>
- [18] *BQ25504 Ultra Low Power Boost Converter with Battery Management for Energy Harvester | Nano-Power Management* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/BQ25504/description>
- [19] *Energy Harvesting PMIC Spansion* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en/ptm/s/spansion/energy-harvesting-pmic>
- [20] *LTC3331 - Nanopower Buck-Boost DC/DC with Energy Harvesting Battery Charger* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.linear.com/product/LTC3331>
- [21] *DIGI-SHOCK model GT Impact and Temperature Recorder* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://www.iogproducts.com/Impact\\_Recorder.aspx](http://www.iogproducts.com/Impact_Recorder.aspx)
- [22] HADAŠ, Z. *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Brno, 2007. 98 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně na Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Školitelé disertační práce doc. Ing. Vladislav Singule, Csc., doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, Csc.
- [23] *Rectifier* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://simple.wikipedia.org/wiki/Rectifier>
- [24] KHAN, F.; STOEBER, B.; SASSANI, F. Modeling and Simulation of Linear and Nonlinear MEMS Scale Electromagnetic Energy Harvesters for Random Vibration Environments. *The Scientific World Journal*, January 2014, vol. 2014, pp. 1-15. ISSN 2356-6140.
- [25] VOREL, P.; PROCHÁZKA, P. *Řídicí členy v elektrických pohonech – skriptá*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2009. 101 p.
- [26] *MSP430G2x53, MSP430G2x13 Mixed Signal Microcontroller* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/MSP430G2553/description>

- [27] *Guide to the MSP430G2 Launchpad (MSP-EXP430G2)* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://energia.nu/pin-maps/guide\\_msp430g2launchpad/](http://energia.nu/pin-maps/guide_msp430g2launchpad/)
- [28] *Článek Li-pol 3,7V/350mAh/20C* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.bel-shop.eu/cz-detail-1002-clanek-3-7v-350mah-20c.html>
- [29] *List of wireless sensor nodes* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_wireless\\_sensor\\_nodes](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_wireless_sensor_nodes)

## 11. Zoznam použitých symbolov

$m$	hmotnosť pohybujúcej sa časti generátora	[kg]
$b_m$	mechanické tlmenie generátora	[N.s.m <sup>-1</sup> ]
$b_e$	elektromagnetické tlmenie generátora	[N.s.m <sup>-1</sup> ]
$k$	celková tuhosť sústavy	[N.m <sup>-1</sup> ]
$x$	výchylka rezonančného mechanizmu	[rad]
$B$	magnetická indukcia	[T]
$L$	indukčnosť cievky	[H]
$u_i$	indukované napätie na cievke	[V]
$R_C$	odpor cievky	[Ω]
$R_L$	odpor záťaže	[Ω]
$I_i$	hodnota prúdového odberu pre daný mód modulu	[A]
$t_i$	doba prevádzky modulu v danom móde	[s]
$n$	počet pracovných módov	[-]

## 12. Zoznam použitých obrázkov

4.1	Blokový diagram autonómneho monitorovacieho systému pre snímanie opotrebovania podvozku helikoptéry.....	12
	Prevzaté z: [1]	
4.2	Detailná schéma diagnostického systému monitorujúceho motor trajektu.....	13
	Prevzaté z: [2]	
4.3	Bloková schéma autonómneho diagnostického systému s multiple-input / dual-output architektúrou .....	14
	Prevzaté z: [3]	
4.4	Blokový diagram monitorovacieho systému pre podvodné vozidlo.....	15
	Prevzaté z: [4]	
4.5	Datalogger Slam Stick Lite od firmy Midé.....	16
	Prevzaté z: P1	
4.6	Vibračný datalogger RT128-16g od firmy Convergence Instruments.....	17
	Prevzaté z: [9]	
4.7	Autonómny monitorovací systém MSR165 od firmy MSR Electronics so slotom pre microSD kartu na rozšírenie pamäte .....	18
	Prevzaté z: P3	
4.8	Vibračný datalogger TSR Pro od firmy DTS.....	19
	Prevzaté z: [10]	
5.1	Nákres rezonančného mechanizmu znázorňujúci princíp funkcie vibračného generátora.....	21
	Prevzaté z: [11]	
5.2	Všeobecná schéma elektromagnetického vibračného generátora.....	21
	Prevzaté z: [11]	
5.3	Model oceľovej vložky rámu a dvoch oceľových kužeľovitých hrotov reprezentujúcich spojenie medzi rámom a pákou rezonančného mechanizmu .....	22
	Prevzaté z: [13]	
5.4	Elektromagnetický vibračný generátor VUT v Brne použitý na diagnostiku.....	22
	Prevzaté z: [12]	
6.1	Schéma znázorňujúca možnosti využitia power management riešenia od firmy Maxim Integrated .....	24
	Prevzaté z: [17]	
6.2	Blokový diagram funkčných prvkov chipu MAX17710 .....	25
	Prevzaté z: P5	
6.3	Power management integrovaný obvod BQ25504 od firmy Texas Instruments .....	26
	Prevzaté z: [18]	
6.4	Blokový diagram funkčných prvkov chipu BQ25504 od firmy Texas Instruments..	26
	Prevzaté z: P6	
6.5	Power management integrovaný obvod MB39C811 od firmy Spansion .....	27
	Prevzaté z: [19]	
6.6	Blokový diagram funkčných prvkov chipu MB39C811 od firmy Spansion .....	27
	Prevzaté z: P7	
6.7	Referenčné zapojenie power management integrovaného obvodu LTC3331 od firmy Linear Technology .....	28
	Prevzaté z: [20]	
7.1	Bloková schéma všeobecného energy harvesting reťazca .....	29
	Prevzaté z: P7	

7.2	Blokový diagram energy harvesting systému znázorňujúci jeho jednotlivé funkčné prvky vrátane navrhovaného autonómneho diagnostického systému .....	30
7.3	Typický priebeh mechanického rázu .....	30
7.4	Priebeh vyfiltrovaného mechanického rázu z obr. 7.3 .....	31
7.5	Všeobecná schéma Graetzovho usmerňovača .....	32
	Prevzaté z: [23]	
7.6	Blokový diagram akcelerometra ADXL326 od firmy Analog Devices .....	33
	Prevzaté z: P10	
7.7	Vývojový kit MSP430 Value Line Launchpad s mikrokontrolérom M430G2553 od firmy Texas Instruments .....	35
7.8	SD Card Booster Pack vytvorený komunitou www.43oh.com .....	35
7.9	Rozloženie pinov mikrokontroléru M430G2553 na vývojovom kite s možnosťami použitia .....	36
	Prevzaté z: [27]	
7.10	Lítium-polymérový akumulátor od firmy Bel .....	37
	Prevzaté z: [28]	
7.11	Schéma zapojenia LDO regulátora TPS73133 od firmy Texas Instruments .....	37
	Prevzaté z: P12	
7.12	Celkový model použitého vibračného generátora vytvorený v prostredí Simulink... ..	39
7.13	Subsystem "Electromagnetic Vibration Generator" .....	40
7.14	Subsystem "Mechanical Part" (tlmené lineárne kmitanie s jedným stupňom voľnosti) .....	40
7.15	Subsystem "Faraday's Law" (výpočet indukovaného napätia) .....	41
7.16	Subsystem "Electronics" (AC-DC usmerňovač) .....	41
7.17	Priebeh energie generovanej pri rôznych hodnotách odporu záťaže .....	42
7.18	Priebeh napätia na záťaži pre odpor 250 $\Omega$ a frekvenciu budenia 1 Hz .....	43
7.19	Priebeh prúdu tečúceho záťažou pre odpor 250 $\Omega$ a frekvenciu budenia 1 Hz .....	43
7.20	Priebeh výkonu na záťaži pre odpor 250 $\Omega$ a frekvenciu budenia 1 Hz .....	44
7.21	Priebeh celkového výkonu pre odpor 250 $\Omega$ a frekvenciu budenia 1 Hz .....	44
7.22	Zjednodušená schéma napäťového zosilovača pre snímanie prúdu INA197 od firmy Texas Instruments .....	48
	Prevzaté z: P13	
7.23	Odporový delič napätia .....	49
7.24	Elektrická schéma celkového energy harvesting systému, schéma zapojenia zvoleného akcelerometra a schéma napájania s napäťovým regulátorom .....	50
8.1	Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde po hladkej ceste medzi obcami .....	52
8.2	Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde v obci počas dodržiavania maximálnej povolenej rýchlosti .....	53
8.3	Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde v obci Holešov po výrazne rozbitej vozovke .....	53
8.4	Priebeh zrýchlenia v smere osi Z pri jazde na diaľnici D1 po panelovom úseku .....	54
8.5	Priebeh napätia na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.1 .....	55
8.6	Priebeh prúdu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.1 .....	55
8.7	Priebeh výkonu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.1 .....	56
8.8	Priebeh celkového výkonu pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.1 .....	56
8.9	Priebeh napätia na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.2 .....	57
8.10	Priebeh prúdu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.2 .....	57
8.11	Priebeh výkonu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.2 .....	58
8.12	Priebeh celkového výkonu pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.2 .....	58
8.13	Priebeh napätia na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.3 .....	59
8.14	Priebeh prúdu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.3 .....	59

<b>8.15</b>	Priebeh výkonu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.3 .....	<b>60</b>
<b>8.16</b>	Priebeh celkového výkonu pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.3.....	<b>60</b>
<b>8.17</b>	Priebeh napätia na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.4.....	<b>61</b>
<b>8.18</b>	Priebeh prúdu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.4 .....	<b>61</b>
<b>8.19</b>	Priebeh výkonu na záťaži pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.4 .....	<b>62</b>
<b>8.20</b>	Priebeh celkového výkonu pri odpore 250 $\Omega$ pre meranie č.4.....	<b>62</b>

## 13. Zoznam použitých tabuliek

4.1	Prehľad najdôležitejších parametrov vybraných komerčných riešení .....	19
5.1	Hodnoty generovaného elektrického výkonu a napätia v závislosti od budiacich vibrácií a použitej záťaže .....	23
	Prevzaté z: [11]	
6.1	Prehľad dôležitých parametrov vybraných power management systémov.....	28
7.1	Hodnoty zrýchlenia vibrácií/rázov pôsobiacich na záves kolies pre rôzne typy vozidiel a rôzne povrchy .....	31
	Prevzaté z: [21]	
7.2	Základné parametre mikrokontroléru M430G2553 .....	34
	Prevzaté z: [26]	
7.3	Hodnoty spotreby elektrického prúdu v rôznych pracovných režimoch a napájacie napätie pre vybrané bezdrôtové snímacie moduly .....	38
7.4	Základné parametre použitého modelu vibračného generátora .....	39
7.5	Hodnoty maximálneho výkonu na záťaži pre rôzne hodnoty odporu záťaže a rôzne frekvencie opakovania rázu .....	42
7.6	Hodnoty spotrebovaného prúdu, napájacieho napätia, výkonu a odporu pre jednotlivé bezdrôtové snímacie moduly pre aplikáciu snímania teploty .....	45
7.7	Hodnoty spotrebovaného prúdu, napájacieho napätia, výkonu a odporu pre jednotlivé bezdrôtové snímacie moduly pre aplikáciu merania úhrnu zrážok.....	46
7.8	Hodnoty spotrebovaného prúdu, napájacieho napätia, výkonu a odporu pre jednotlivé bezdrôtové snímacie moduly pre aplikáciu analýzy vibrácií.....	46
7.9	Maximálne hodnoty elektrického napätia, prúdu, výkonu na záťaži a celkového výkonu pre zvolené frekvencie opakovania rázov a záťaž $250 \Omega$ .....	47
7.10	Navrhované hodnoty prvkov autonómneho monitorovacieho systému.....	51
8.1	Priemerné a maximálne hodnoty výkonu generovaného na záťaži pre 4 experimentálne merania.....	62

## 14. Zoznam elektronických príloh

- P1 Midé Slam Stick User Manual
- P2 Convergence Instruments RT128-16g Datasheet
- P3 MSR Electronics MSR165 Datasheet
- P4 DTS TSR Pro Datasheet
- P5 Maxim Integrated MAX17710 Datasheet
- P6 Texas Instruments BQ25504 Datasheet
- P7 Spansion MB39C811 Datasheet, Catalog
- P8 Linear Technology LTC3331 Datasheet
- P9 STMicroelectronics Schottky Diode 1N5817 Datasheet
- P10 Analog Devices ADXL326 Datasheet, Evaluation Board EVAL-ADXL326Z Datasheet
- P11 Texas Instruments MSP430G2553 Datasheet
- P12 Texas Instruments TPS73133 Datasheet
- P13 Texas Instruments INA197 Datasheet
- P14 Model vibračného generátora vytvorený v prostredí Simulink
- P15 M-file so zadanými parametrami vibračného generátora
- P16 Dátový súbor pre mechanický ráz nameraný v laboratóriu VUT
- P17 Elektronická verzia diplomovej práce