

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ENERGETICKY SOBĚSTAČNÝ BEZDRÁTOVÝ MODUL PRO
SENZORICKÉ APLIKACE.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

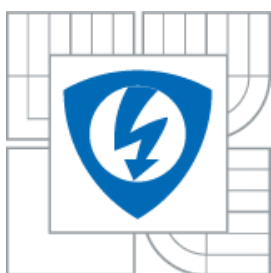
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RÓBERT JACKO

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLÓGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ENERGETICKY SOBĚSTAČNÝ BEZDRÁTOVÝ MODUL PRO SENZORICKÉ APLIKACE

ENERGY SELF-SUFFICIENT WIRELESS MODULE FOR SENSORIC APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RÓBERT JACKO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MILAN ŠIMEK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Róbert Jacko
Ročník 2

ID: 115189
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Energeticky soběstačný bezdrátový modul pro senzorické aplikace.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je návrh a vývoj energeticky soběstačného komunikačního modulu pro senzorické aplikace. Součástí práce je výběr nízkenergetické platformy a komplexní analýza energetické spotřeby. Jako cíl diplomové práce student vyvine prototyp bezdrátového modulu, který bude napájený z alternativního zdroje energie. Student navrhne i demonstrační aplikaci pro budoucí evaluaci systému. Součástí práce bude i vyhodnocení vhodnosti využití MESH technologie za účelem zvýšení spolehlivosti a snížení energetické náročnosti provozu.

DOPORUČENÁ LITERATÚRA:

- [1] Stojmenovic I., Handbook of Sensor Networks, Wiley, ISBN:13 978-0-471-8472-5, 2005.
[2] FARAHANI, Shahin. Zigbee Wireless Networks and Transceivers. [s.l.] : Elsevier, 2008. 329 s. ISBN 978-0-7506-8393-7

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Milan Šimek, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Predseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Výzkum popsaný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji semestrální práci na téma **Energeticky soběstačný bezdrátový modul pro senzorické aplikace**, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom a praktickou realizáciou bezdrôtového senzorového modulu. Primárnou požiadavkou na tento modul je jeho energetická sebestačnosť. V tomto kontexte sa práca dostáva k téme takzvaného „zberu energie“, známejšej pod výstižnejším anglickým termínom „*Energy harvesting*“. Následne sú z pohľadu energetických nárokov porovnané bezdrôtové komunikačné platformy, ktoré sú vhodné na realizáciu zadaného modulu. Zo spomenutých technológií bola vybraná komunikačná platforma IQRF. V ďalšej časti sa už práca venuje vlastnému návrhu prototypu senzorového modulu, ktorý bude demonštrovaný na aplikácii merania smeru prúdenia vetra. Práca popisuje jeho hardvérové i softvérové riešenie. Nasleduje podrobná analýza jeho vlastností z pohľadu energetickej náročnosti. Na základe meraní sú stanovené nároky na zdroj energie pokrývajúci spotrebu senzoru.

Masters thesis deals with design and practical implementation of wireless sensor module. The primary requirement for this module is its energy self-sufficiency. In this context, the work gets to the subject of "energy harvesting". Then, in terms of energy requirements, several wireless communication platforms which are favorable for the selected application, are compared. From mentioned technologies was chosen communication platform IQRF. The next parts deals with initial prototype of sensor module, which will be demonstrated as the application of measuring wind direction. This paper describes the hardware and software solution. Followed by a detailed analysis of its properties in terms of energy requirements. Based on the obtained measurements resource parameters are set.

Poďakovanie

Chcel by som sa týmto poďakovať vedúcemu práce Ing. Milanovi Šimekovi, Ph.D. za plodné a otvorené diskusie, Ing. Pavlovi Hanákovi, Ph.D. za pomoc s osadením miniatúrneho obvodu, svojej rodine a blízkym za morálnu podporu a Lívii za obrovskú dávku tolerancie a obetavosti.

OBSAH

1 ÚVOD	10
2 ENERGY HARVESTING	11
2.1 Úvod a história.....	11
2.2 Makro a mikro Energy harvesting.....	12
2.2.1 Makro Energy harvesting	12
2.2.2 Mikro Energy harvesting	12
2.3 Metódy získavania energie a ich potenciál.....	13
2.3.1 – Fotovoltaický zdroj	13
2.3.2 – Termoelektrický článok.....	14
2.3.3 – Konverzia mechanickej energie	14
2.3.4 – RF prijímače.....	15
2.4 Pokročilý energetický manažment	16
3 TEORETICKÝ ÚVOD	17
3.1 Prehľad dostupných RF technológií.....	17
3.2 Platforma IQRF.....	19
3.3 Sensory polohy – enkodéry	23
3.3.1 Úvod.....	23
3.3.2 Inkrementačné a absolútne enkodéry.....	23
3.3.3 Mechanické enkodéry.....	24
3.3.4 Elektromagnetické enkodéry	25
3.3.5 Optické enkodéry	26
4 ANALÝZA VLASTNOSTÍ MODULU IQRF TR-55-DA Z POHĽADU SPOTREBY ENERGIE	28
4.1 Analýza závislosti doby trvania dátového prenosu od veľkosti paketu	28
4.2 Analýza spotreby modulu v závislosti na úrovni vysielacieho výkonu	31
4.3 Analýza dosahu v závislosti na úrovni vysielacieho výkonu	33
4.4 Analýza potenciálu úspory energie využitím distribuovaného prenosu dát	35
5 VLASTNÝ NÁVRH SENZORU	37
5.1 Požiadavky na sebestačný senzorový modul.....	37
5.2 ZDROJ A SPRÁVA ENERGIE.....	39
5.2.1 Zdroj – DC motor s prevodovkou	39

5.2.2 Energy Harvesting modul.....	42
5.2.3 Energetický potenciál mechanických impulzov	47
5.3 Návrh enkodéru	52
5.4 Optimalizácia vzorkovacieho kmitočtu senzoru	57
5.5 Návrh DPS	60
5.6 Návrh konštrukčného riešenia.....	62
5.7 Program a optimalizácia energetických nárokov senzoru.....	64
5.8 Zhodnotenie energetickej sebestačnosti konfigurácie	68
6 ZÁVER	71
POUŽITÉ ZDROJE.....	72
ZOZNAM PRÍLOH	74

1 ÚVOD

V priebehu poslednej dekády zaznamenali bezdrôtové technológie pomerne dynamický vývoj a ich nasadzovanie si postupne našlo uplatnenie v mnohých odvetviach. Nesporná výhoda bezdrôtového prenosu dát, miniaturizácia a znižovanie finančných nákladov na zaobstaranie vyspelých bezdrôtových technológií podporili rozvoj senzorických sietí. Senzorické siete poskytujú rozsiahle možnosti zberu informácií rôzneho charakteru. Za nasadením sensorovej siete je vždy snaha o získanie kvalitnej informovanosti v danej oblasti za účelom zvýšenia efektivity, možnosti predpovedí, zvýšenia bezpečnosti, alebo akejkolvek inej výhody či služby. Môže ísť o rôzne druhy priemyselnej automatizácie, monitoringu pohybu, monitoring prítomnosti chemických látok, zber meteorologických dát a podobne. Takéto siete bežne obsahujú obrovské počty uzlov (senzorových jednotiek) umiestnených v priestore. Často sa jedná o ťažko dostupné miesta bez možnosti sieťového napájania. Preto je u bezdrôtových jednotiek kladený dôraz na ich rozmery, hmotnosť, výdrž batérií, spoľahlivosť a dosah rádiového prenosu. V prípade, kedy je senzor takmer neprístupný a nemá možnosť externého napájania, môže byť činnosť siete výrazne limitovaná kapacitou inštalovaných batérií. Periodické zásahy spojené s ich výmenou či dobitím v takomto prípade môžu predstavovať pomerne vážne technické problémy a značné finančné náklady. Táto práca má za cieľ preskúmať možnosti minimalizovať spotrebu týchto zariadení na tak nízku úroveň, aby bolo možné ich napájanie aj z pomerne neštandardných zdrojov energie s veľmi malým výkonom, avšak neobmedzenou dostupnosťou. Táto myšlienka je známa pod anglickým termínom „*Energy harvesting*“. Tomuto pojmu je v rámci tejto práce venovaná samostatná kapitola. Vo voľnom preklade tento termín znamená „*zber/žatva energie*“. Myšlienka je postavená na periodickom získavaní malého množstva energie až do momentu, kedy je nazhromaždené dostatočné množstvo energie aspoň na jeden pracovný cyklus napájaného systému. Takto napájaný systém je možné nazvať sebestačný a z pohľadu napájania je bez údržbový. Vďaka energeticky sebestačným bezdrôtovým jednotkám, môžu byť senzorové siete nasadzované do náročnejších prostredí a rozsiahlejších priestorov. V rámci diplomovej práce bude realizovaný demonštratívny senzor smeru prúdenia vetra napájaný z mechanických výchyliek smerovky, kopírujúcej smer vetra.

2 ENERGY HARVESTING

2.1 Úvod a história

Anglický termín „*Energy harvesting*“ v preklade znamená zber, respektíve žatvu energie. Trochu výstižnejší je preklad do češtiny „*sklizeň energie*“. Význam tohto termínu sa zakladá práve na slove zber. Podobne ako je to pri zberaní úrody, kedy postupne po malých množstvách je zozbierané veľké množstvo plodiny, je v tomto zmysle chápaná energia. V tejto práci bude anglické znenie „*Energy harvesting*“ uvádzané ako technický pojem označujúci spôsob získavania energie.

Pod *Energy harvesting* je vo všeobecnosti možné zaradiť všetky obnoviteľné zdroje energie. Dobrým príkladom je solárna, či veterná energia. Solárne elektrárne sa v angličtine často označujú pod pojmom „*Solar field – solárne pole*“ a veterné elektrárne sú často nazývané ako „*Wind farm – veterná farma*“. Tieto vcelku prirodzené názvy zdrojov energie dobre naznačujú pohľad na energiu, ako na surovinu, ktorú je možné periodicky získavať z dejov prítomných v okolí. Táto myšlienka rozhodne nie je nová. Využitie prirodzených vlastností sveta okolo človeka za účelom zjednodušenia jeho rôznych činností je možné nájsť už v pomerne dávnej minulosti. Potenciál veternej energie ľudstvo úspešne zúročilo v podobe plachetnicových plavidiel, či v podobe mlynu obilia. Priekopníci vo využívaní veternej energie boli Holanďania. Ich vo všeobecnosti známi počín, využívať vetrom poháňané vodné pumpy na získavanie novej pevniny, je obdivovaný dodnes. Vodné mlyny sa postupne stali bežným vybavením technicky napredujúcej Európy. Energia, ktorá bola formou *Energy harvesting*–u získavaná v minulosti mala mechanický charakter. Práca sa bude ďalej venovať *Energy harvesting*-u v kontexte elektrickej energie.

2.2 Makro a mikro Energy harvesting

Na periodické získavanie energie z nejakého voľne dostupného zdroja je možné hľadieť z dvoch perspektív – mikro a makro. Makro perspektíva, už bola spomenutá v rámci úvodu a historických súvislostí. Mikro perspektíva je výrazne mladšia, ale o to inovatívnejšia a perspektívnejšia. O energy harvesting a jeho členení pojednáva publikácia firmy Texas Instrumensts [16].

2.2.1 Makro Energy harvesting

Makro Energy harvesting predstavuje získavanie pomerne veľkého objemu energie. Ide o výkony rádovo v jednotkách kW až desiatkach MW. Je to výkon, ktorý dokáže plnohodnotne zastúpiť energiu získanú konvenčnými zdrojmi. V súčasnosti zažíva táto oblasť dynamické obdobie. V snahe nasadzovať obnoviteľné zdroje dochádza k pomerne ostrej konfrontácii medzi environmentálnou, ekonomickou a technickou podstatou veci. Napriek tomu sa pravdepodobne budú obnoviteľné zdroje energie zásadne podieľať na zabezpečovaní energetických potrieb spoločnosti. Energy harvesting v makroskopickom meradle si určite zaslúži pozornosť a snahu o rozvoj.

2.2.2 Mikro Energy harvesting

Mikro Energy harvesting predstavuje získavanie veľmi malých objemov energie. Jedná sa o výkony rádovo v stovkách μW až desiatkach mW. Tento výkon určite nedokáže uspokojiť potreby klasických spotrebičov, ale vzhľadom k rýchlemu pokroku v oblasti špeciálnych, jednoúčelových zariadení s veľmi nízkymi energetickými nárokmi, vzniká priestor kde i veľmi malé objemy energie dokážu byť plne dostačujúce. Práve Energy harvesting v mikroskopickom meradle je pre túto prácu veľmi aktuálny a práca sa ním bude podrobne zaoberať.

2.3 Metódy získavania energie a ich potenciál

Vzhľadom k skutočnosti, že už výkon rádovo v jednotkách μW dokáže byť postačujúci na činnosť niektorých nenáročných zariadení, je možné siahť aj po menej bežných zdrojoch, ktoré by v bežnej spotrebnej elektronike nemali opodstatnenie. Preto je škála metód ako získavať energiu i po veľmi malých objemoch pomerne pestrá. Medzi najbežnejšie zdroje, ktoré majú najbližšie k praktickému nasadeniu sú fotovoltaické články, termoelektrické články, konvertory mechanickej energie a elektromagnetické konvertory (RF prijímače).

2.3.1 – Fotovoltaický zdroj

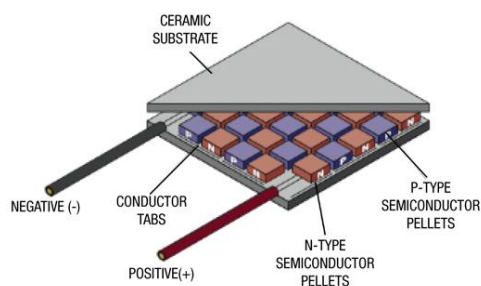
Fotovoltaické články sa veľmi úspešne presadili ako plnohodnotné zdroje elektrickej energie pre nenáročné zariadenia. Veľmi rozšírené sú napríklad kalkulačky, ktoré sú napájané výlučne z malého fotovoltaického článku. Ide o názorný príklad sebestačného zariadenia. Výhodou solárnej energie je najväčšia hustota konvertovateľnej energie na elektrickú energiu s pomedzi ostatných spôsobov mikro energy harvesting. Prispôbenie výkonu zdroja požiadavkám daného zariadenia je len otázkou rozmeru, alebo počtu solárnych článkov. Zásadnou nevýhodou môže byť fakt, že denné svetlo, ktoré je na konverziu energie najvhodnejšie, nie je za bežných okolností dostupné nepretržite. Tento nedostatok je pomerne jednoducho riešiteľný doplnením o batériu, ktorú v čase dostupného osvetlenia bude solárny článok nabíjať. Výkony solárnych článkov, ktoré dokážu samostatne napájať elektronické zariadenia sa pohybujú od stoviek mW až po desiatky W.



Obr. 2.3.1.1 Fotovoltaický článok 0,5W, rozmer: 70 x 55mm

2.3.2 – Termoelektrický článok

Jednou z metód ako získať malé množstvo elektrickej energie je termoelektrický článok. Tento druh konvertoru využíva teplotné rozdiely, ktoré sú bežne prítomné vo väčšine prostredí. Napríklad ľudské telo je oproti okoliu teplejšie bežne o viac ako 10°C. Množstvo elektrických spotrebičov vytvára oproti okoliu teplotné rozdiely rádovo v desiatkach °C. Spaľovacie motory, priemyselné stroje či iné technologické procesy vytvárajú teplotné rozdiely v stovkách až tisíckach °C. Toto všetko predstavuje potenciálny priestor, kde by mohli byť aplikované zariadenia napájané termočlánkom. Termoelektrické články dokážu poskytnúť napätie zhruba 0,1V už pri teplotnom rozdiely 1°C.

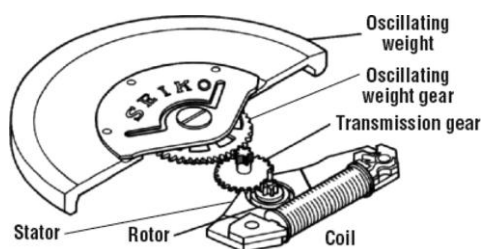


Obr. 2.3.2.1 Bloková schéma termoelektrického článku, prevzaté z [14]

2.3.3 – Konverzia mechanickej energie

Ďalšou formou získavania elektrickej energie je konverzia mechanickej energie. Tá býva často dostupná buď to v podobe sekundárnych vplyvov prítomných v danom prostredí, alebo je priamo spojená s činnosťou zariadenia. Napríklad vibrácie a rôzne druhy zrýchlení sú vo významnej miere prítomné hlavne u mobilných zariadení. U mnohých zariadení je z ich povahy nutná nejaká forma interakcie v podobe fyzického kontaktu. Napríklad otočenie potenciometrom, či prepnutie spínača. Tieto mechanické vplyvy majú veľmi dobrý energetický potenciál a je možné využiť ich ako primárny zdroj elektrickej energie pre nenáročné zariadenia.

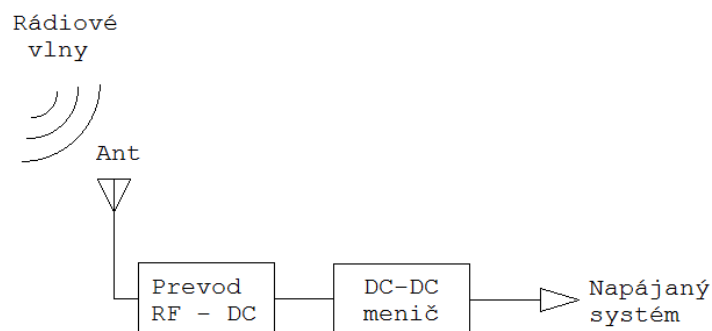
Demonštratívny senzor smeru vetra bude napájaný práve mechanicou energiou vetra, ktorá vychýľuje smerovku senzoru. Toto pootočenie bude mechanicky prenesené na malý generátor, čím vznikne napäťový impulz trvajúci po dobu pohybu smerovky. Konkrétne riešenie a jeho výsledné parametre budú diskutované v samostatnej kapitole.



Obr. 2.3.3.1 Napájanie hodínok značky Seiko z pohybu, prevzaté z [6]

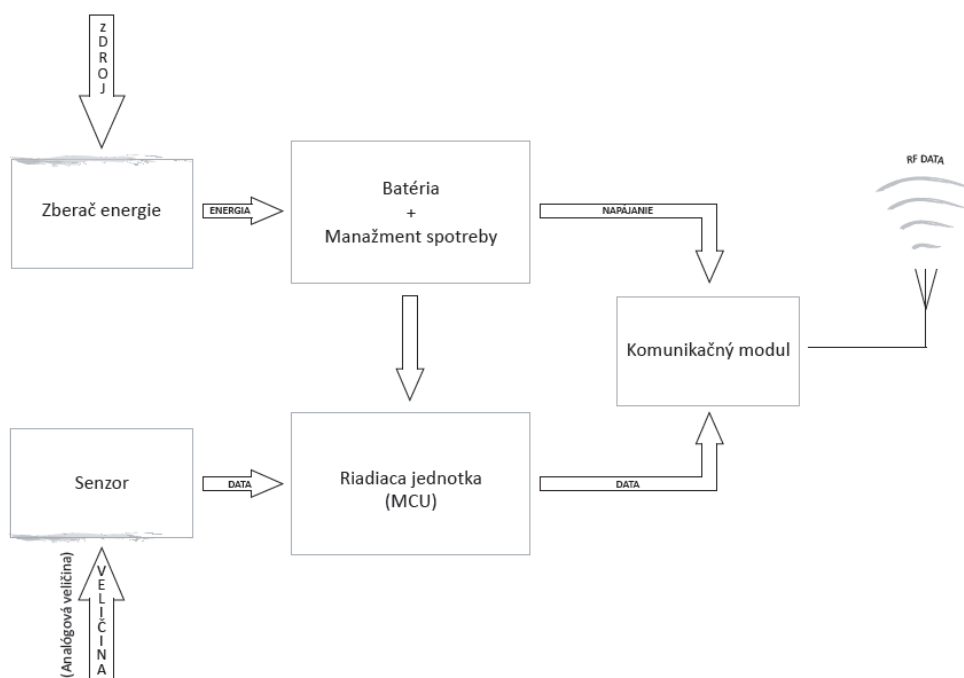
2.3.4 – RF príjimače

Dnes už prakticky neexistuje priestor, ktorý by nebol v dosahu nejakého rádiového signálu. Jedná sa o televízne vysielanie, rádiové vysielanie, mobilné siete, dátové siete, alebo iné druhy bezdrôtových služieb. Spoločne sa tieto rádiové systémy podieľajú na celkovej hustote energie, ktorá je v danom prostredí dostupná. Táto energia, často nazývaná aj ako elektromagnetický smog, predstavuje potenciál pre napájanie energeticky nenáročných zariadení. Príjem signálu pomocou vhodnej antény dokáže pri dostatočnej intenzite elektromagnetického poľa predstavovať užitočný a akumulovateľný objem energie. Výhodou je priestorovo veľmi široká dostupnosť energie bez časových obmedzení. Mimo príjem energie zo spomínaného elektromagnetického smogu, je možné cielene pokryť požadovaný priestor vysielaním elektromagnetických vln pomocou vysielача. Takto je možné dosiahnuť príjem väčšieho objemu energie, na úkor obmedzeného priestoru.



Obr. 2.3.4.1 Bloková schéma konverzie elektromagnetického signálu na napájacie napätie

2.4 Pokročilý energetický manažment



Obr. 2.4.1: Bloková schéma energeticky sebestačného senzorového modulu

Na vyššie uvedenej blokovej schéme je znázornený princíp napájania energeticky nezávislého senzorového modulu. Ide o zariadenie, ktorého okamžitá spotreba je podstatne vyššia ako je výkon zdroja. U týchto zariadení je bežné, že sú aktívne len po veľmi krátku dobu, nevyhnutne potrebnú na získanie potrebných dát a ich následnému prenosu. Po vykonaní pracovného cyklu nasleduje prechod do režimu spánku. v tomto režime je dosiahnutá veľmi nízka spotreba energie. Výsledná energia potrebná na celý pracovný cyklus sa rovná súčtu energie spotrebovanej počas aktivity modulu a v režime spánku. Čím bude doba v režime spánku dlhšia, tým bude nižšia priemerná spotreba zariadenia. Dostatočne dlhými intervalmi medzi jednotlivými meraniami je možné dosiahnuť stav, kedy zberač energie dokáže počas nečinnosti modulu získať viac energie ako je potrebné na jeden pracovný cyklus zariadenia. Ak bude táto energia akumulovaná, môže byť následne celá jednorázovo spotrebovaná aktivitou zariadenia. Takto vzniká systém, ktorý sa dokáže periodicky zotavovať bez potreby externého zdroja energie. Cieľom tejto práce je nájsť rovnováhu medzi možnosťami energy harvestingu a funkčnými parametrami bezdrôtového senzorového modulu, tak aby bolo možné vytvoriť skutočne sebestačné a pritom plne funkčné zariadenie.

3 TEORETICKÝ ÚVOD

3.1 Prehľad dostupných RF technológií

V snahe vyvinúť energetický sebestačný senzorový modul, je mimoriadne dôležitý výber komunikačnej platformy. Rádiový prenos je z pohľadu energetických nárokov modulu majoritným spotrebičom. V tejto kapitole je stručný prierez komunikačných platforiem, ktoré sú na danú aplikáciu vhodné a často nasadzované. Základným parametrom ich vzájomného porovnania je energia potrebná na odoslanie dátového paketu. Porovnávané sú platformy Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee a ANT. Porovnanie vychádza z dokumentu [10]. Podrobnejšie informácie k technológiám sú dostupné z [2] pre platformu BLE, z [17] pre platformu ZigBee a z [3] pre platformu ANT.

Pri porovnávaní bola použitá nasledujúca konfigurácia periodického dátového prenosu:

Veľkosť paketu: 8bit
Vzdialenosť: 30cm
Interval prenosu: 120s
Napätie zdroja: 3,3V

	Platforma		
	BLE	ZigBee	ANT
Citlivosť prijímača	-87 dBm	-102dBm	-85dBm
Prijímací výkon	0 dBm	0 dBm	0 dBm
Kmitočet	2,4GHz	2,4GHz	2,4GHz
Rádiový obvod	CC2450	XBee S2	AP2
Programovateľnosť	Áno	Áno	Áno
Doba súťaže o médium	100 ms	100 ms	10 ms
Periódna medza medzi paketmi	100 ms	100 ms	250 ms

Tab. 2.2.1: Charakteristické parametre porovnávaných technológií

Pre správne porovnanie energetickej náročnosti na jeden pracovný cyklus je potrebné brať do úvahy sumu spotrebovanej energie po dobu trvania dátového prenosu a počas doby, kedy je modul v režime spánku. Nasledujúca tabuľka porovnáva tieto tri komunikačné platformy v absolútnej spotrebe energie počas jednej periódy.

	Platforma		
	BLE	ZigBee	ANT
Čas jedného spojenia	1150ms	250ms	930ms
Prúd v režime spánku	0,78uA	4,18uA	3,1uA
Prúd v činnosti	4,5mA	9,3mA	2,9mA
Minimálny prúd počas 120 sekundového intervalu	10,1uA	15,7uA	28,2 uA
Optimálna doba spánku	10,0s	14,3s	15,3s

Tab. 2.2.2: Výsledky experimentálnych meraní

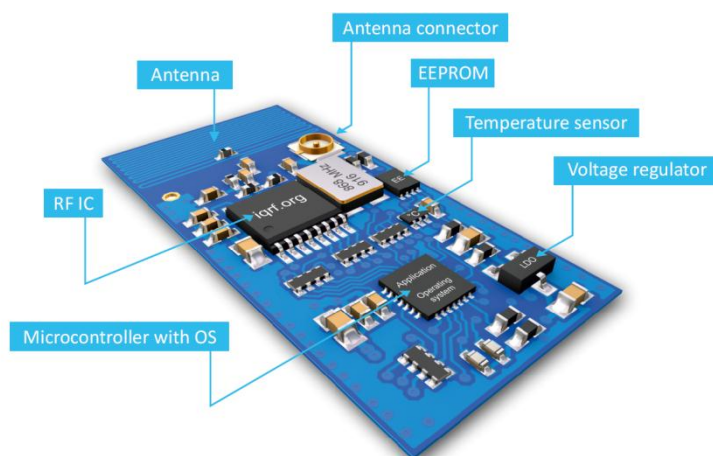
Na základe nameraných dát je možné tvrdiť, že technológia BLE je vhodná na aplikácie, kde sú dlhé pauzy medzi jednotlivými paketmi a to vďaka nízkej spotrebe počas režimu spánku, ktorá predstavuje len 18,6% spotreby platformy ZigBee a 25,2% spotreby platformy ANT. S pomedzi porovnávaných technológií má ZigBee síce najväčšiu spotrebu v režime spánku, čo je pri dlhých intervaloch medzi paketmi nevýhoda, ale oproti BLE a ANT mu na prenos paketu po zotavení z režimu spánku postačuje zhruba štvrtina času. ZigBee tak spotrebuje na jeden paket len 45% energie, ktorú spotrebuje za rovnakých okolností BLE a 86,2% energie potrebnej na prenos paketu na platforme ANT. Vo výslednom porovnaní je na tom najlepšie spotreba ZigBee a spotreba platformy ANT je len o 8,5% vyššia. Spotreba BLE bola pri tejto konfigurácii až o 86,5% vyššia ako spotreba ZigBee. Za vysokou spotrebou BLE je pomerne dlhá doba, ktorá je potrebná na odoslanie paketu. Túto nevýhodu dokáže kompenzovať nízka spotreba v režime spánku v prípade, že interval jedného pracovného cyklu bude minimálne 15 minút. Záleží teda od konkrétnej aplikácie, ktorá dokáže niektorú z technológií využiť efektívnejšie. V detailnejšom porovnaní ANT a ZigBee, kde technológia ANT spotrebuje o spomínaných 8,5% energie viac, môže pri rozhodovaní zavážiť fakt, že maximálny výkon počas vysielania paketu je u ANT zhruba o tretinu nižší. V praxi to znamená menšie nároky na zdroj, čo môže byť pri návrhu miniatúrnych zariadení kľúčové.

V tomto porovnaní nebola zahrnutá menej známa platforma IQRF od českej firmy Microrisc s.r.o. Technológia IQRF ponúka zaujímavý spôsob programovania a hlavne sľubuje mimoriadne nízke energetické nároky pri dlhých dosahoch s integrovanými anténami. Táto práca si mimo jej primárny cieľ, prezentovať sebestačný modul, zobrala ako druhotný cieľ preskúmať možnosti platformy IQRF a následne ich porovnať s rozšírenejšími komunikačnými platformami.

3.2 Platforma IQRF

IQRF je bezdrôtová komunikačná platforma vyvíjaná českou firmou Mikrorisc s.r.o. od roku 2004. Primárne je táto platforma zameraná na aplikácie, kde sú postačujúce malé objemy prenášaných dát pri malých prenosových rýchlostiach a pri minimálnych energetických nárokoch. Zväčša sa jedná o rôzne nasadenia v priemyselnej automatizácii, senzorických sieťach, monitorovacích systémoch, inteligentných budovách a iných inovatívnych projektoch.

Hlavnou snahou tvorcov tejto komunikačnej platformy bolo vyvinúť flexibilný a otvorený systém, s čo najjednoduchšou implementáciou do praxe. Výsledná podoba produktov z platformy IQRF je dobre prezentovaná na nasledovnom obrázku.



Obr. 2.3.1: Komunikačný modul, prevzaté z [13]

Po hardvérovej stránke platforma IQRF ponúka veľmi komplexné moduly, ktoré pre finálnu aplikáciu stačí doplniť len o nevyhnutné periférie a napájanie. Moduly sú k dispozícii v niekoľkých variantoch konfigurovaných tak, aby v čo najväčšej miere vyhovovali potrebám danej aplikácie a neobsahovali pri tom nepotrebné vybavenie. Medzi voliteľné súčasti patria LED diódy, integrovaná anténa, konektor externej antény, senzor teploty či regulátor napätia. Všetky komunikačné moduly sú realizované na miniatúrnej doske formátu SIM karty, na ktorej sú integrované všetky potrebné komponenty. Toto riešenie umožňuje veľmi jednoduchú integráciu modulu do finálneho zariadenia prostredníctvom SIM slotu.

Hardvérové riešenie tejto komunikačnej platformy je doplnené o softvérovú nadstavbu, ktorá vo výraznej miere urýchľuje implementáciu vlastnej aplikácie. Moduly IQRF majú na doske integrovaný mikrokontrolér z rodiny PIC na ktorom je nahraná spomínaná softvérová nadstavba. Je to forma operačného systému, ktorá obsluhuje hardvérové komponenty a služby s nimi súvisiace. Operačný systém má predkonfigurovaný komunikačný protokol a všetky dôležité funkcie ako ADC prevody, PWM regulácie, časovače a podobne. Následná tvorba programu pre konkrétne zariadenie predstavuje len konfiguráciu daných parametrov a volanie požadovaných funkcií. Operačný systém v sebe zahŕňa pokročilý sieťový protokol IQMESH a funkciu bezdrôtového programovania RFPGM – RF Programming. Táto funkcia umožňuje aktualizovať program v zariadeniach inštalovaných v teréne bez nutnosti individuálneho zásahu na každom z inštalovaných zariadení.

Kombinácia modulárneho hardvérového riešenia a flexibilného operačného systému vytvára veľmi dobré pracovné prostredie pre vývoj vlastných zariadení postavených na tejto platforme. To je podporené dobrými technickými parametrami, ktoré vytvárajú veľkorysé možnosti uplatnenia. Hlavné výhody sú malé fyzické rozmery, výborný rádiový dosah a nízke energetické nároky. V nasledujúcej tabuľke je ucelený prehľad technických parametrov.

Series		TR-52B	TR-53B	TR-52D	TR-54D	TR-55D	TR-62D	TR-72D	TR-82D
Mounting		SIM	SIM / SMT / Vertical	SIM	SMT	Vertical		SIM	
Pins		8	9	8	18	12		8	
I/O		6	7	6	12	10		6	
MCU		PIC16F886			PIC16LF1938				
MCU	Flash memory	8 K × 14 b			16 K × 14 b				
	RAM	368 B			1024 B				
	EEPROM				256 B				
Serial EEPROM				2 KB					
RF IC		MRF49XA				SI4431	SI4455	SI4461	
RF bands		EU/US				world-wide			
RF power (max.)		3.5 mW				20 mW			
RF range *		700 m		850 m			**		
LDO voltage regulator		yes			–			yes	
Supply voltage		3.1 – 5.3 V			2.2 – 3.4 V			3.1 – 5.3 V	
Supply current	Sleep	2 µA		1.8 µA	380 nA			**	
	Receiving	LP	400 µA		330 µA			**	
		XLP	35 µA		25 µA			**	
Temperature sensor		standard	–	precision	–			precision	
LEDs		2			–			2	
A/D inputs		2	3		4	3			**
Wireless M-Bus		–				yes	–	–	yes
IQRF OS		yes			–			–	yes
Dimensions [mm]	without antenna	25.0 × 14.9	28.4 × 14.9	25.0 × 14.9	20.2 × 14.9	–			25.0 × 14.9
	with antenna	31.8 × 14.9	33.6 × 14.9	31.8 × 14.9	26.4 × 14.9	27.4 × 14.9	31.8 × 14.9		

* Up to specified value in free space

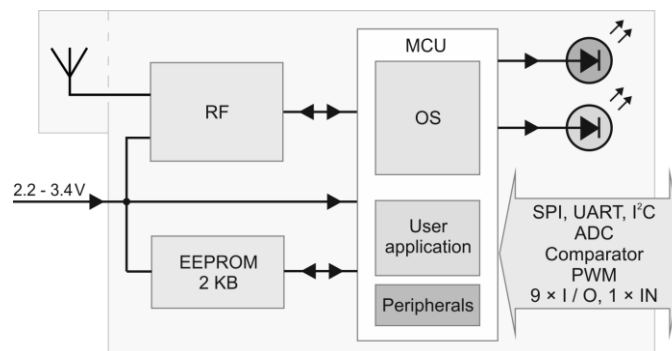
** To be specified

All parameters specified here are for guidance only, may depend on conditions and are subject to change. For exact parameters refer to IQRF datasheets and manuals.

Tab. 2.3.1: Prehľad technických parametrov modulov z portfólia IQRF, prevzaté z [13]

Platforma IQRF kladie silný dôraz na zrýchlenie vývoja zariadení postavených na tomto systéme. Všetky hardvérové aj softvérové možnosti tejto platformy sú do maximálnej možnej miery flexibilné a prepracované tak, aby nevytvárali zbytočné prekážky spomaľujúce realizáciu projektov. Technické riešenie tejto práce bude postavené práve na platforme IQRF s cieľom preskúmať možnosti tejto perspektívnej alternatívy k známejším komunikačným systémom etablovaných na trhu priemyselných aplikácií a senzorických sietí.

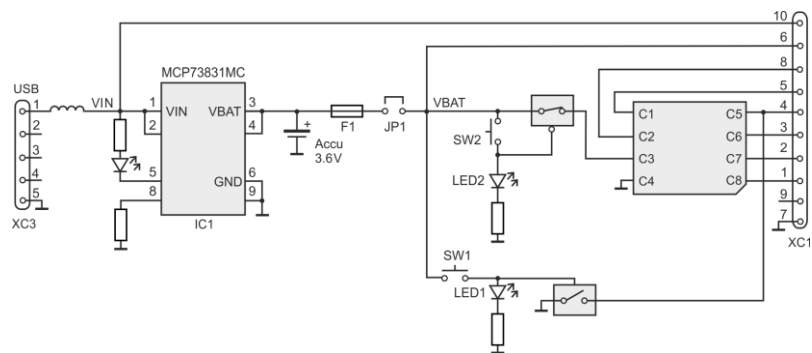
Ako základ bezdrôtového senzoru bol zvolený rádiový modul IQRF TR-55-DA. O výbere z ostatných dostupných variant z portfólia platformy IQRF rozhodli nasledovné hardvérové parametre. Napájanie modulu v rozsahu 2,2-3,4V je dobrým predpokladom na použitie batériového zdroja. Modul TR-55DA má integrované 2 LED diódy, ktoré boli užitočné pri prvých testovacích programoch a pri následnom ladení programu pre senzor vlhkosti. Ďalší integrovaný komponent bola anténa. Platforma IQRF ponúka moduly aj bez integrovanej antény, ktoré sú vhodnejšie pre finálne produkty, kde už sú známe nároky na rozmer zariadenia, tvar, rozmer a umiestnenie antény, či iné požiadavky. V tomto prípade vlastnosti integrovanej antény neboli nijak limitujúce. Bloková schéma modulu TR-55-DA je na nasledujúcom obrázku.



Obr. 2.3.2.1: Bloková schéma modulu TR-55D, prevzaté z [15]

Na prácu s komunikačným modulom bol použitý vývojový kit DK-EVAL 04. Tento vývojový komponent výrazne urýchľuje realizáciu prvotných projektov na platforme IQRF. Je kompatibilný so všetkými aktuálnymi verziami komunikačných modulov. Vo veľmi praktickej forme replikuje porty a s nimi súvisiace hardvérové možnosti daného modulu. Zároveň je na doske vývojového kitu obsiahnutá dvojica tlačidiel a indikačných diód, ktoré zásadne

uľahčujú testovanie a ladenie vyvíjanej aplikácie. Kompaktné rozmery umožňujú zostavený prototyp nasadiť aj v teréne a testovať zariadenie v reálnych podmienkach. Za týmto účelom má tento komponent integrovanú batériu s pomerne štedrou kapacitou 400mAh. Výborná úžitková hodnota tohto kitu poukazuje na filozofiu platformy IQRF, ktorá sa snaží byť v maximálnej možnej miere užívateľsky prívetivá v snahe zjednodušiť vývoj zariadení postavených na tejto technológii. Vývoj pre špecifické aplikácie je tak ušetrený o riešenie elementárnych problémov a môže sa priamo sústrediť na hardvér a softvér súvisiaci s cieľovým produktom.



Obr. 2.3.3.1: Schéma zapojenia vývojového kitu DK-EVAL-04, prevzaté z [5]

3.3 Senzory polohy – enkodéry

3.3.1 Úvod

Enkodéry - senzory polohy, môžeme na základe charakteru sledovaného pohybu rozdeliť na enkodéry posuvné a enkodéry rotačné. Posuvný enkodér informuje o polohe, respektíve o veľkosti zmeny lineárneho pohybu v danom rozsahu. Rotačný enkodér ekvivalentne ako posuvný informuje o polohe, respektíve o veľkosti jej zmeny vo vzťahu k natočeniu okolo osi. V oboch prípadoch je rozsah pohybu rozdelený do rozlišovacích úrovní - elementárnej veľkosti detekovateľnej zmeny polohy.

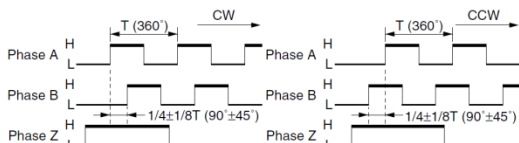
3.3.2 Inkrementačné a absolútne enkodéry

Na základe formy interpretácie informácie o zmene polohy sa enkodéry delia na absolútne a inkrementačné. Inkrementačný enkodér informuje o relatívnej zmene polohy vždy o jeden rozlišovací stupeň – krok. Zároveň informuje o smere posunu, či sa jedná o krok vpred (kladná výchylka), alebo krok vzad (záporná výchylka). Na základe tejto informácie môže nadradený systém stále aktualizovať hodnotu vektoru (jednorozmernú súradnicu) reflektujúceho reálnu polohu sledovaného pohyblivého prvku.

Voltage Output: E6C3-CWZ3EH

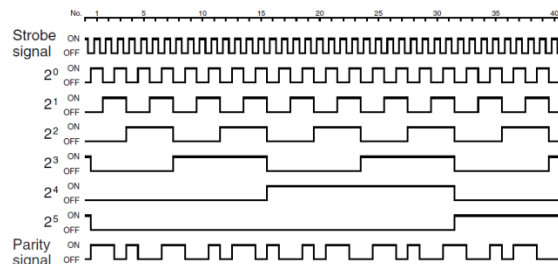
Complementary Output: E6C3-CWZ5GH

Rotating direction: Clockwise (CW) (As viewed from the face of the shaft) Rotating direction: Counterclockwise (CCW) (As viewed from the face of the shaft)



Note: Phase A is $1/4 \pm 1/8 T$ faster than phase B. Note: Phase A is $1/4 \pm 1/8 T$ slower than phase B.

Rotating direction: CW, as viewed from the face of the shaft.
Resolution: 40



Obr. 3.3.2.1: Porovnanie priebehu signálu inkrementačného (v ľavo) a absolútneho enkodéru (v pravo), prevzaté z [19]

Kým inkrementačný enkodér informuje len o relatívnej zmene polohy, čo môže byť náročné na synchronizáciu a presnosť, absolútny enkodér umožňuje vyjadriť okamžitú pozíciu v sledovanom rozsahu jednoznačnou hodnotou. Ako dobrý príklad absolútneho enkodéru je možné uviesť potenciometer s lineárnou charakteristikou. Aktuálna hodnota odporu tohto potenciometra presne zodpovedá jeho fyzickej polohe v rámci vlastného rozsahu. Toto je

dobre predstaviteľný príklad, v praxi sa však bežne nevyskytuje. Výhodou tohto analógového riešenia je spojená informácia o polohe, ale na základe mechanickej opotrebovateľnosti je toto riešenie málo praktické. Oveľa častejšie je poloha a jej zmena vyjadrená binárnou informáciou. Na obrázku č. 2.4.1 je uvedený príklad inkrementačného a absolútneho enkodéru.

Princíp inkrementačného enkodéru spočíva v sledovaní obdĺžnikového signálu so symetrickou šírkou pulzu dvoma senzormi. Sensory sú vzájomne posunuté tak, aby sledovaný obdĺžnikový signál detekovali so vzájomným fázovým posunom o 90° resp. $\pi/2$. Rozlíšenie tohto druhu senzoru je definované počtom pulzov priradeného na sledovaný rozsah pohybu. Výhodou je, že pohyb sledovaného prvku generuje len jeden periodický obdĺžnikový signál, ktorý môže byť v podstate nekonečne dlhý a poloha je detekovaná vždy len pomocou dvoch senzorov.

Princíp absolútneho enkodéru do istej miery kopíruje princíp inkrementačného. Aj v tomto prípade pohyb generuje binárny signál obdĺžnikového tvaru. Reálne absolútny enkodér generuje N binárnych signálov. Rozlíšenie enkodéru je potom 2^N krokov pre daný fyzický rozsah pohybu. Absolútna poloha je jednoznačne vyjadrená unikátnou kombináciou signálových úrovní. Zvyšovanie rozlíšenia je v tomto prípade podmienené možnosťou pridávania ďalších samostatných signálov respektíve kanálov. Podobne ako je to zaužívané pri charakterizovaní rozlíšenia ADC prevodníkov, aj rozlišovacie schopnosti digitálnych absolútneho enkodérov je praktické vyjadriť v bitoch.

Ďalším charakteristickým delením enkodérov je delenie na základe spôsobu generovania obdĺžnikového signálu. Konkrétne je enkodéry možné deliť na mechanické, elektromagnetické a optické.

3.3.3 Mechanické enkodéry

Obdĺžnikový periodický signál je u mechanických enkodérov generovaný spínaním fyzického kontaktu. Na sledovanej pohyblivej časti musia byť zakomponované také mechanické prvky, ktoré pri pohybe umožnia prepínanie stavu spínača. Toto býva ťažko realizovateľné pri rozmernejších pohyblivých častiach s veľkým rozsahom a dynamikou pohybu. Typické uplatnenie mechanického enkodéru je napríklad v audiotechnike v podobe "nekonečného potenciometra" na ovládanie hlasitosti. V týchto aplikáciách sa jedná o inkrementačné rotačné enkodéry s rozlíšením 12 až 24 krokov na jednu celú otočku.

Zásadnou výhodou tohto typu enkodéru je jeho cena. Mechanický enkodér ma pomerne slabú odolnosť voči dynamickým zmenám polohy a pri nepretržitej prevádzke má aj pomerne malú životnosť. Ďalšou jeho typickou vlastnosťou je mechanický odpor, ktorý môže byť v rôznych aplikáciách prekážkou. Práve preto je bežne nasadzovaný v rôznych ovládacích prvkoch, kde užívateľ plynulou zmenou polohy nastavuje priradený parameter a toto nastavenie sa mení len v sporadických intervaloch. Mechanická odozva na ovládací prvok je v tomto prípade žiaduca.



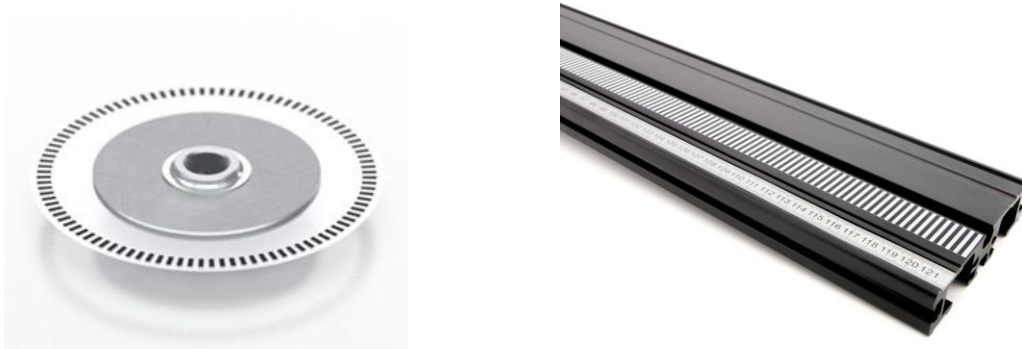
Obr. 3.3.3.1: Mechanický enkodér na ovládanie hlasitosti

3.3.4 Elektromagnetické enkodéry

Elektromagnetické enkodéry majú oproti mechanickým zásadnú výhodu v rýchlosti snímania a životnosti. Majú pritom nulový mechanický odpor, preto tento typ enkodéru býva bežne integrovaný v DC motoroch. Snímač je realizovaný pomocou Hallovej sondy a jeho rozlíšenie býva pomerne nízke – rádovo jednotky krokov na otočku motora. Výhodou je schopnosť snímať pulzy aj pri vysokých otáčkach motora. Čo umožňuje nadradenému systému kontrolovať reálne otáčky motora a počítať rôzne súvisiace parametre.

3.3.5 Optické enkodéry

Optické enkodéry majú vďaka svojim vlastnostiam veľmi široké uplatnenie v mnohých podobách. Snímač optického enkodéru býva realizovaný v dvoch typických formách – tienidlový a reflektívny.



Obr. 3.3.5.1: Optický rotačný (v ľavo) a posuvný enkodér (v pravo) [21]

Tienidlová forma je postavená na optozávore. Princíp optozávory spočíva v jednoduchej konfigurácii svetelného zdroja a fotosenzoru, kedy svetelný zdroj (bežne IR LED dióda) svieti priamo na senzor (fototranzistor). V priestore medzi svetelným zdrojom a fotosenzorom je detekovaná prítomnosť prekážky zmenou z typického stavu logickej 1 na stav logickej 0. Obdĺžnikové pulzy sú generované zatienením a odkrývaním priestoru medzi zdrojom a fotosenzorom. Toto je možné dosiahnuť perforovaným tienidlom, ktoré je pevnou súčasťou pohyblivej časti daného objektu. Plynulým pohybom tienidla sa budú v pravidelných intervaloch striedať plné a otvorené časti, ktoré sú fotosenzorom detekované ako periodický obdĺžnikový signál. Tento typ enkodéru je nasadzovaný v robotike a automatizovaných výrobných linkách. Tam splňuje prísne požiadavky na dlhú životnosť, rýchlu odozvu a vysoké rozlišovacie schopnosti. Bežné rozlíšenie enkodérov tohto druhu sú rádovo stovky až jednotky tisíc impulzov na otočku. Týmto parametrom zodpovedá aj cena, ktorá je pomerne vysoká.



Obr. 3.3.5.2: Tienidlový rotačný enkodér (disk je vyrobený zo skla a na skle je v pravidelných rozstupoch nanosená čierna optická stopa, ktorá striedavo zatieňuje odkrýva optozávoru. To pri otáčavom pohybe generuje požadovaný signál) [20]

Druhou formou je reflektívny optický enkodér - skener. Aj tento druh senzoru je realizovaný pomocou svetelného zdroja a fotosenzoru. V tomto prípade, je zdroj svetla orientovaný súbežne s aktívnym záberom fotosenzoru. V dostatočnej blízkosti telesa, respektíve odrazovej plochy, dokáže fotosenzor reagovať na odrazenú časť zdrojom vyžarovaného svetla. Množstvo odrazeného svetla je okrem vzdialenosti od odrazovej plochy závislé na jej schopnosti reflektovať svetlo. Tú je možné veľmi jednoducho definovať farbou odrazovej plochy. Striedavým nanosením svetlých a tmavých značiek na pohyblivú časť objektu vzniká opticky skenovateľná stopa. Veľkou výhodou je, že skener sníma len povrch pohybujúceho sa telesa. Typickým nasadením tohto typu enkodéru sú rôzne dopravníkové pásy či plotre. Pozdĺž celého rozsahu priamočiareho pohybu je umiestnená optická značka, ktorá je pohybujúcou sa časťou zariadenia skenovaná. Dĺžka tejto stopy prakticky nie je ničím limitovaná a jej realizácia je finančne nenáročná (napr. pomocou čiernobielej pásky).

4 ANALÝZA VLASTNOSTÍ MODULU IQRF TR-55-DA Z POHĚADU SPOTREBY ENERGIE

4.1 Analýza závislosti doby trvania dátového prenosu od veľkosti paketu

Pomocou osciloskopu bolo zmerané trvanie odoslania paketu o danej veľkosti. Všetky podmienky, ako napájacie napätie a vysielačový výkon boli zachované. Analyzované boli časy potrebné na odoslania paketu o dĺžke 1B, 32B a 64B.

Výsledky meraní:

Paket	Doba prenosu	Čas na 1B
1B	7,21ms	7,21ms
32B	20,54ms	0,64ms
64B	33,86ms	0,53ms

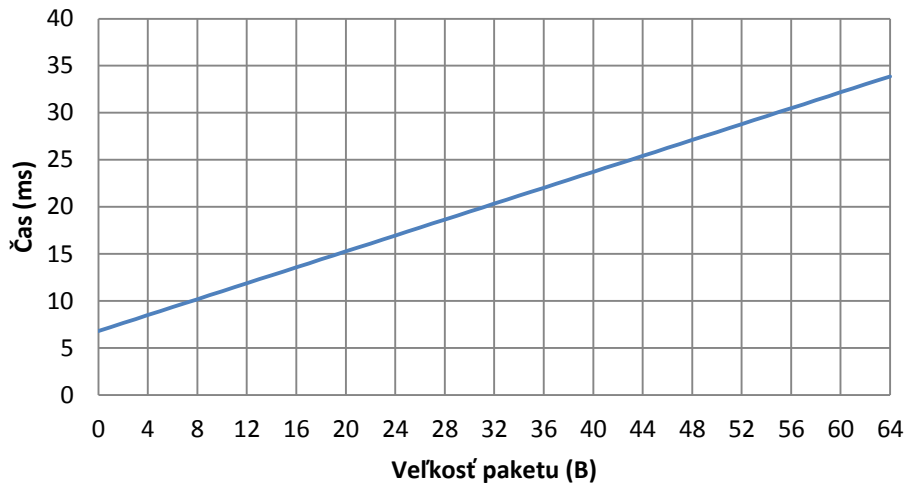
Tab. 4.1.1: Dovočet doby potrebnej na prenos 1B dát pre pakety o troch dĺžkach

Z rozdielov času potrebného na odoslania paketu o rôznej dĺžke bolo možné vypočítať čistý čas potrebný na odoslania 1B. Časový rozdiel medzi odoslaním 32B a 64B paketu bol 13,32ms. Prenos 1B trval 0,416ms. Rozdiel v trvaní prenosu 1B a 32B bol 13,33ms na 1B pripadal čas 0,43ms. Rozdiel v trvaní prenosu 1B a 64B bol 26,65ms na 1B pripadal čas 0,423ms. Z týchto výsledkov je možné predpokladať konštantnú dobu potrebnú na odoslania 1B dát, ktorá v priemere predstavuje 0,423ms. Pred samotným prenosom dátového obsahu je vysielačový modul aktívny za účelom naviazania spojenia. V tomto režime je spotreba modulu rovnaká ako pri samotnom prenose dát. Čas potrebný na nadviazanie spojenia bol určený výpočtom na základe predpokladanej doby prenosu 1B dát 0,423ms. Pre tri analyzované dĺžky paketu boli zistené tieto časy:

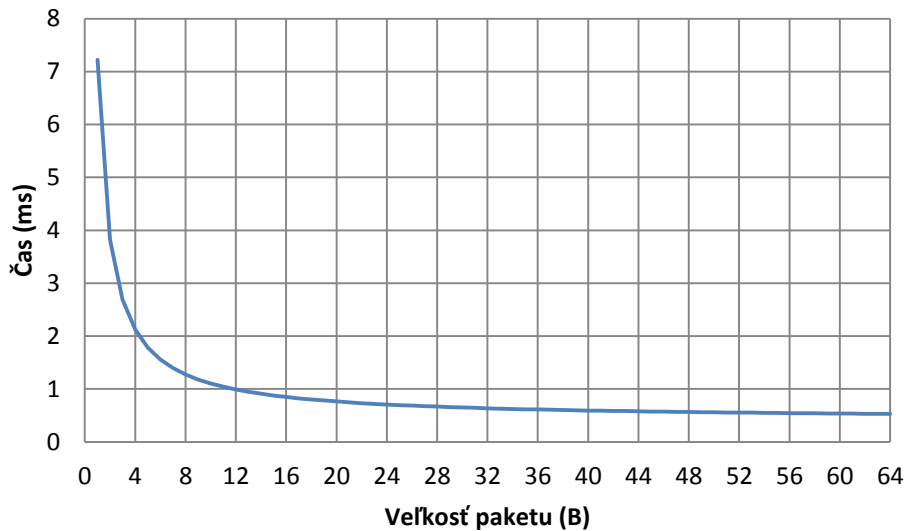
Paket	Doba prenosu	Čas na nadviazanie spojenia
1B	7,21ms	6,79ms
32B	20,54ms	7,00ms
64B	33,86ms	6,79ms

Tab. 4.1.2: Dovočet doby potrebnej na nadviazanie spojenia pre pakety o troch dĺžkach

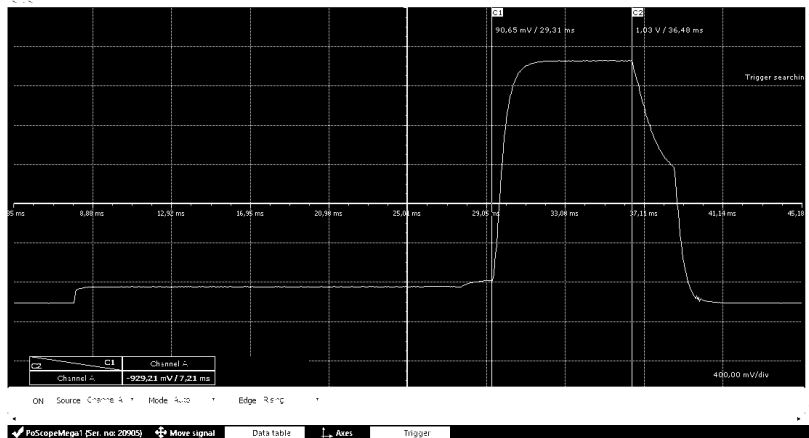
Opakovaným meraním by bolo možné výsledky spresniť, ale už aj na základe týchto troch meraní je možné predpokladať, že na nadviazanie spojenia je potrebná konštantná doba. Výsledná doba T_p potrebná na odoslanie jedného paketu je rovná $T_c + N \cdot T_b$, kde T_c je doba potrebná na zostavenie spojenia, N je počet odosielaných bajtov a T_b je doba potrebná na odoslanie 1B.



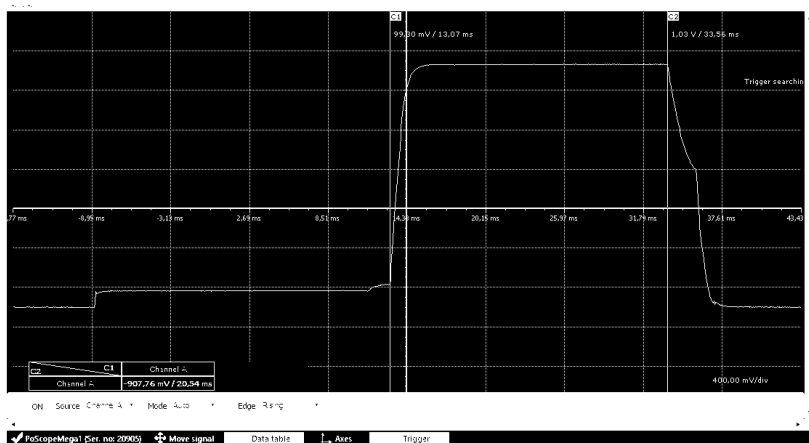
Graf 4.1.1: Závislosť doby potrebnej na prenos paketu od dĺžky (1-64B)



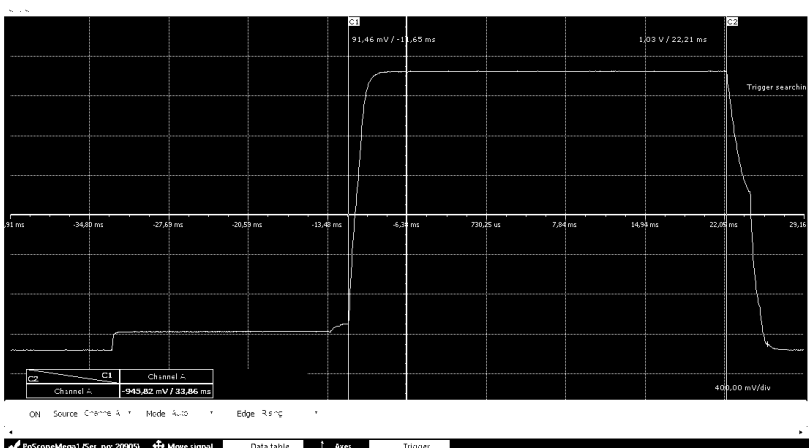
Graf 4.1.2: Merná doba potrebná na prenos 1B dát pre pakety dĺžky 1-64B



Obr. 4.1.1: Záznam z osciloskopu – prechod z režimu spánku a odoslanie paketu veľkosti 1B



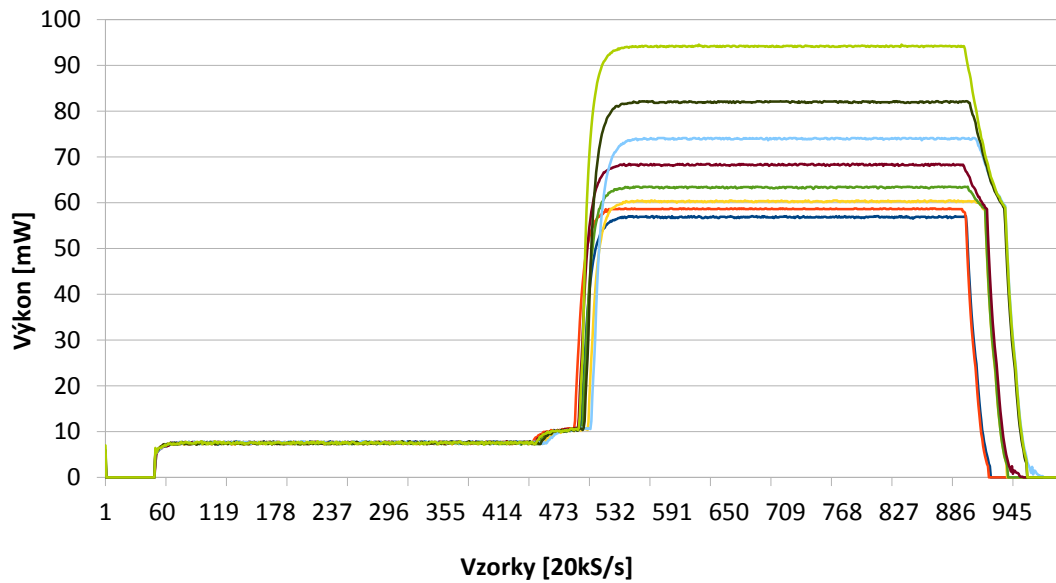
Obr. 4.1.2: Záznam z osciloskopu – prechod z režimu spánku a odoslanie paketu veľkosti 32B



Obr. 4.1.3: Záznam z osciloskopu – prechod z režimu spánku a odoslanie paketu veľkosti 64B

4.2 Analýza spotreby modulu v závislosti na úrovni vysielacieho výkonu

Komunikačná platforma IQRF prostredníctvom softvérovej nadstavby integrovanej v moduloch umožňuje jednoduchou zmenou parametru konfigurovať úroveň vysielacieho výkonu rádiového modulu v ôsmich úrovniach. Z pohľadu spotreby energie je táto možnosť veľmi dôležitá. Preto bolo potrebné analyzovať mieru, akou sa zmena vysielacieho výkonu podieľa na celkovej zmene spotreby elektrickej energie sensorového modulu. Modul mal naprogramovanú cyklickú činnosť popísanú stavovým diagramom v kapitole 5.4. Postupne bola nakonfigurovaná úroveň vysielacieho výkonu od najnižšej až po najvyššiu. Odosielaný bol vždy jeden paket o veľkosti 32B. Zariadenie bolo napájané konštantným napätím 4,93V a jeho okamžitá spotreba bola analyzovaná osciloskopom. Osciloskopom bol analyzovaný úbytok napätia na impedancii známej hodnoty, ktorá bola zaradená do série pred napájacie svorky modulu. Z úbytku napätia na tejto impedancii bol vypočítaný prúd, ktorý dodával zdroj do obvodu. Z týchto hodnôt bola vypočítaná okamžitá spotreba modulu. V grafe č. 4.2.1 je zobrazený priebeh okamžitého výkonu počas pracovného cyklu modulu pre všetkých 8 meraní. Zo zmeny okamžitého výkonu je možné určiť moment, kedy modul prešiel z režimu spánku a začal vykonávať programovú rutinu, kedy bol spustený ADC prevod a z najvýraznejšieho nárastu okamžitej spotreby je pomerne zrejmý aj moment, kedy bol zapnutý rádiový modul a odoslaný paket s následným prechodom do režimu spánku. Energia potrebná na jednotlivé časti pracovného cyklu je úmerná ploche pod priebehom okamžitého výkonu zariadenia. Táto energia je uvedená v tabuľke č. 4.2.1. Z nameraných údajov je zrejmé, že majoritná spotreba energie sensorového modulu je práve počas vysielania paketu. Preto by pri optimalizácii spotreby takéhoto zariadenia mal byť kladený dôraz na správnu konfiguráciu dátového prenosu. Reálny rozdiel v spotrebovanej energii medzi jednotlivými vysielacími výkonmi je skutočne markantný. Správnym nastavením úrovne vysielacieho výkonu a obmedzením prenášaného objemu dát na nutné minimum je možné násobne znížiť energetické nároky zariadenia.



Graf 4.2.1 Export z osciloskopických analýz prenosu paketu o veľkosti 32B pri rôznych úrovniach vysielacieho výkonu

Energia spotrebovaná na pracovný cyklus								
TX Level	0	1	2	3	4	5	6	7
Energia (nWh)	367,39	380,57	396,54	417,62	450,54	489,80	538,66	612,61

Energia spotrebovaná na programovú časť								
TX Level	0	1	2	3	4	5	6	7
Energia (nWh)	41,35	40,80	40,92	40,58	41,23	41,41	40,92	41,08

Energia spotrebovaná na prenos dát								
TX Level	0	1	2	3	4	5	6	7
Energia (nWh)	326,04	339,76	355,62	377,03	409,31	448,39	497,74	571,53

Tab. 4.2.1 Porovnanie jednotlivých úrovni vysielacieho výkonu z pohľadu celkovej spotrebovanej elektrickej energie

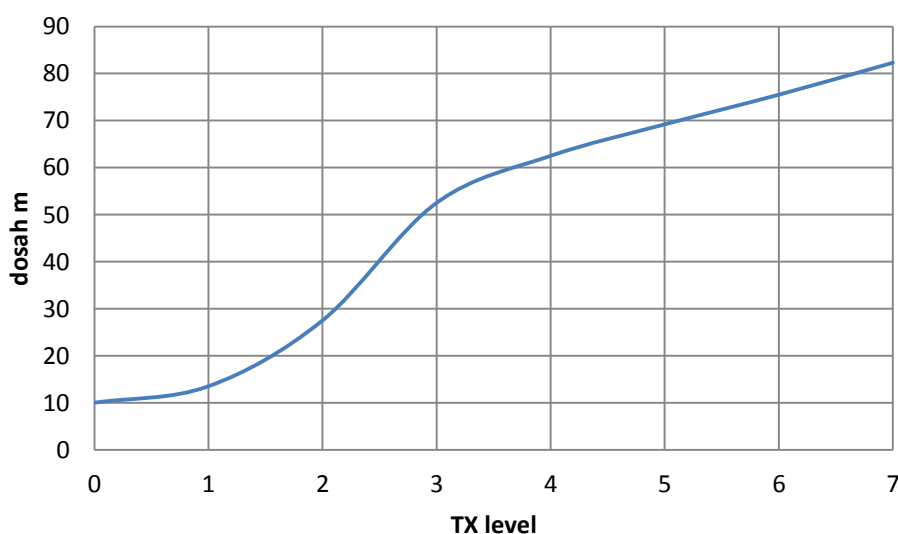
4.3 Analýza dosahu v závislosti na úrovni vysielacieho výkonu

Dosah rádiového prenosu je u senzorových sieti podstatný parameter. Nie vždy je však potrebný maximálny dosah. V prípadoch, kedy sú prenosové vzdialenosti kratšie, je vhodné znížiť vysielací výkon rádiového modulu na adekvátnu úroveň a to z dvoch príčin. Jednou je úspora energie, ktorá je u zariadení napájaných z batérii mimoriadne žiaduca a druhou príčinou je menšie zahltenie priestoru signálom, ktorý môže pre iné zariadenia predstavovať nežiaduce rušenie. Meranie dosahu rádiového signálu bolo prispôbené jednému z predpokladaných nasadení, kedy je centrálny zber dát umiestnený v budove a senzory sú rozmiestnené v teréne. V tomto prípade je dosah ovplyvnený útlmom stavebných častí budovy a rušením z bežných spotrebičov.

Samotné meranie prebiehalo postupne od najnižšieho výkonu po najvyšší. V tomto prípade bol vysielateľ umiestnený v budove na prvom nadzemnom podlaží. Prijímač bol konfigurovaný tak, aby indikoval funkčný dátový prenos na LED dióde. Postupným vzdialovaním prijímaču od vysielacieho modulu bola hľadaná maximálna vzdialenosť, pri ktorej bola komunikácia stále funkčná. V nasledujúcej tabuľke sú namerané výsledky.

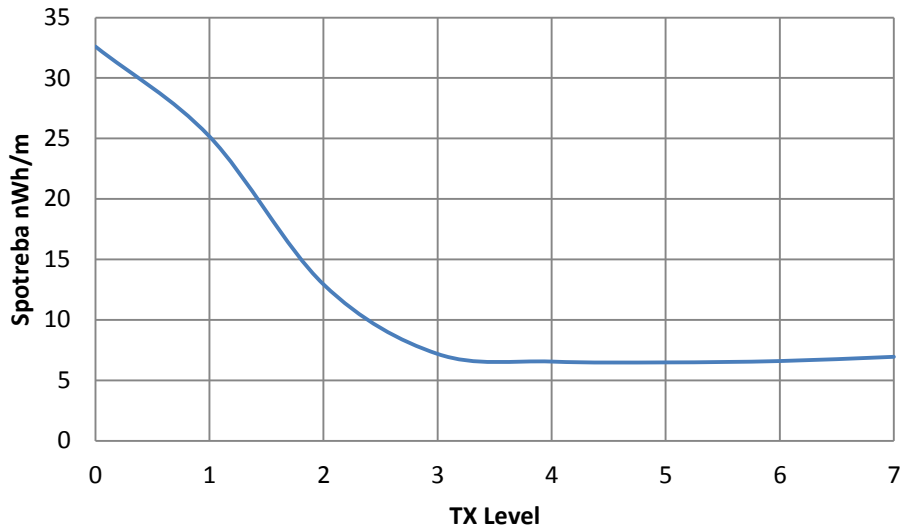
TX level	0	1	2	3	4	5	6	7
Dosah m	10	13,5	27,5	52,5	62,5	69,2	75,5	82,3

Tab. 4.3.1: Dosahy rádiového signálu pre jednotlivé úrovne výkonu



Graf 4.3.1: Grafické znázornenie závislosti dosahu signálu od vysielacieho výkonu

Zo zistených dosahov a známych energetických nárokov na odoslanie paketu pri danej úrovni vysielacieho výkonu je možné vyjadriť energiu potrebnú na prenos paketu na vzdialenosť 1m.



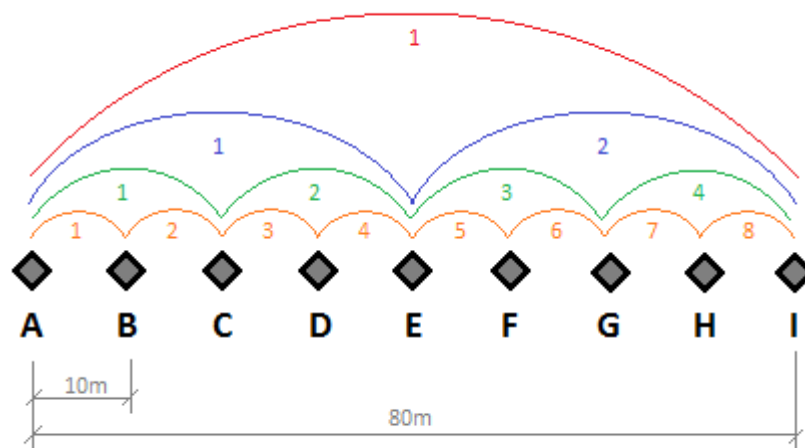
Graf 4.3.2: Merná spotreba energie potrebnej na prenos paketu na vzdialenosť 1m pre jednotlivé úrovne vysielacieho výkonu

Zo zistených merných energetických nárokov potrebných na dosah rádiového signálu na vzdialenosť 1m je zrejmé, že prvé 3 výkonové úrovne boli za týchto okolností málo efektívne. Energetický náklad potrebný na 1m dosahu sa postupne s vyšším vysielacím výkonom znižoval. Od štvrtej výkonovej úrovne dosahuje vysielateľ najlepšiu efektívnosť a s ďalším navýšením vysielacieho výkonu vzrastá dosah lineárne. Za okolností, kedy je potrebné hľadať vyvážený pomer spotreby zariadenia a dosahu dátového prenosu, je vhodnou úrovňou vysielacieho výkonu TX Level 3. Spotrebuje len o 12% viac energie ako TX Level 0 a pričom bol zaznamenaný až 5 násobný dosah signálu. Nižší vysielací výkon má preto zmysel len v prípadoch, kedy väčší rádiový dosah nepredstavuje nijaký benefit ani za cenu lepšej efektivity. Vtedy je vyššia spotreba modulu zbytočná.

4.4 Analýza potenciálu úspory energie využitím distribuovaného prenosu dát

Vzhľadom k schopnosti senzorových sietí vytvárať pokročilé topológie (napr. IQMESH na platforme IQRF, LightWeight MESH na platforme ZigBee a pod.) je možné znížiť vysielačový výkon jednotlivých uzlov tejto siete. Stačí totiž, aby bola zabezpečená komunikácia medzi susednými uzlami a následne sa dáta budú šíriť vytvorenou sieťou až k adresátovi distribuovane. V tejto kapitole bude vyhodnotená energetická účinnosť distribuovaného prenosu dát a zhodnotený potenciál eventuálnej úspory energie.

Na nasledujúcom obrázku je znázornený príklad jednoduchej siete, na ktorej bude energetická výhodnosť distribuovaného prenosu dát posudzovaná. Sieť pozostáva z deviatich uzlov A – I v pravidelných rozstupoch 10m. Najväčšia vzdialenosť v sieti je medzi hraničnými uzlami A a I, ktorá predstavuje 80m.



Obr. č.4.4.1 Zjednodušená topológia demonštratívnej senzorovej siete

Prenos dát z uzlu A do uzlu I môže byť realizovaný týmito spôsobmi:

- Cesta I: priama komunikácia uzlu A a I
 potrebný vysielačový výkon TX7
 odoslaný 1 paket na ktorý bola spotrebovaná energia 571nWh
 celková energia spotrebovaná na prenos bola 571nWh
 efektivita prenosu bola 7,13nWh/m

- Cesta II: komunikácia uzlu A a I prostredníctvom uzlu E
potrebný vysielací výkon TX3
odoslané 2 pakety, na každý bola spotrebovaná energia 377nWh
celková energia spotrebovaná na prenos bola 759nWh
efektivita prenosu bola 9,42nWh/m
- Cesta III: komunikácia uzlu A a I prostredníctvom uzlov C, E a G
potrebný vysielací výkon TX2
odoslané 4 pakety, na každý bola spotrebovaná energia 355nWh
celková energia spotrebovaná na prenos bola 1420nWh
efektivita prenosu bola 17,75nWh/m
- Cesta IV : komunikácia uzlu A a I prostredníctvom všetkých medziľahlých uzlov
potrebný vysielací výkon TX0
odoslaných 8 paketov, na každý bola spotrebovaná energia 326nWh
celková energia spotrebovaná na prenos bola 2608nWh
efektivita prenosu bola 32,6nWh/m

Z porovnania celkovej energie potrebnej na prenos dát z uzlu A do uzlu I je možné jednoznačne konštatovať, že je výhodnejší taký prenos, ktorý pozostáva z minimálneho počtu skokov a je využitý plný dosah rádiového modulu. V prípade, že je prioritná práve úspora energie celého systému, je vhodné komunikačný protokol konfigurovať tak, aby hľadal cesty bez zbytočných skokov. Distribuovaný prenos dát môže byť výhodný v prípade, kedy má uzol kritický stav batérie a už by nebol schopný ďalej odosielať dáta s plným vysielacím výkonom. Vtedy môžu byť dáta odoslané k najbližšiemu uzlu s najnižším možným vysielacím výkonom a tie budú následne sprostredkované cieľovému uzlu. Celkovo bude v systéme spotrebované väčšie množstvo energie, ako by to bolo pri prenose informácie priamo na cieľový uzol. Významnou pridanou hodnotou na úkor efektivity je možnosť predĺženia životnosti batérie daného uzlu na úkor zvýšenej spotreby energie susedného uzlu. V prípade, že v sieti sa nachádzajú uzly, ktoré majú trvalé napájanie, a ich vlastná spotreba nie je prioritná, je možné distribuovaným prenosom dát cielene zaťažiť práve tieto uzly a šetriť tak energiu na uzloch, ktoré majú obmedzené možnosti napájania.

5 VLASTNÝ NÁVRH SENZORU

5.1 Požiadavky na sebestačný senzorový modul

Ako demonštratívna aplikácia pre energeticky sebestačný systém bol zvolený senzor smeru prúdenia vetra. Tento druh aplikácie v sebe spája potrebu digitalizácie analógovej informácie, jej zaznamenávanie a prenos za účelom ďalšieho využitia a zároveň zaujímavý energetický potenciál dynamiky prúdenia vzduchu. Pri riešení týchto požiadaviek sa uplatní bezdrôtový komunikačný modul IQRF TR-55DA, ktorého energetické nároky sú analyzované v samostatnej kapitole tejto práce. Samotné určenie smeru vetra je indikované výchylkou lopatky, ktorá vždy zaujme takú polohu, ktorá kladie prúdeniu vzduchu najmenší odpor. Výchylku lopatky a jej pravidelné zmeny bude systém vyhodnocovať pomocou vhodného senzoru polohy. Tento fyzický pohyb bude zároveň využitý na pohon malého generátoru, ktorý bude systém zásobovať energiou. V tejto konfigurácii vznikla zaujímavá synergia, ktorá vynikajúco reprezentuje myšlienku energy harvesting. V prípade, že nenastáva nijaká zmena v smere prúdenia vzduchu, ani systém nepotrebuje indikovať nijakú zmenu. V tomto režime vykazuje len minimálnu aktivitu s veľmi malou spotrebou energie. Akonáhle dôjde k vychýleniu lopatky z pôvodnej polohy, vzniká potreba aktualizácie. Vtedy senzor vyhodnotí novú polohu lopatky a túto informáciu odosiela nadradenému systému na ďalšie spracovanie. Táto aktivita už vyžaduje pomerne veľký objem energie v porovnaní so stavom, kedy je systém v pokoji. Zmena polohy lopatky so sebou okrem potreby aktualizovať informáciu o smere vetra zároveň prináša mechanický impulz, ktorý je pomocou generátoru premenený elektrickú energiu. Časť tejto energie je spotrebovaná aktivitou modulu okamžite, a zvyšná časť je akumulovaná. V prípade, že objem energie získaný z mechanického impulzu prevýši objem energie potrebný na činnosť senzoru po dobu, kým príde k novému vychýleniu lopatky, vzniká autonómny systém, schopný svojou vlastnou činnosťou pokryť svoje energetické nároky.

V nasledujúcich kapitolách táto práca pojednáva o jednotlivých technických aspektoch, ktoré spolu tvoria kombináciu splňujúcu vyššie spomenutý predpoklad. Hlavnou snahou jednotlivých riešení je minimalizovať objem energie potrebný na činnosť modulu a maximálne využiť energiu dostupnú v mechanickej podobe. Aby senzor prinášal aj konkrétnu užitočnú službu, boli definované tieto minimálne technické parametre:

Rozlíšenie:	5°
Maximálna dynamika zmeny:	720°/s
Interval zasielania aktualizácií:	po každej zmene ustálenej aspoň na 2s

5.2 ZDROJ A SPRÁVA ENERGIE

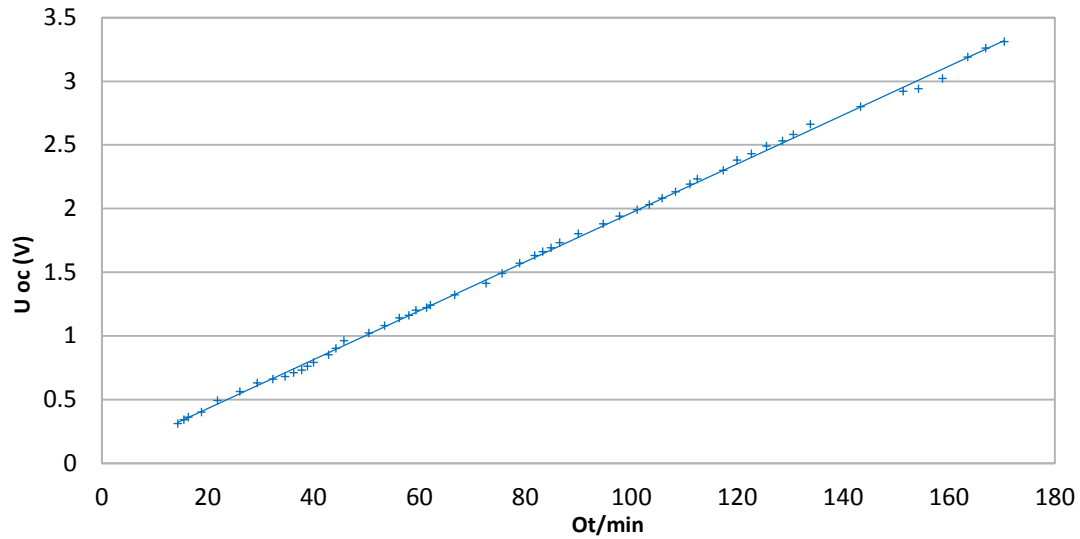
5.2.1 Zdroj – DC motor s prevodovkou

Za účelom premeny mechanickej energie z otočného pohybu lopatky senzoru bol zvolený miniatúrny DC motor s prevodovkou. Komutátorový motor je možné použiť ako generátor. Veľkosť generovaného napätia je daná rýchlosťou otáčania hriadele. V tejto aplikácii budú zdrojom točivého impulzu sporadické a prevažne nekompletné otočky v rozsahu 10 – 180°. Takéto pootočenie samotným generátorom by nemalo prakticky nijaký zmysel, nakoľko napätie indukované na svorkách zdroja by predstavovalo v tomto prípade len jednotky mV. Preto je potrebné použiť prevodovku, ktorá násobne zvýši vstupné otáčky od smerovky prenášané na hriadeľ generátoru. Vďaka tomu aj pri pootočení o niekoľko stupňov, bude hriadeľ generátoru pootočená o niekoľko kompletných a zároveň pomerne rýchlych otáčok. Čo sa na výstupe prejaví impulzom rádovo v stovkách mV a toto napätie je už prakticky použiteľné. Konkrétne bol na tento účel zvolený miniatúrny servomotor s prevodovkou 1:60. Nominálny výkon tohto motora je 400mW pri napájaní napätím 5V. Vtedy pri nominálnom mechanickom zaťažení dosahuje rýchlosť 190ot/min. Vzhľadom k tomu, že technická dokumentácia k tomuto servopohonu (pochopiteľne) neobsahuje informácie o parametroch motora použitého ako generátor, boli tieto parametre zistené meraním.

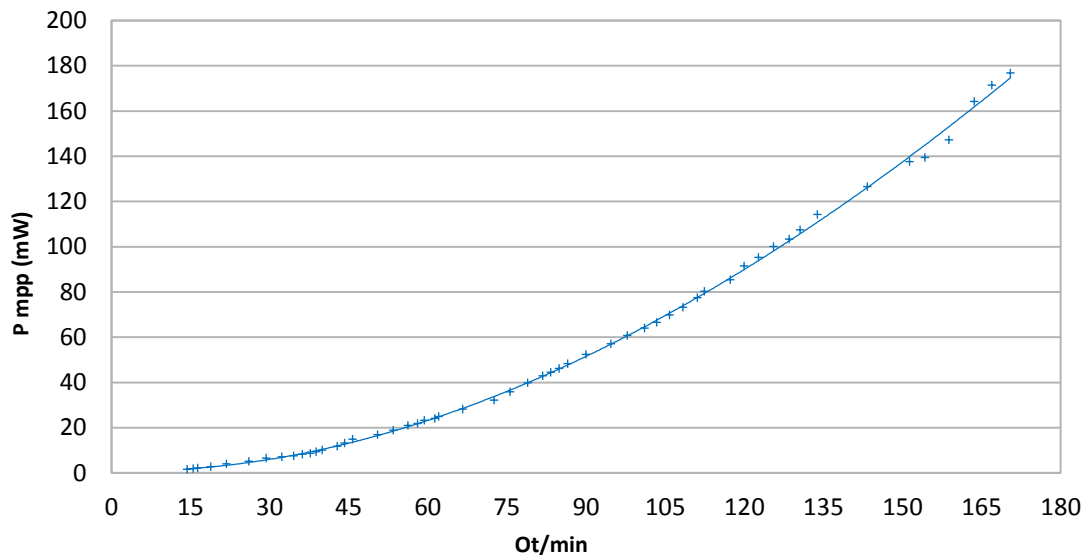


Obr. 5.2.1.1 DC motor s prevodovkou, nominálny výkon 400mW

Pre rozsah vstupných otáčok 15 – 170 ot/min bola zistená lineárna charakteristika výstupného napätia na prázdno v rozsahu 0,31 – 3,31V. Výsledky merania sú reprezentované nasledujúcim grafom.

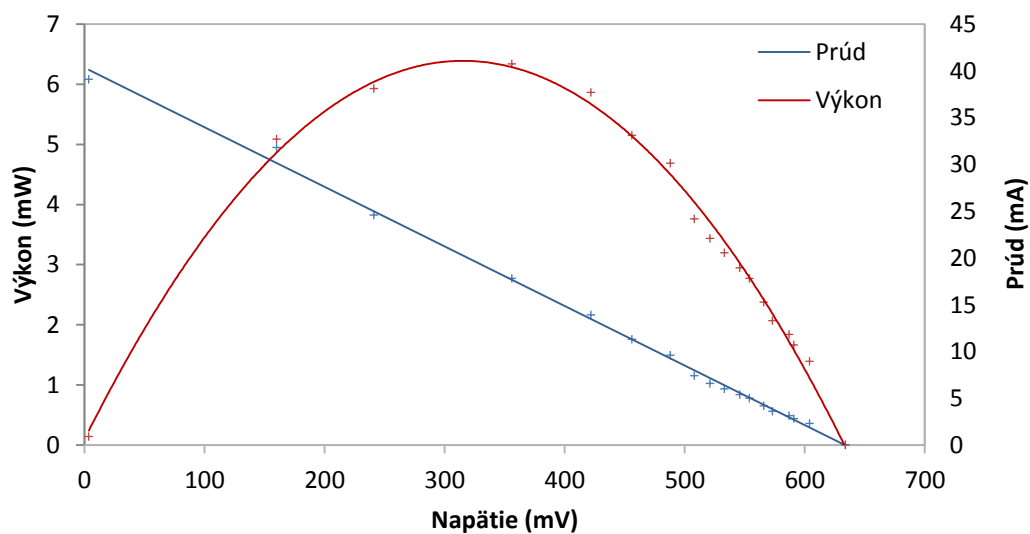


Graf 5.2.1.1 závislosť výstupného napätia na vstupných otáčkach



Graf 5.2.1.2 Závislosť maximálneho výkonu zdroja od rýchlosti otáčania

Následne bola zistená volt-ampérová charakteristika zdroja pri konštantných vstupných otáčkach 30ot/min. Z výsledkov meraní je zrejmé, že tento zdroj je schopný dodať najvyšší výkon do obvodu pri takej záťaži, ktorá sa prejaví poklesom napätia na polovicu napätia na prázdno. To konkrétne predstavuje odporovú záťaž 15Ω . Toto je dôležitý parameter pre konfiguráciu MPP tracker-u. MPP tracker – *Maximal Peak power Tracking* je súčasťou pomerne komplexného power managementu, ktorý bude podrobne rozobraný v samostatnej kapitole. Maximálny výkon generátoru pri týchto otáčkach predstavoval 6,5mW. Priebeh výkonu a A-V charakteristika zdroja sú prezentované nasledujúcim grafom.



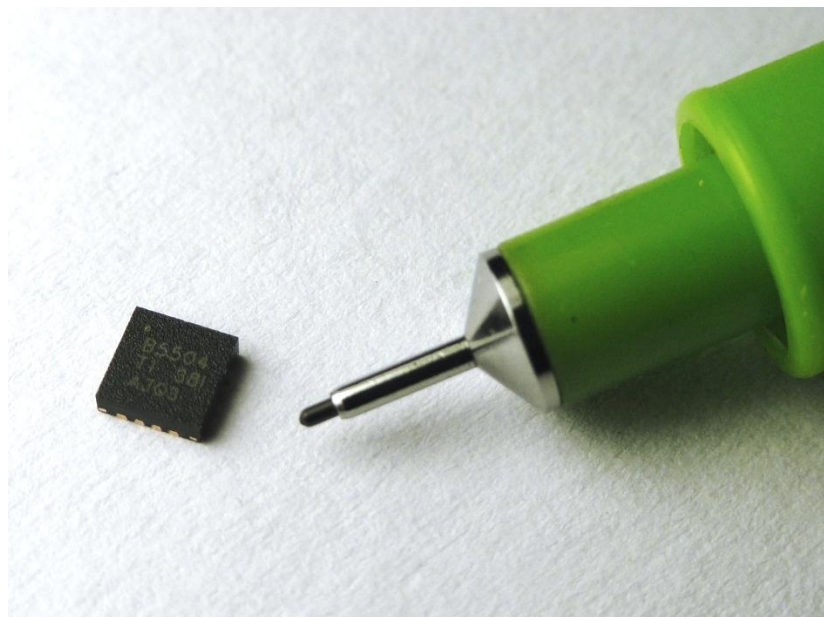
Graf 5.2.1.3 A-V charakteristika zdroja pri vstupných otáčkach 30 ot/min

Z nameraných vlastností zdroja je možné určiť približnú účinnosť prevodu mechanickej energie na elektrický výkon. Tá predstavuje približne 50%. Najväčší podiel na pomerne nízkej účinnosti nesie prevodovka s prevodom 1:60. Tak silný prevod do systému vnáša značný mechanický odpor. V prípade potreby optimalizácie, toto predstavuje potenciálny priestor, kde by mohol byť systém prevodu mechanickej energie zdokonalený. Pre účely tejto práce a demonštrovanie princípu energy harvestingu bude táto účinnosť postačujúca a jej zlepšovanie nie je priamym cieľom tejto práce.

5.2.2 Energy Harvesting modul

Aby bolo možné použiť zdroj, ktorý poskytuje len sporadické impulzy s napätím v rozsahu 0,2 – 3,5V na napájanie zariadenia požadujúceho napätie 2,7 – 5,0V je potrebné použiť aktívny DC-DC konvertor, ktorý zvýši inak napäťovo volatilný vstup na požadované stabilné výstupné napätie.

V bežnej elektronike sa často vyskytujú požiadavky na zmenu veľkosti jednosmerných napätí. V porovnaní so striedavým napätím, kde na tento účel slúžia transformátory s potrebným prevodom, je tento prvok u jednosmerných prúdov nepoužiteľný. V prípade, že je potrebné znížiť a stabilizovať veľkosť jednosmerného napätia, je možné použitie napríklad odporovej deličky napätia a stabilizačnej zenerovej diódy. Tento spôsob je ale z pohľadu spotreby energie neefektívny a hlavne nepoužiteľný pre prípad, kedy je potrebné vyššie napätie ako napätie zdroja. Na zvýšenie napätia je možné aplikovať tzv. napäťovú pumpu, ktorú tvorí kaskáda kondenzátorov a diód. Ani toto nepredstavuje veľmi praktické riešenie. S postupným vývojom polovodičovej elektroniky a so zvyšujúcou sa úrovňou integrácie integrovaných obvodov začali vznikať dnes už veľmi bežné DC-DC meniče. Medzi ich hlavné prednosti patrí veľký rozsah vstupných a výstupných napätí, schopnosť pracovať v zvyšujúcom i znižujúcom režime, malý počet externých komponentov, malé rozmery a cenová dostupnosť.



Obr. 5.2.2.1 Integrovaný obvod Texas Instruments BQ 25504, rozmery 3x3mm

Na účely spracovania napätových impulzov generovaných otáčaním smerovky senzoru bol zvolený obvod BQ-25504 firmy Texas Instruments. Tento DC-DC konvertor je priamo určený na aplikácie energy harvesting a tomu zodpovedajú aj pokročilé možnosti tohto obvodu. V nasledujúcej tabuľke sú jeho kľúčové technické parametre.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Over recommended temperature range, typical values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$. Unless otherwise noted, specifications apply for conditions of $V_{IN_DC} = 1.2\text{V}$, $V_{BAT} = V_{STOR} = 3\text{V}$. External components $L_{BST} = 22\ \mu\text{H}$, $C_{HVR} = 4.7\ \mu\text{F}$, $C_{STOR} = 4.7\ \mu\text{F}$.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT		
BOOST CONVERTER \ CHARGER STAGE							
$V_{IN(DC)}$	DC input voltage into V_{IN_DC}	Cold-start completed	130	3000	mV		
$I_{IN(DC)}$	Peak Current flowing from V_{IN} into V_{IN_DC} input	$0.5\text{V} < V_{IN} < 3\text{V}$; $V_{STOR} = 4.2\text{V}$	200	300	mA		
P_{IN}	Input power range for normal charging	$V_{BAT} > V_{IN_DC}$; $V_{IN_DC} = 0.5\text{V}$	0.01	300	mW		
$V_{IN(ICS)}$	Cold-start Voltage. Input voltage that will start charging of V_{STOR}	$V_{BAT} < V_{BAT_UV}$; $V_{STOR} = 0\text{V}$; $0^\circ\text{C} < T_A < 85^\circ\text{C}$	330	450	mV		
$P_{IN(ICS)}$	Minimum cold-start input power to start normal charging	$V_{BAT} < V_{BAT_UV}$; $V_{STOR} = 0\text{V}$; Input source impedance $0\ \Omega$	10	50	μW		
V_{STOR_CHGEN}	Voltage on V_{STOR} when cold start operation ends and normal charger operation begins		1.6	1.77	1.95	V	
$R_{BAT(on)}$	Resistance of switch between V_{BAT} and V_{STOR} when turned on.	$V_{BAT} = 4.2\text{V}$; V_{STOR} load = 50 mA			2	Ω	
$R_{DS(on)}$	Charger Low Side switch ON resistance	$V_{BAT} = 2.1\text{V}$			2	Ω	
		$V_{BAT} = 4.2\text{V}$			2	Ω	
	Charger rectifier High Side switch ON resistance	$V_{BAT} = 2.1\text{V}$				5	Ω
		$V_{BAT} = 4.2\text{V}$				5	Ω
f_{SW_BST}	Boost converter mode switching frequency				1	MHz	

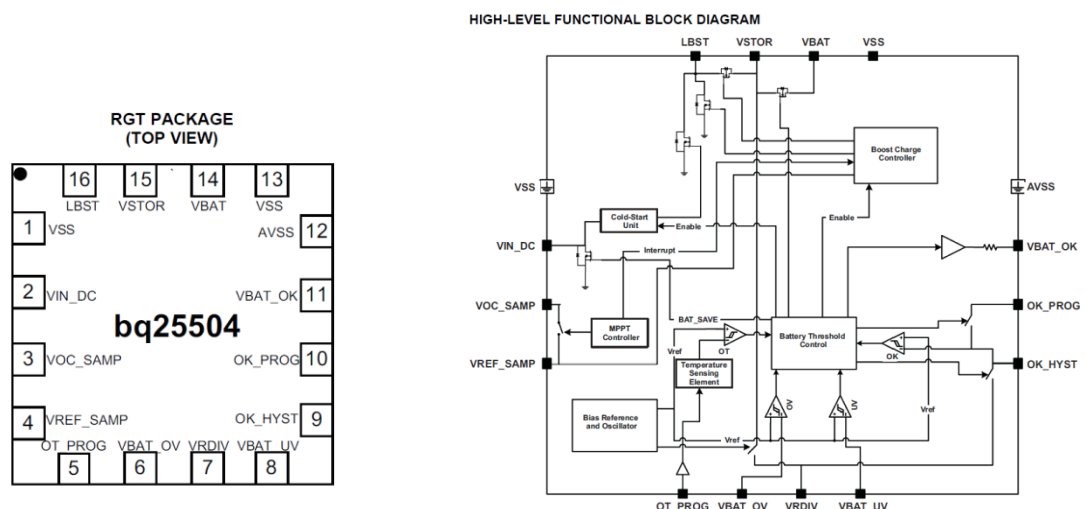
Tab. 5.2.2.1 Technické parametre obvodu Texas Instruments BQ 25504 [18]

V tomto integrovanom obvode, ktorého rozmery sú len 3x3mm sú obsiahnuté bohaté možnosti energetického manažmentu. Rozsah vstupných napätí je 0,13 – 3V pri ktorých je schopný s dobrou účinnosťou poskytovať na výstupe stabilných 5V. Tento obvod je tak schopný extrahovať energiu i z málo výkonných zdrojov ako sú termočlánky, miniatúrne fotovoltaické panely a podobne a napájať bežné zariadenia pracujúce na štandardnom vstupnom napätí 3 – 5V.

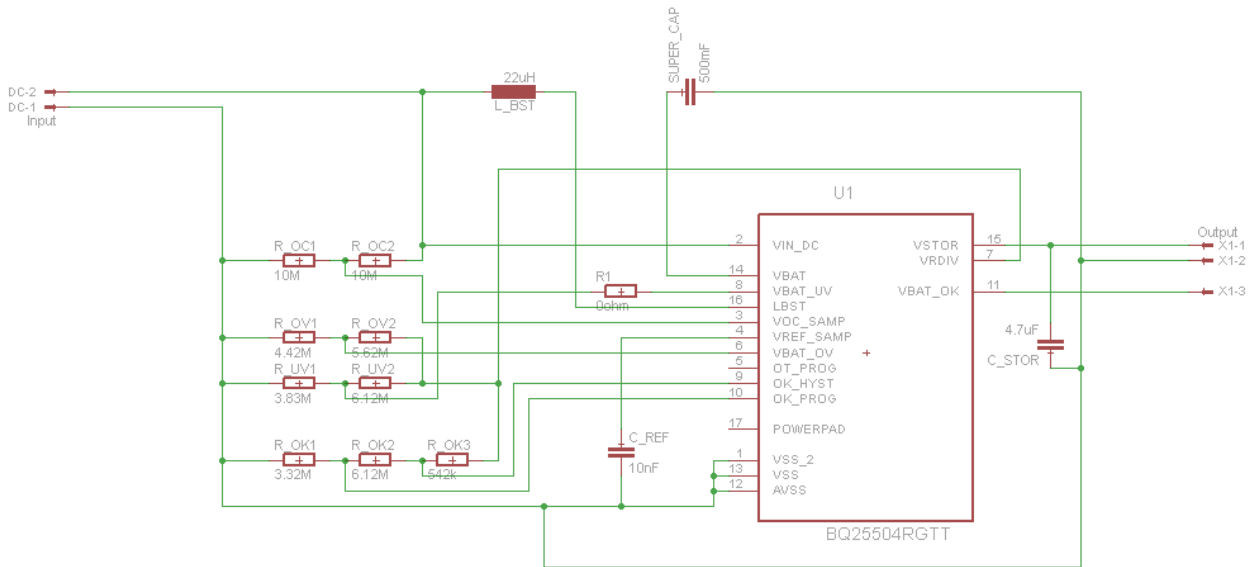
Za účelom extrakcie maximálneho množstva energie, ktoré zdroj môže poskytnúť je tento obvod vybavený funkciou hľadania ideálneho pracovného bodu zdroja, takzvaný *Maximal Peak Power Tracking*. Tento systém je bežne interpretovaný pod skratkou MPPT. Ide o funkciu, ktorá na krátku dobu od zdroja odpojí záťaž a vyhodnotí aktuálnu veľkosť napätia na prázdno. Následne podľa danej konfigurácie zaťaží zdroj tak, aby jeho napätie pri záťaži pokleslo na optimálny podiel napätia na prázdno. Napríklad fotovoltaický panel dodáva maximálny výkon pri napätí 80% z veľkosti svojho napätia na prázdno. Pokles napätia pri zaťažení je prirodzenou vlastnosťou prakticky každého reálneho zdroja a je spôsobený úbytkom napätia na vnútornom odpore. Čím väčší prúd obvodom preteká, tým väčší bude

úbytok na vnútornom odpore zdroja. Extrémnym príkladom je skrat. Vtedy je veľkosť prúdu ktorý tečie obvodom obmedzená len vnútorným odporom zdroja a úbytok napätia na tomto odpore predstavuje 100% jeho napätia na prázdno. Vtedy je na svorkách tohto zdroja nulové napätie a do skratového obvodu nedodáva prakticky žiaden výkon. Skrat je reprezentovaný odporovou záťažou 0ohm. Pri postupnom zvyšovaní odporu záťaže, bude obvodom pretekať menší prúd a na záťaži už bude napätie zodpovedajúce pomeru vnútorného odporu zdroja a odporom záťaže. V závislosti na veľkosti vnútorného odporu je zaužívané pomenovanie mäkký a tvrdý zdroj. Mäkké zdroje sú typické vyššou hodnotou vnútorného odporu, čo sa prejavuje rýchlym poklesom napätia na svorkách pri zaťažení. Tvrdé zdroje majú v porovnaní s mäkkými vnútorný odpor výrazne menší a ich postupným zaťažovaním napätie na svorkách neklesá tak rapídne. Pre zdroj použitý v tejto aplikácii bol meraním zistený maximálny výkon pri napätí zodpovedajúcom 50% úrovne napätia na prázdno.

Ďalšou funkciou obvodu BQ-25504 je sledovanie stavu nabitia batérie. Kde je možné konfigurovať pracovný rozsah batérie. Funkcia sleduje nadpätie (Battery over voltage treshold). Toto zabráni prebíjaniu batérie nad nastavenú úroveň napätia, čím sa väčšinou sleduje zachovanie maximálnej možnej životnosti akumulátoru. Rovnako je sledovaná aj úroveň podpätia, čo zas zabraňuje vybíjaniu batérie pod definovanú úroveň (battery undervoltage treshold). Obvod obsahuje logický výstup ktorý informuje nadradený systém o aktuálnom stave batérie (battery OK status). Na nasledujúcej schéme je už kompletný energy harvestig modul, ktorý extrahuje a akumuluje elektrickú energiu z impulzov produkovaných výchylkov smerovky senzoru.



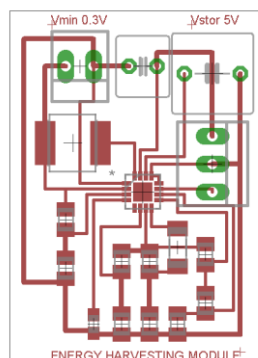
Obr. 5.2.2.2 Popis pinov a bloková schéma obvodu BQ-25504 [18]



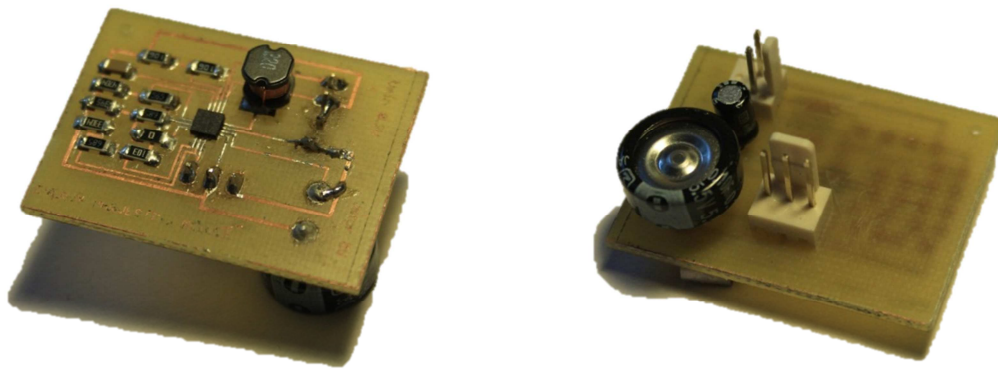
Obr. 5.2.2.2 Schéma: Energy harvesting modul postavený na obvode BQ-25504

Toto zapojenie rešpektuje doporučenú konfiguráciu od výrobcu. Jednotlivé odpory slúžia ako hardvérová konfigurácia spomenutých možností obvodu. Rezistory sú zapojené ako odporové deličky a ich vzájomné pomery definujú nastavenie úrovní jednotlivých parametrov. Napr. pomer medzi R_OC1 a R_OC2 je 1:1 a tým je konfigurovaná veľkosť optimálneho napätia pri záťaži na 50% veľkosti napätia na prázdno. V prípade fotovoltaického panelu, kde by bolo požadované 80% napätia na prázdno, by tento pomer bol zvolený 1:4.

Na nasledujúcom obrázku je už návrh DPS. Rozmery tohto modulu sú 37 x 28mm.



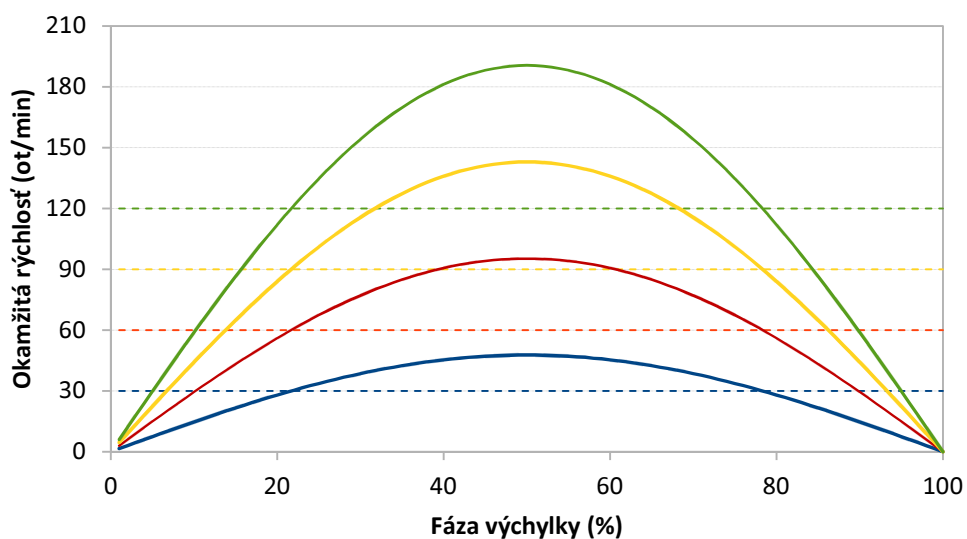
Obr. 5.2.2.3 Návrh DPS: Energy harvesting modul postavený na obvode BQ-25504



Obr. 5.2.2.4 Vyhotovenie modulu

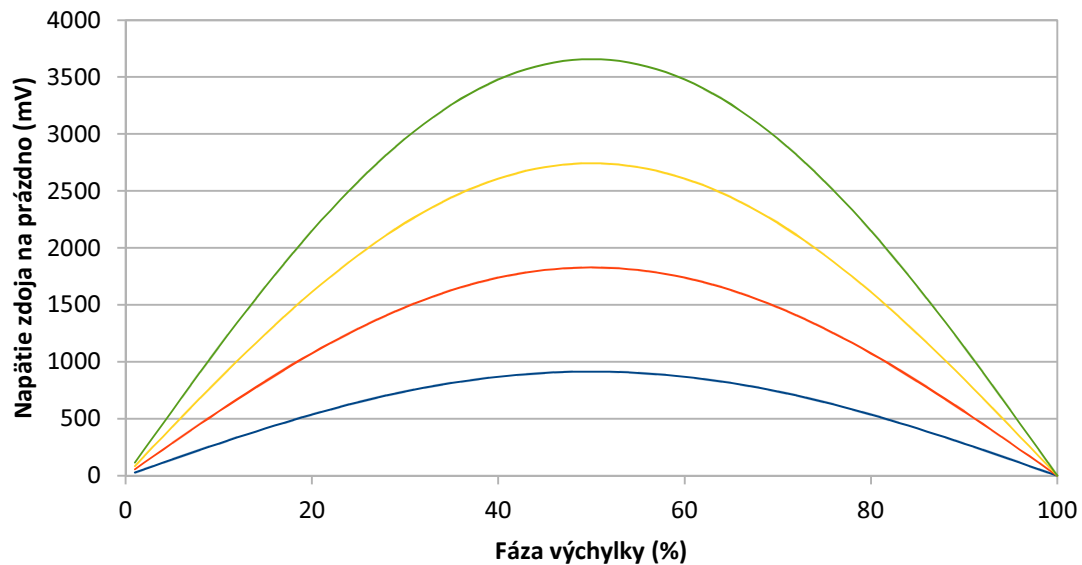
5.2.3 Energetický potenciál mechanických impulzov

Zo zistených vlastností zdroja, technických parametrov energy harvesting modulu a povahy aplikácie je možné určiť objem energie, ktorý dokáže táto konfigurácia poskytnúť. Z dostupných parametrov boli namodelované mechanické impulzy v štyroch referenčných rozsahoch 10, 30, 90 a 180°. Energetický potenciál týchto impulzov bol testovaný pre štyri rôzne rýchlosti pohybu. Boli zvolené referenčné dynamiky pohybu o priemernej rýchlosti 30, 60, 90 a 120 ot/min. Nakoľko v reálnych podmienkach rýchlosť výchylky senzoru nebude konštantná, ale jej priebeh bude z kludového stavu postupne rozbehnutý na maximálnu rýchlosť a následne postupným spomaľovaním sa lopatka senzoru zastaví na novej pozícii. Vzhľadom k nelineárnej závislosti výkonu zdroja od rýchlosti vstupných otáčok, nie je možné počítať objem energie extrahovanej z mechanického impulzu z jeho priemernej rýchlosti. Ako simulácia reálneho impulzu bola použitá pol perióda funkcie sínus, ktorá veľmi dobre reflektuje vyššie spomenutý predpoklad. Na nasledujúcom grafe je znázornený priebeh okamžitých rýchlostí impulzov o daných priemerných rýchlostiach v rozsahu 0 – 100% impulzu (priebeh od počiatku výchylky po ustálenie v novej polohe, vyjadrené v percentách).



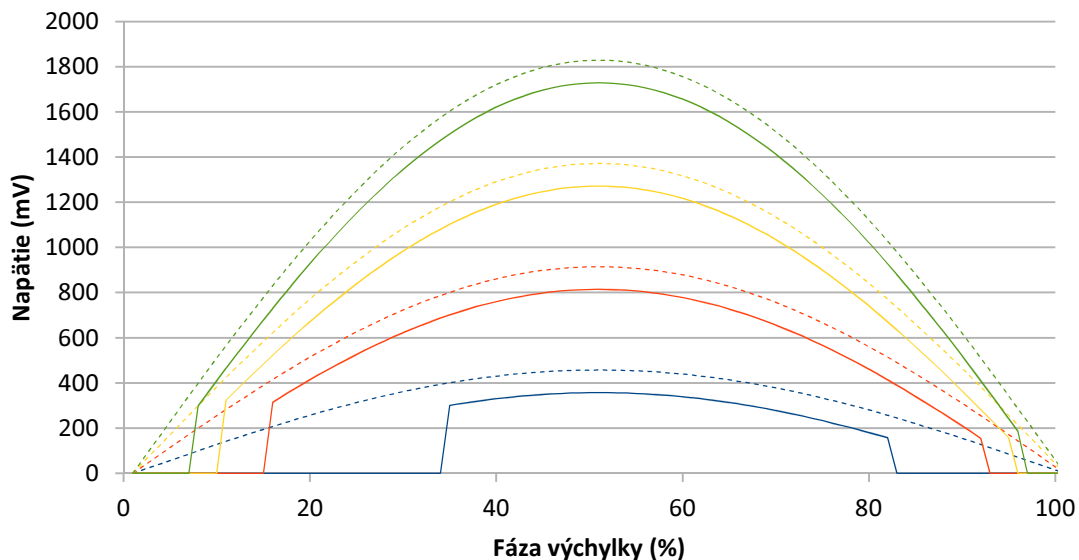
Graf č. 5.2.3.1 Okamžitý priebeh otáčok pre impulzy s dynamikou 30, 60, 90 a 120 ot/min

Nasledujúci graf reprezentuje okamžitý priebeh napätia na prázdno na svorkách zdroja pre okamžitú dynamiku otáčania senzoru. Podobnosť s predchádzajúcim grafom je daná lineárnou závislosťou napätia na prázdno od vstupných otáčok generátora.



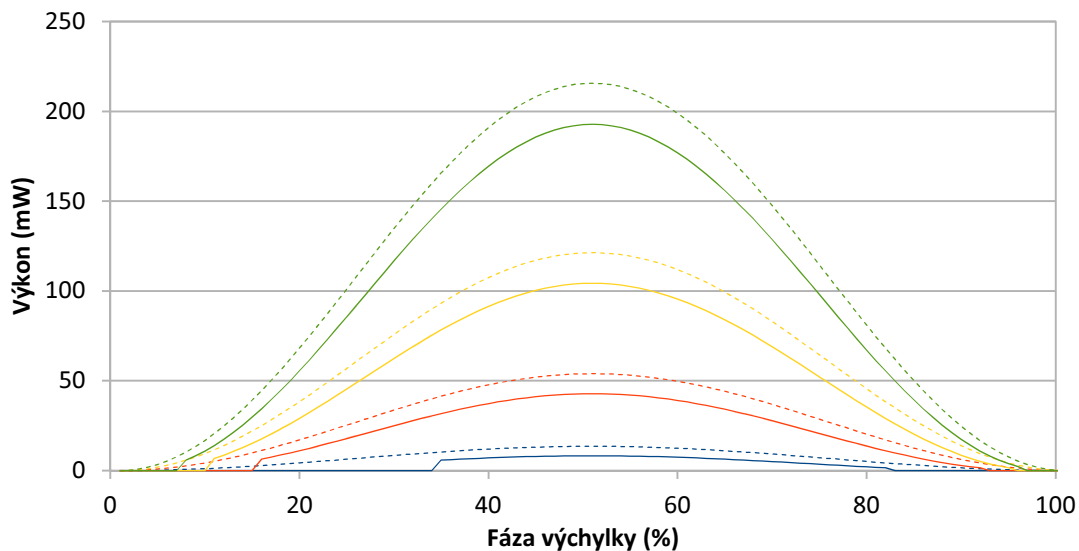
Graf č. 5.2.3.2 Okamžitý priebeh napätia na prázdno pre impulzy s dynamikou 30, 60, 90 a 120 ot/min

Pre získanie maximálneho objemu energie z každého impulzu je účelné, aby zdroj dodával výkon v režime ideálneho pracovného bodu. Z analýzy tohto zdroja bola zistená záťaž 15Ω , ktorá spôsobí pokles napätia voči napätiu na prázdno o 50%. Ako ochrana proti reverznému napätiu je do obvodu zaradená dióda na ktorej je uvažovaný úbytok napätia v priepustnom smere 0,2V (Schotkyho dióda). Minimálne vstupné napätie, s ktorým dokáže modul pracovať je 300mV a následne dokáže tento DC-DC menič extrahovať energiu s minimálnym napätím 130mV. Pri poklese pod túto úroveň už nie je využitá žiadna energia zo zdroja. Na nasledujúcom grafe je čiarkovane vyznačené napätie pri maximálnom výkone dostupné na zdroji a plnou čiarou tomu zodpovedajúci priebeh napätia ktoré je spracované DC-DC meničom.



Graf č. 5.2.3.3 Okamžitý priebeh napätia pri maximálnom výkone zdroja pre impulzy s dynamikou 30, 60, 90 a 120 ot/min (plnou napätie spracované DC-DC konvertorom, čiarkovanou napätie dostupné priamo na generátore)

Nasledujúci graf ekvivalentne tomu predošlému znázorňuje priebeh okamžitého výkonu v závislosti na aktuálnej fáze výchylky pre štyri referenčné dynamiky pohybu.



Graf č. 5.2.3.4 okamžitý priebeh maximálneho výkonu zdroja pre impulzy s dynamikou 30, 60, 90 a 120 ot/min (plnou výkon spracovaný DC-DC konvertorom, čiarkovanou výkon dodaný generátorom)

Už z jednoduchého vizuálneho porovnania plochy pod jednotlivými krivkami znázorňujúcimi množstvo energie dodané impulzom danej dynamiky je zrejmé, že množstvo extrahovateľnej energie z dynamickejšieho impulzu je násobne väčšie v porovnaní s pomalším mechanickým impulzom. V nasledujúcej tabuľke je porovnanie priemerných a maximálnych výkonov zdroja pre jednotlivé priemerné rýchlosti vychýlenia senzoru. Hodnota výkonu na zdroji zodpovedá výkonu dostupného priamo na svorkách generátoru. Výkon na meniči je chápaný ako dostupný výkon pre DC-DC konvertor, ktorý je v jeho pracovnom rozsahu vstupného napätia a je možné ho spracovať.

Priemerný výkon (mW)				
Dynamika	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min
Zdroj	6,67	26,7	60,07	106,8
Menič	2,93	19,65	49,39	92,47
Pomer	43,9%	73,6%	82,2%	86,6%

Maximálny výkon (mW)				
Dynamika	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min
Zdroj	13,48	53,93	121,34	215,72
Menič	8,23	42,78	104,29	192,77
Pomer	61,1%	79,3%	85,9%	89,4%

Tab. č. 5.2.3.1 Porovnanie výkonu dostupného priamo na zdroji s výkonom dodaným na vstup DC-DC konvertoru v závislosti na vstupných otáčkach generátoru

Zo zistených hodnôt je zrejmé, že na účely napájania systému budú rozhodujúce mechanické impulzy s dynamikou aspoň 60ot/min. Pomalšie pootočené sa neprejaví dostatočne vysokým napätím zdroja. Vtedy sa výraznou mierou na celkovej získanej energii podpíše úbytok napätia na usmerňovacej dióde a obmedzený pracovný rozsah DC-DC konvertoru. Pri výchylke s priemernou rýchlosťou 30ot/min dokáže DC-DC konvertor spracovať len 43,9% energie, ktorú z mechanického vstupu vyprodukuje generátor. Pričom už pri dynamike impulzu 60ot/min je vplyv spomenutých obmedzení menej zásadný a použiteľných je takmer 74% energie dostupnej priamo na generátore. Pri dynamike 120ot/min už nie je rozdiel až taký výrazný. Vtedy bude možné spracovať takmer 87% dostupnej energie.

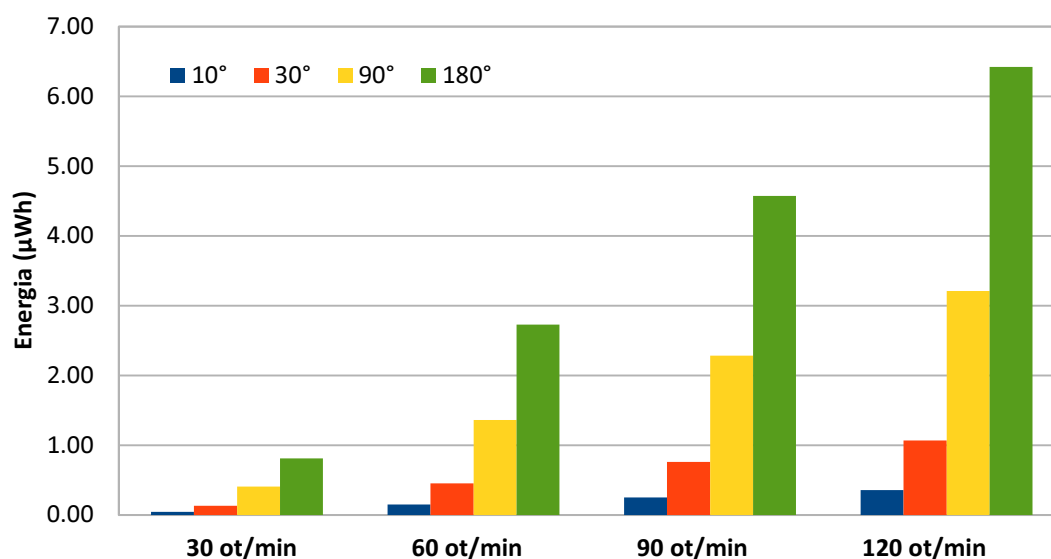
Zatiaľ bol zistený výkonový potenciál pootočení senzoru pri konkrétnych dynamikách výchyliek. Na základe týchto zistení je možné vypočítať objem energie, ktorý bude zodpovedať vychýleniu lopatky senzoru o daný rozsah pri jednotlivých dynamikách pohybu.

V nasledujúcej tabuľke sú časové intervaly potrebné na kompletne pootočenie senzoru o daný uhol pri danej priemernej rýchlosti pohybu.

Rozsah	Trvanie pootočenia pri danej dynamike (s)			
	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min
10°	0,06	0,03	0,02	0,01
30°	0,17	0,08	0,06	0,04
90°	0,50	0,25	0,17	0,13
180°	1,00	0,50	0,33	0,25

Tab. č. 5.2.3.2

Objem energie získaný zo zdroja je daný súčinom priemerného výkonu a doby, počas ktorej bol tento výkon dosiahnutý. V nasledujúcom grafe je znázornený objem energie spracovaný DC-DC konvertorom pri vychýlení o referenčné uhly pri všetkých simulovaných dynamikách pohybu.



Graf č. 5.2.3.5

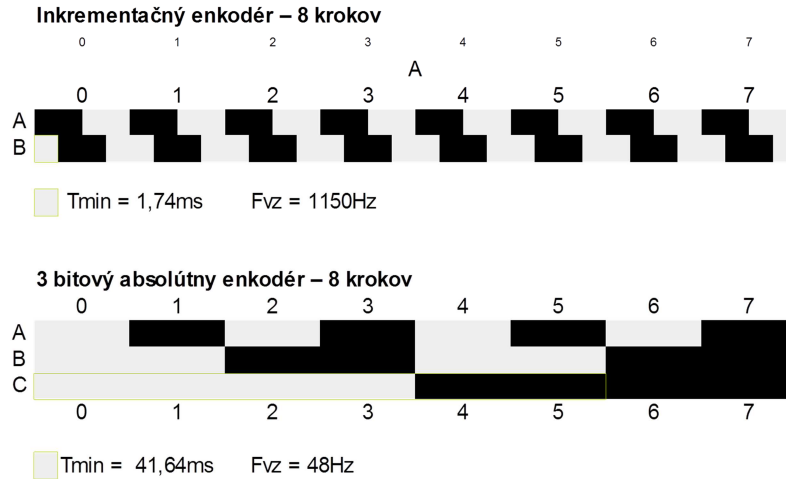
Rozsah	Energia na vstupe DC-DC konvertoru (µWh)			
	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min
10°	0.05	0.15	0.25	0.36
30°	0.14	0.45	0.76	1.07
90°	0.41	1.36	2.29	3.21
180°	0.81	2.73	4.57	6.42

Tab. č. 5.2.3.3

5.3 Návrh enkodéru

Pri voľbe vhodného senzoru polohy boli zohľadnené viaceré parametre. Hlavným parametrom bola rozlišovacia schopnosť kroku najmenej 5° , vysoká odolnosť voči rýchlym zmenám polohy s dynamikou minimálne $720^\circ/\text{s}$, nízka spotreba energie a nízky mechanický odpor. Jednoznačnou voľbou v otázke mechanického odporu bol optický enkodér. Rozlíšenie jedného kroku 5° predstavuje enkodér so 72 krokmi na jednu celú otočku. Jednou z dostupných možností je inkrementačný dvojkanálový enkodér. Jeden rozlišovací krok je reprezentovaný 2 bitovým kódom, čo predstavuje až 4 unikátne stavy, ktoré je potrebné rozlíšiť. Pre zabezpečenie korektného čítania stavu pri konštantnej rýchlosti otáčania $720^\circ/\text{s}$ je doba počas ktorej je stav kódu platný menej ako 2ms. Potrebná vzorkovacia frekvencia tak bude vyššia ako 1kHz.

Pomerne vysoká vzorkovacia frekvencia znamená prakticky neustálu aktivitu mikroprocesoru a tým aj vyššie energetické nároky na napájanie systému. Výhodnou cestou ako znížiť nároky na vzorkovací kmitočet senzoru je použitie absolútneho enkodéru. Pri použití absolútneho enkodéru nepredstavuje nedostatočný vzorkovací kmitočet riziko straty relevantnej informácie o polohe a údaj o polohe môže byť vyčítaný v intervaloch podľa potreby systému. Presné dosiahnutie požadovaného rozlíšenia 72 krokov na otočku nie je možné, nakoľko číslo 72 nie je N-tou mocninou dvojky. Najbližšie mocniny čísla dva sú 64 a 128, čo je realizovateľné 6, respektíve 7 bitovým enkodérom. Ani jedna konfigurácia neumožňuje polohu v stupňoch vyjadriť celo číselne. Zároveň toto mnoho bitové riešenie je konštrukčne a elektrickým zapojením výrazne komplikovanejšie ako dvojkanálový (dvoj bitový) inkrementačný ekvivalent senzoru. Vhodným kompromisom je kombinácia 3 bitového absolútneho enkodéru s opakujúcim sa signálom/periódou. Jedna perióda 3 bitového absolútneho enkodéru umožňuje rozlíšiť 8 unikátnych stavov. Opakovaním 9 po sebe nasledujúcich periód 3 bitového kódu vzniká celkovo 72 rozlišovacích krokov, čo presne zodpovedá požadovanému rozlíšeniu 5° na jeden krok. Takýmto spôsobom vznikol kombinovaný enkodér, ktorý obsahuje 9 segmentov absolútneho 3 bitového kódu.



Obr. 5.3.1 Porovnanie inkrementačného enkodéru a 3 bitovej binárnej postupnosti

V rámci jedného segmentu je tak možné vyjadriť polohu v rozsahu 0 – 7, čo predstavuje rozsah 0 – 35°. Pre určenie konkrétnej polohy v celom rozsahu pohybu 0 – 360° je potrebné lokalizovať aj segment v ktorom sa senzor práve nachádza. Pre prehľadnosť je vhodné zaviesť dvojrozmerný súradnicový systém. Súradnica **X** predstavuje aktuálnu polohu v rámci segmentu, danú jednoznačnou kombináciou 3 bitového kódu v rozsahu 0 – 7. Uhlová váha súradnice zodpovedá elementárnemu rozlíšeniu 5° (360°/72). Súradnica **Y** identifikuje aktuálny segment. Rozsah tejto súradnice je 0 – 8 a jej váha je 40° (360°/9). Hodnota tejto súradnice bude určená programovo. Vyhodnotiť smer pohybu na základe hodnoty súradnice **X** je možné pomerne jednoducho. V prípade rastúcej hodnoty súradnice **X** cez hodnotu 7 na hodnotu 0 došlo k pretečeniu smerom nahor. Vtedy bude hodnota súradnice **Y** inkrementovaná. Ekvivalentne tomu, v prípade klesajúcej hodnoty súradnice **X** cez hodnotu 0 na hodnotu 7 došlo k pretečeniu smerom dole a hodnota súradnice **Y** bude dekrementovaná. Programovo bude zároveň ošetrené pretečenie súradnice **Y** v oboch smeroch tak, aby bol dodržaný rozsah 0 – 8. Následne vyjadrenie absolútnej polohy senzoru je dané vzťahom:

$$X * Váha_x + Y * Váha_y = Aktuálny_uhol$$

Príklad výpočtu pre $X = 6$ a $Y = 4$:

$$6 * 5^\circ + 4 * 40^\circ = 190^\circ \text{ (kladná výchylka voči referenčnej polohe)}$$

Nato, aby bolo možné jednoznačne určiť správny prechod zo segmentu do segmentu, je potrebné zaznamenávať hodnoty súradnice **X** v takej perióde, aby zmena jej hodnoty pri

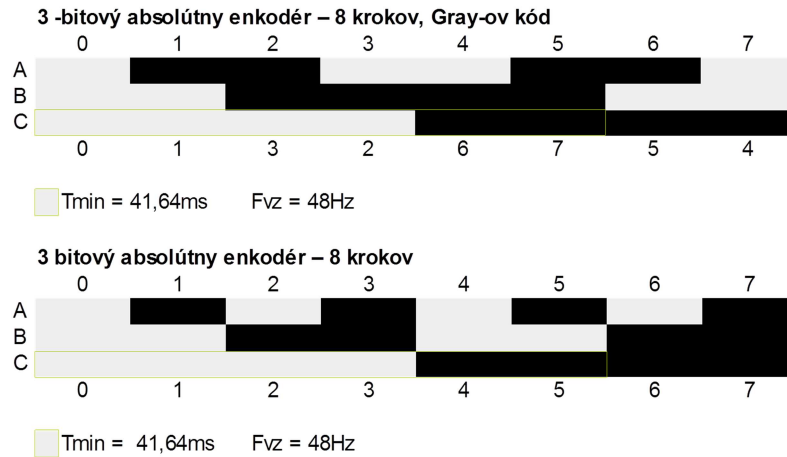
maximálnej povolenej dynamike pohybu predstavovala maximálne $|3|$. V prípade že by došlo k zmene hodnoty súradnice X o $|4|$ a viac, nebude možné rozhodnúť, či došlo k posunu smerom nahor, alebo smerom nadol. Pri vyhovujúcom vzorkovacom kmitočte bude možné tvrdiť, že k posunu na súradnici X napríklad z hodnoty 6 do hodnoty 1 došlo v troch krokoch 1(pozícia 7), 2(pozícia 0), 3(pozícia 1). Došlo teda k pretečeniu smerom nahor a to znamená posun do segmentu $Y+1$. Zároveň je možné vylúčiť, že mohlo dôjsť k pretečeniu smerom nadol do segmentu $Y-1$. To by muselo nastať v piatich krokoch 1(pozícia 5), 2(pozícia 4), 3(pozícia 3), 4(pozícia 2) a 5(pozícia 1). Riešenie tejto úlohy je reprezentované nasledujúcou časťou zdrojového kódu. Premenná *index_x_prev* reprezentuje hodnotu súradnice X v predošlom čítaní polohy senzoru. Premenná *index_x* reprezentuje aktuálne načítanú hodnotu súradnice X . Na základe ich vzájomného porovnania je rozhodnuté o zmene súradnice Y ktorú reprezentuje premenná *index_y*.

```
// POSITIVE OVERFLOW, MOVEMENT TO NEXT SEGMENT      distance
if (index_x == 0 && index_x_prev == 7) index_y++;    // + 1
if (index_x == 0 && index_x_prev == 6) index_y++;    // + 2
if (index_x == 0 && index_x_prev == 5) index_y++;    // + 3
if (index_x == 1 && index_x_prev == 7) index_y++;    // + 2
if (index_x == 1 && index_x_prev == 6) index_y++;    // + 3
if (index_x == 2 && index_x_prev == 7) index_y++;    // + 3

// NEGATIVE OVERFLOW, MOVEMENT TO PREV SEGMENT      distance
if (index_x == 7 && index_x_prev == 0) index_y--;    // - 1
if (index_x == 7 && index_x_prev == 1) index_y--;    // - 2
if (index_x == 7 && index_x_prev == 2) index_y--;    // - 3
if (index_x == 6 && index_x_prev == 0) index_y--;    // - 2
if (index_x == 6 && index_x_prev == 1) index_y--;    // - 3
if (index_x == 5 && index_x_prev == 0) index_y--;    // - 3
```

Kód 5.3.1 Kontrola smeru pretečenia súradnice X

Za účelom zvýšenia spoľahlivosti, bude tento 3 bitový semi-inkrementálny enkodér realizovaný pomocou Gray-ovho kódu. Použitím Gray-ovho kódu dôjde k preusporiadaniu bitov v jednotlivých kanáloch tak, aby pri presune z pozície X do pozície $X \pm 1$ došlo k zmene bitovej úrovne vždy len na jednom z troch kanálov. Vďaka tomu, nevzniknú hazardné stavy, ktoré by indikovali hodnotu súradnice mimo reálneho poradia. Tento kód je taktiež nazývaný „minimum error code“. Vlastnosti takéhoto preusporiadania binárnych postupností bolo využívané v telekomunikačných systémoch už v polovici minulého storočia a nositeľom tejto idey bol Frank Grey z Bell Labs.



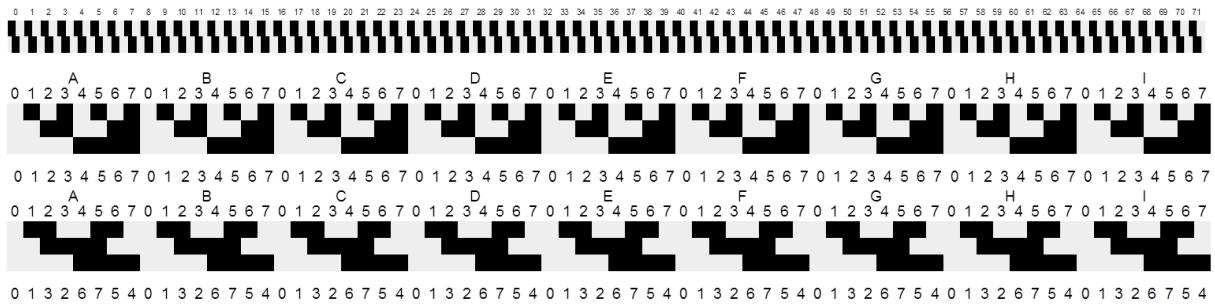
Obr. 5.3.2 Porovnanie 3 bitovej binárnej postupnosti a 3bit Gray-ovho kódu

```
void GraycodeLookUp()
{
  //CHANNEL:   A           B           C           BIN -> GRAY
  if (A == 0 && B == 0 && C == 0) index_x = 0; // 000 -> 000
  if (A == 1 && B == 0 && C == 0) index_x = 1; // 001 -> 100
  if (A == 1 && B == 0 && C == 1) index_x = 2; // 010 -> 101
  if (A == 0 && B == 0 && C == 1) index_x = 3; // 011 -> 001
  if (A == 0 && B == 1 && C == 1) index_x = 4; // 100 -> 011
  if (A == 1 && B == 1 && C == 1) index_x = 5; // 101 -> 111
  if (A == 1 && B == 1 && C == 0) index_x = 6; // 110 -> 110
  if (A == 0 && B == 1 && C == 0) index_x = 7; // 111 -> 010
}
```

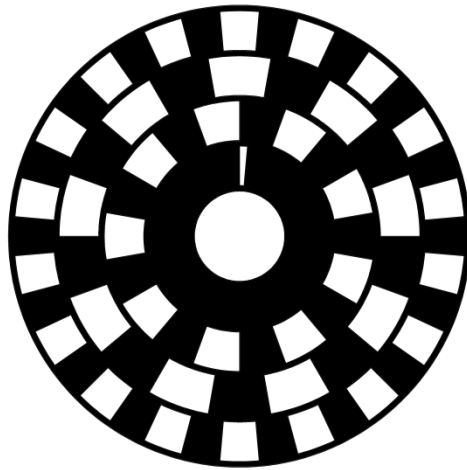
Kód 5.3.2 Prevodná tabuľka z binárnej postupnosti do Gray-ovho kódu

Kód č. 5.3.2 realizuje práve vyššie popísaný prevod štandardnej binárnej postupnosti do Gray-ovho usporiadania. Programovo je tento proces riešený prevodnou tabuľkou, ktorá mapuje na príslušný symbol vyjadrený v binárnom kóde, tomu odpovedajúci symbol v Gray-ovom preusporiadaní.

Na obrázku č. 5.3.3 je znázornené porovnanie troch variant optických enkodérov s rozlíšením 72 krokov na periódu (otočku). V prvej časti obrázku sa nachádza bitová postupnosť dvojkanálového inkrementačného enkodéru. V druhej časti je reťazec 9 po sebe sa opakujúcich postupností 3 bitového absolútneho enkodéru. V tretej časti je 3 bitová postupnosť realizovaná Gray-ovým kódom.



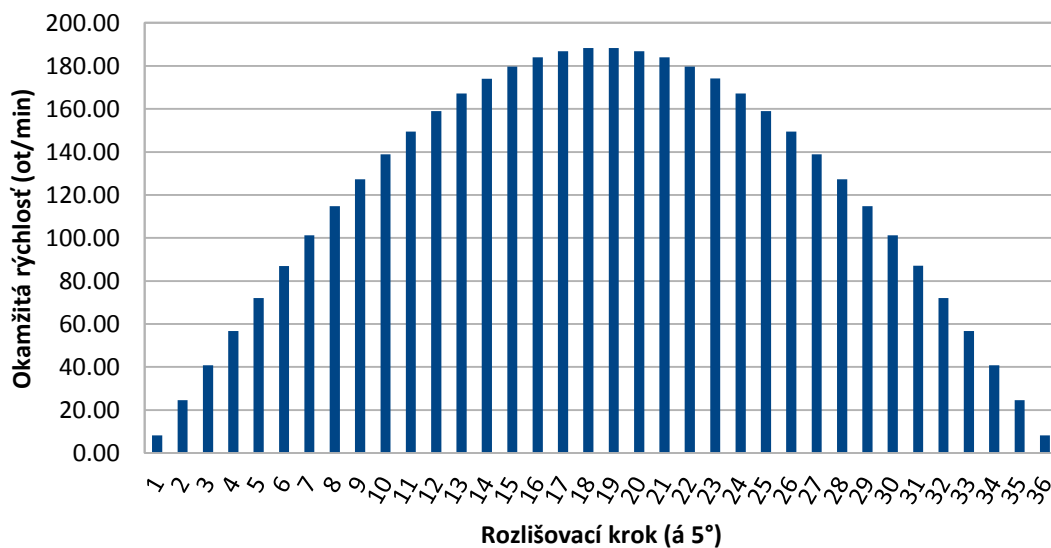
Obr. 5.3.3 Porovnanie 2 bitového inkrementačného enkodéru, 3 bitového absolútneho enkodéru v cyklickej binárnej postupnosti a 3 bitového absolútneho enkodéru v cyklickom Gray-ovom kóde s rozlíšením 72 krokov na otočku.



Obr. 5.3.4 Výsledný optický vzorec semi-absolútneho enkodéru s rozlíšením 72 krokov na otočku. Priemer disku 60mm.

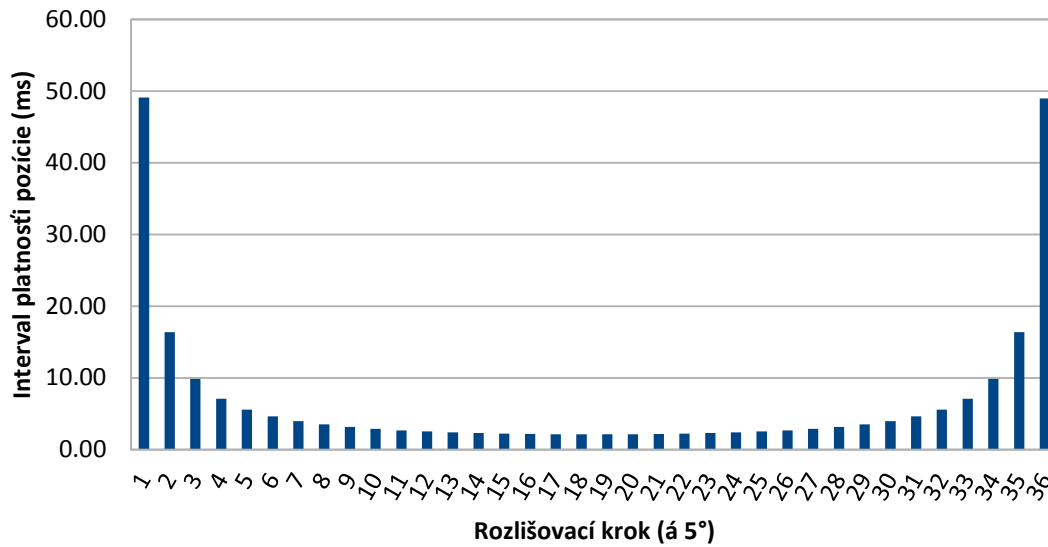
5.4 Optimalizácia vzorkovacieho kmitočtu senzoru

V časti venovanej energetickému potenciálu výchylky senzoru bol definovaný základný priebeh zrýchlenia pohybu lopatky, ktorý vychádza z priebehu funkcie sínus. Tým, že lopatka senzoru sa striedavo bude nachádzať v pokoji, s nulovou rýchlosťou a zároveň v prípade vychýlenia na novú polohu jej rýchlosť nevzrastie skokovo, nie je v tomto prípade potrebný maximálny vzorkovací kmitočtet, ktorý je dimenzovaný na maximálnu predpokladanú dynamiku pohybu lopatky senzoru. Preto je vhodné vzorkovací kmitočtet pre pomalé zmeny optimalizovať. Každým znížením vzorkovacieho kmitočtu dochádza k reálnej úspore energie potrebnej na pokrytie činnosti tohto senzoru. Na nasledujúcom grafe je zobrazený priebeh okamžitej rýchlosti výchylky v každom rozlišovacom kroku enkodéru (5°). Ako referenčný impulz bola zvolená zmena o 180° pri predpokladanej priemernej rýchlosti vychýlenia $720^\circ/s$. To znamená celkom 36 rozlišovacích krokov za 0,25s.



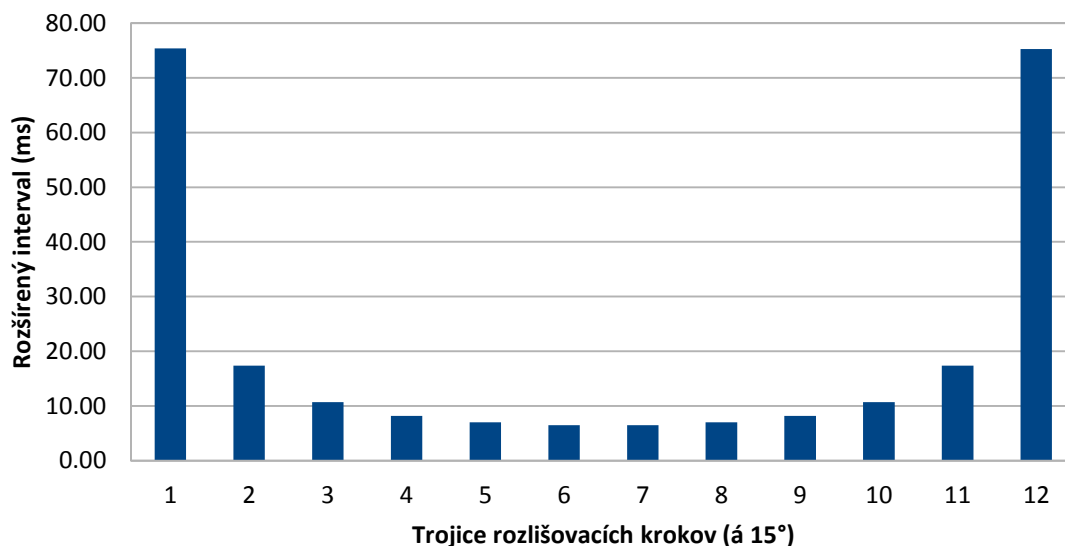
Graf 5.4.1 Okamžité rýchlosti pohybu v jednotlivých rozlišovacích krokoch

Nasledujúci graf zobrazuje dobu zotrvania senzoru na jednotlivých pozíciách.



Graf 5.4.2 Doba zotrvania senzoru v rozlišovacom kroku

Vďaka odolnosti absolútneho enkodéru realizovaného Gray-ovým kódom, umožňujúcej čítať pozíciu enkodéru s posunom až 3 rozlišovacie kroky, je možné sčítať časové intervaly na jednotlivých pozíciách senzoru do trojíc. Tieto rozšírené časové intervaly sú zobrazené v nasledujúcom grafe.



Graf 5.4.3 Doba zotrvania senzoru v rozšírenom rozlišovacom kroku

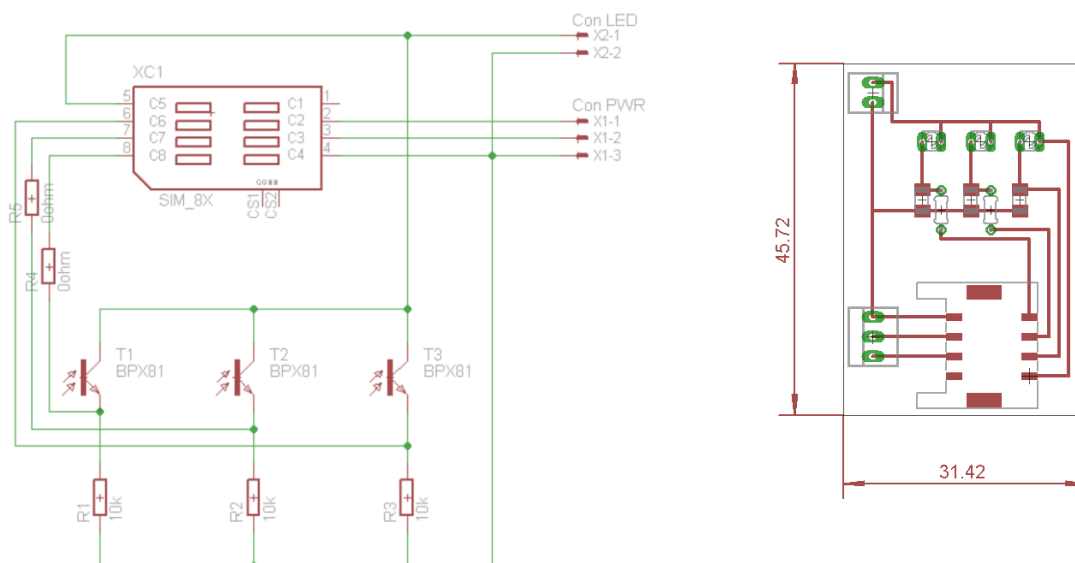
Prvý rozšírený interval referenčnej výchylky trvá 75,4ms čo zodpovedá frekvencii 13,26Hz. Čítanie polohy senzoru minimálne v tejto perióde zabezpečí korektnú detekciu prechodu z ustáleného stavu bez pohybu, do dynamického stavu. K strate informácie o celkovej polohe senzoru tak nedôjde ani pri najväčšom prípustnom zrýchlení lopatky senzoru. Následne je potrebné programovo zabezpečiť zvýšenie vzorkovacieho kmitočtu až na hodnotu zodpovedajúcu najkratšiemu rozšírenému intervalu. Najkratšia doba prechodu senzoru cez trojicu rozlišovacích krokov predstavuje v tomto prípade 6,5ms, čomu zodpovedá kmitočet 153,8Hz.

5.5 Návrh DPS

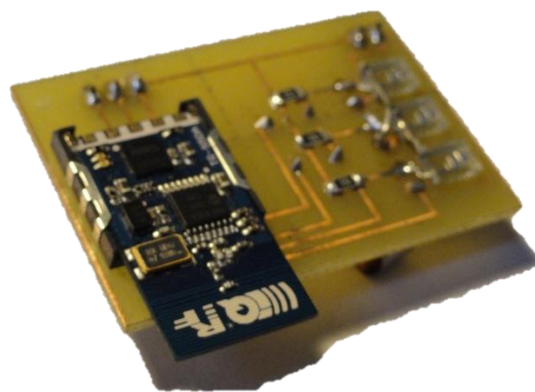
Pre trojkanálový senzor bola navrhnutá doska osadená slotom formátu SIM určeným pre osadenie rádiového modulu s mikroprocesorom IQRF TR-55-DA. Na tomto návrhu bola prakticky využiteľná možnosť veľmi jednoduchej implementácie tejto platformy. Mimo špeciálny konektor určený pre samotný modul pozostáva tento návrh len z veľmi malého množstva komponentov nenáročných na zapojenie aj bez profesionálneho vybavenia. Táto možnosť je vo fáze vývoja prototypu mimoriadne hodnotná. Senzor pozostáva z dvoch dielov. Diel I pozostáva z troch SMD LED diód v paralelnom zapojení s jedným obmedzovacím odporom 180 Ω v sérii. Druhá časť tvorí základovú dosku, na ktorej sa nachádza už spomenutý slot pre rádiový modul a trojica fototranzistorov s emitormi pripojenými na zem cez 10k Ω odpory. Okrem dvoch prepojovacích mostíkov už zapojenie obsahuje len konektor napájania a piny určené na vzájomné prepojenie oboch častí senzoru.



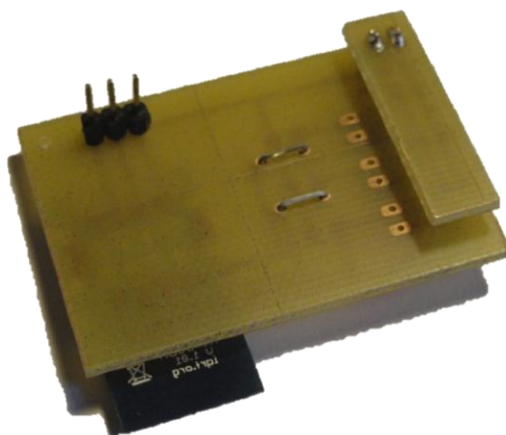
Obr. 5.5.1 Návrh senzoru – časť I



Obr. 5.5.2 Návrh senzoru – časť II

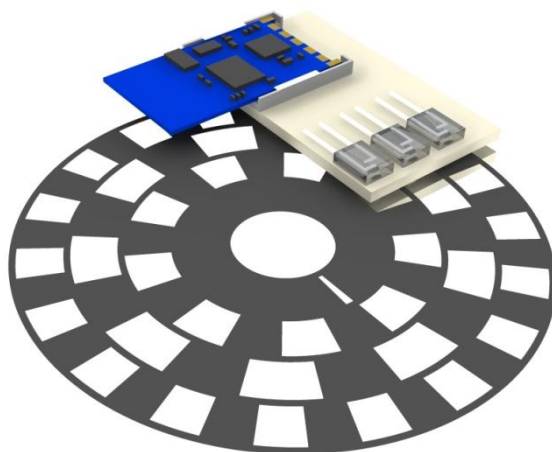


Obr. 5.5.3 Realizácia senzoru – pohľad na IQRF modul v SIM slote

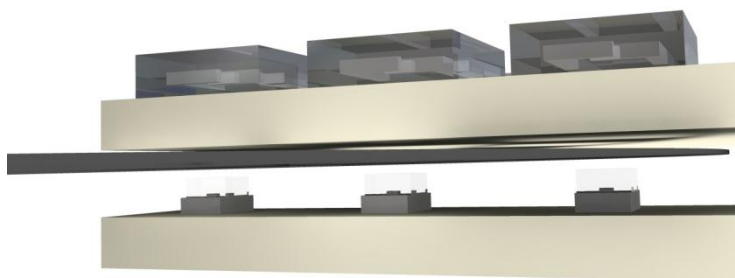


Obr. 5.5.4 Realizácia senzoru – pohľad na konektor napájania a napojenie časti I

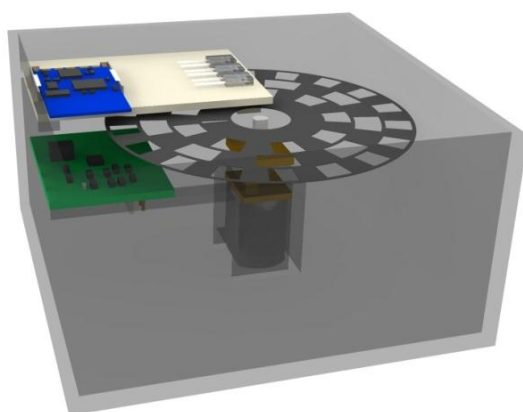
5.6 Návrh konštrukčného riešenia



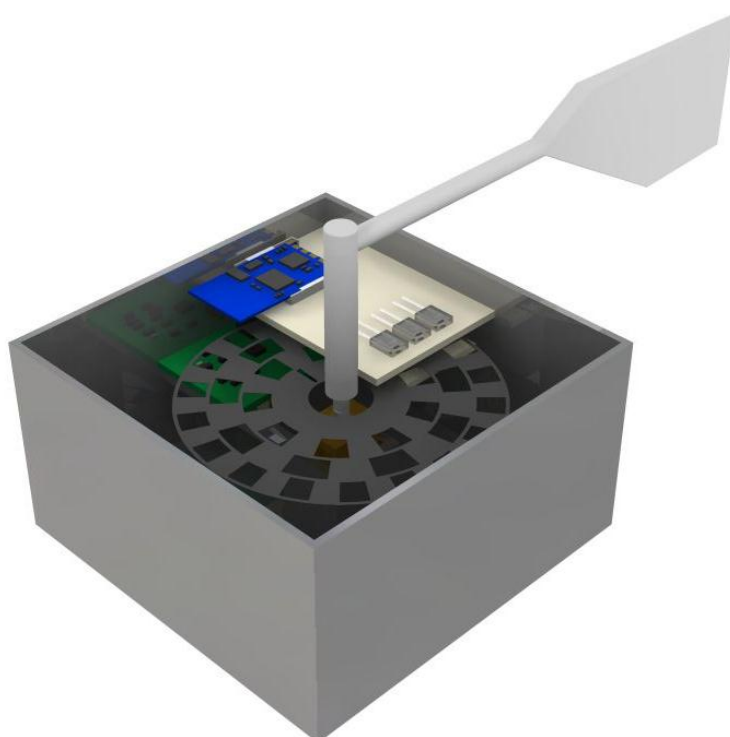
Obr. 5.6.1 Vizualizácia senzoru – pohľad na vzájomnú pozíciu dosky senzoru a enkodéru, ktorý sa môže voľne otáčať okolo osy



Obr. 5.6.2 Vizualizácia senzoru – detail na umiestnenie disku enkodéru, ktorého optická značka buď to umožňuje, alebo neumožňuje prechod svetla z LED diódy na príslušný fototranzistor.



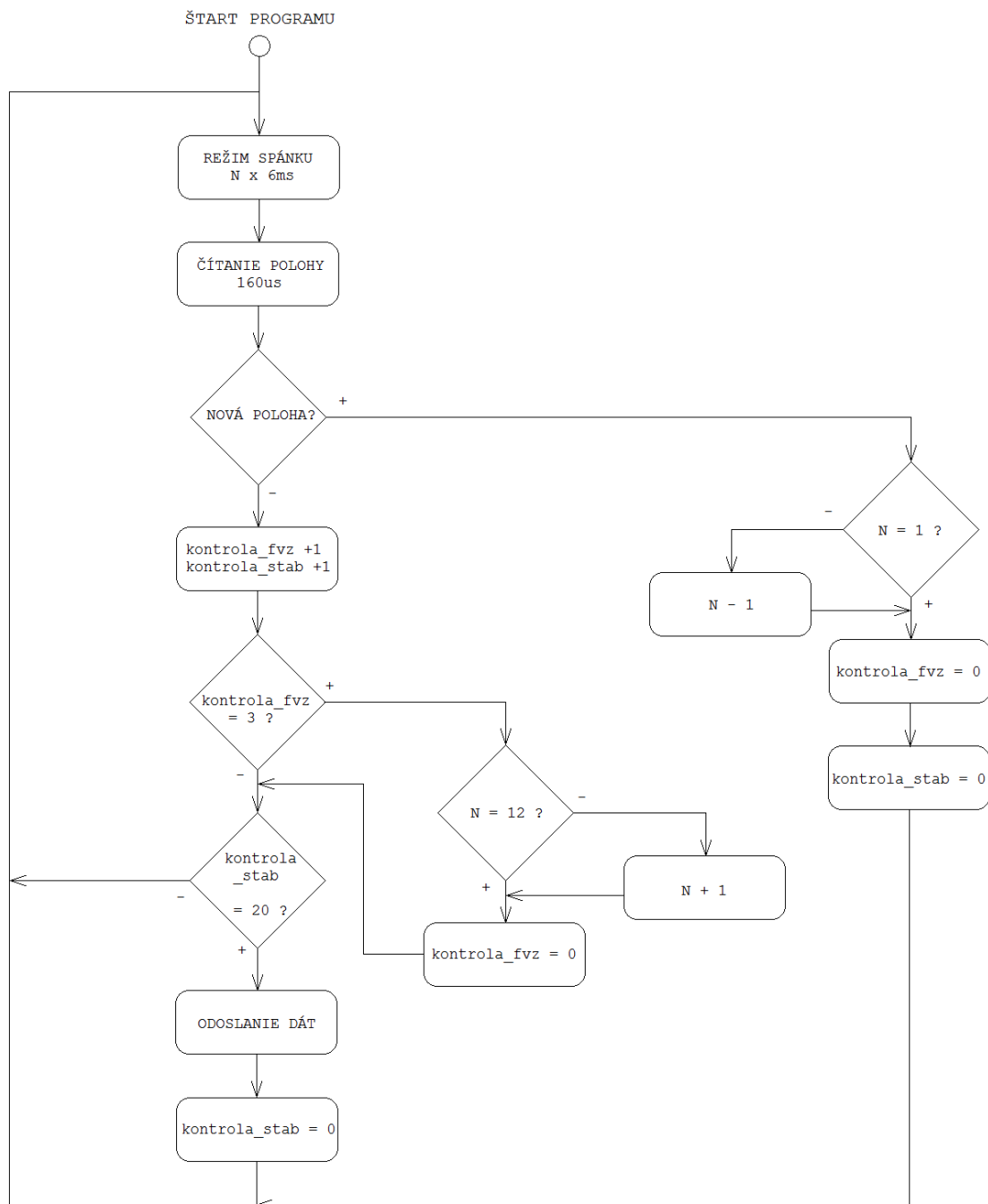
Obr. 5.6.3 Vizualizácia senzoru – pohľad na kompletnú zostavu tvoriacu energetický sebestačný systém, v strede je umiestnený motor (zdroj), na ľavo od motora je modul energy harvesting a nad ním je senzorová časť s enkodérom.



Obr. 5.6.4 Vizualizácia senzoru – ucelený pohľad na funkčné bloky senzoru

5.7 Program a optimalizácia energetických nárokov senzoru

V predchádzajúcej časti tejto práce boli definované minimálne nároky na vzorkovanie aktuálnej polohy senzoru v statickom aj dynamickom režime. Práve optimalizácia vzorkovacieho kmitočtu bude rozhodujúca pre výsledné energetické nároky tohto senzoru. Priebeh vzorkovania spočíva v cykle znázornenom nasledujúcim zjednodušeným stavovým diagramom.



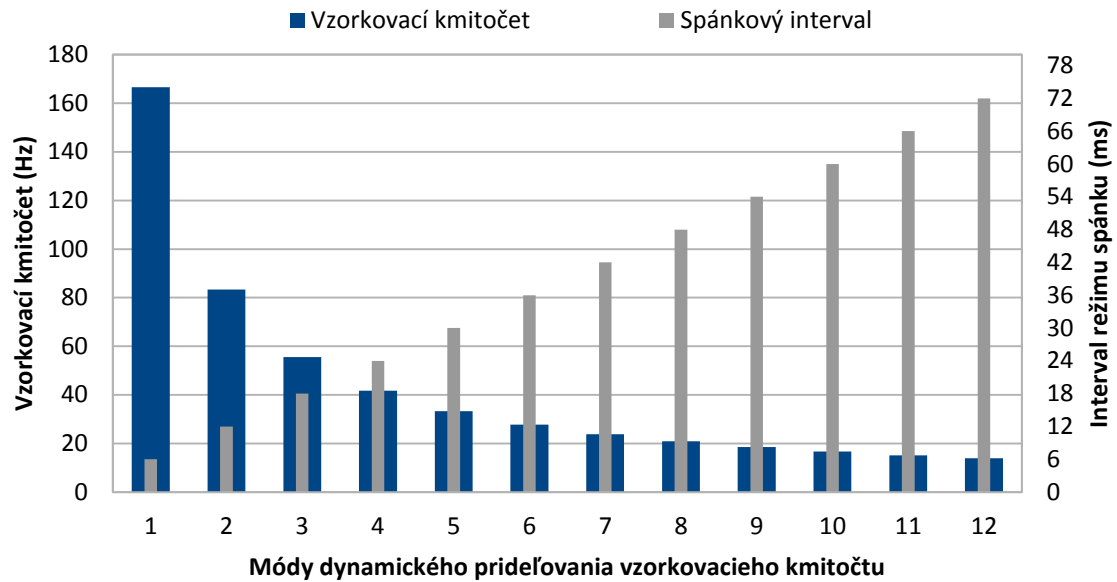
Obr. 5.7.1 Stavový diagram programu

Senzor sa štandardne nachádza v režime spánku. Doba spánku zodpovedá perióde vzorkovacieho kmitočtu. Po vypršaní tohto intervalu prechádza senzor do aktívneho stavu. Vtedy sú výstupom príslušného pinu MCU aktivované LED diódy osvetľujúce fototranzistory. Po ustálení prechodových stavov, bude na základe aktuálnej polohy tienidla umiestneného medzi LED diódami a fototranzistormi detekovaná príslušná kombinácia logických úrovní zodpovedajúca optickému vzoru. Získaná kombinácia troch bitových úrovní predstavuje aktuálnu hodnotu súradnice X a táto hodnota bude následne programovo spracovaná. Po kompletnom čítaní aktuálnej polohy a dokončení všetkých operácií vyplývajúcich z tejto informácie, prechádza senzor znovu do režimu spánku. Výslednú spotrebu je možné znížiť predĺžením intervalu kedy je senzor v režime spánku na najväčšiu prípustnú dobu a skrátením času potrebného na spracovanie nového vzorku. V tejto optimalizácii sú limitmi rýchlosť ustálenia stavu fototranzistorov a minimálne intervaly vzorkovania dané požiadavkami na odolnosť voči dynamickým zmenám polohy.

Z analýzy dynamiky výchylky o 180° priemernou rýchlosťou $120\text{ot}/\text{min}$ bola určená maximálna perióda vzorkovania polohy v dynamickom režime $6,5\text{ms}$ a v statickom režime $75,4\text{ms}$. Testovaním spoľahlivosti detekcie polohy bola zistená limitná doba potrebná na ustálenie logických úrovní detekovaných fototranzistormi $140\mu\text{s}$.

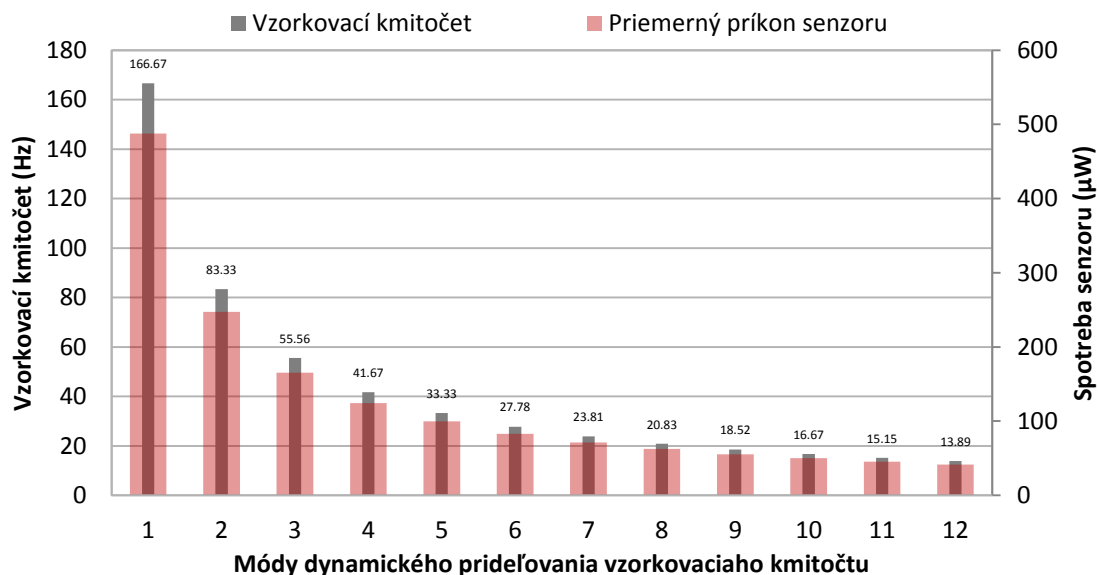
Na základe týchto údajov bol zvolený základný interval doby spánku na 6ms čo zodpovedá maximálnemu vzorkovaciemu kmitočtu približne 166Hz . Po opakovanom načítaní nezmenenej hodnoty súradnice X bude perióda čítania polohy predĺžená vždy o ďalších 6ms . Opakované čítanie rovnakej polohy (3 krát po sebe) znamená, že dynamika zmeny polohy je príliš malá voči aktuálnemu vzorkovaciemu kmitočtu. Predĺžovaním intervalu čítania polohy bude postupne znižovaný vzorkovací kmitočet a zároveň znížená spotreba energie. Interval vzorkovania tak môže byť postupne znížený až v 11-tich krokoch (celkovo 12 vzorkovacích kmitočtov) na najdlhší možný interval 72ms , čo zodpovedá vzorkovaciemu kmitočtu $13,9\text{Hz}$. Ekvivalentne procesu znižovania vzorkovacieho kmitočtu je možné skracovať interval medzi jednotlivými čítaniami polohy v krokoch po 6ms až na základný interval 6ms . Podmienkou pre zvýšenie vzorkovacieho kmitočtu je čítanie rozdielnej hodnoty súradnice X oproti tej predošlej. To môže naznačovať akceleráciu pohybu senzoru a preto je vhodné zvýšiť frekvenciu vzorkovania. Tento princíp dynamického definovania vzorkovacieho kmitočtu predstavuje výraznú úsporu energie potrebnej na činnosť senzoru bez ujmy na rozlišovacích schopnostiach. Systém tak po stabilizovaní výchylky veľmi rýchlo prechádza do režimu

s minimálnou vzorkovacou frekvenciou a zároveň v prípade výchyliiek s malou dynamikou, nie je tento pohyb zbytočne vzorkovaný maximálnou frekvenciou.



Graf 5.7.1 Prehľad rozsahu vzorkovacích kmitočtov

Na nasledujúcom grafe je priame porovnanie priemernej spotreby systému pri danej vzorkovacej frekvencii.



Graf 5.7.2 Prehľad priemernej spotreby senzoru pracujúceho s daným vzorkovacím kmitočtom

Ďalším dôležitým úsporným opatrením, ktoré vyplýva z programového riešenia, je kontrola odosielania informácií o aktuálnej polohe. K bezdrôtovému prenosu dát o polohe senzoru dôjde len v prípade, že je poloha ustálená po určitú minimálnu dobu. V tejto demonštratívnej konfigurácii je tento interval určený načítaním dvadsiatich, po sebe sa opakujúcich rovnakých čítaní aktuálnej polohy. V obsluhu spracovania a odoslania informácie o zmene polohy je implementovaná kontrola duplicit. V prípade, že je senzor ustálený na pevnej pozícii dlhodobo a pravidelne pretečie interval zodpovedajúci dvadsiatim čítaniam polohy, bude systém o polohe informovať len prvýkrát a k ďalšiemu zbytočnému odosielaniu dát už neprichádza. Rovnako aj v prípade, že sa lopatka senzoru krátkodobo vychýli a následne sa vráti do svojej pôvodnej polohy, nie je po tejto informačne nerelevantnej aktivite senzoru odoslaná žiadna informácia.

5.8 Zhodnotenie energetickej sebestačnosti konfigurácie

V predošlých fázach tejto práce boli zistené energetické nároky senzoru a schopnosti generátoru premeniť mechanickú výchylku na elektrickú energiu. Nasledujúca tabuľka zobrazuje prísun elektrickej energie získaný spracovaním mechanického impulzu o danom rozsahu a príslušnej dynamike.

	Energia na vstupe DC-DC konvertoru (μWh)			
Rozsah	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min
10°	0.03	0.11	0.20	0.32
30°	0.08	0.32	0.61	0.96
90°	0.24	0.96	1.83	2.89
180°	0.49	1.91	3.66	5.78

Tab. 5.8.1

Po každom ustálení senzoru na novej polohe, je odoslaný jeden paket nadradenému systému, ktorý túto informáciu následne vyhodnocuje. Paket o veľkosti užívateľských dát 3B odoslaný vysielacím výkonom úrovne TX level 3 spotrebuje 144nWh energie. Nasledujúca tabuľka zobrazuje prírastok energie po odoslaní paketu tejto konfigurácie.

	Prírastok energie po odoslaní paketu (μWh)			
Rozsah	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min
10°	-0.12	-0.04	0.06	0.18
30°	-0.06	0.17	0.47	0.82
90°	0.10	0.81	1.69	2.75
180°	0.34	1.77	3.51	5.64

Tab. 5.8.2

Z výsledkov je zrejmé, že veľmi malé zmeny s malou dynamikou majú pre systém záporný prínos energie. To znamená, že v týchto prípadoch vzniknutá potreba informovať o novej polohe spotrebuje viac energie ako bolo systému dodané mechanickým impulzom. Tieto výchylky budú energeticky nesebestačné a musia byť dotované z energie získanej z predošlých, energeticky významnejších impulzov.

Nasledujúca tabuľka vyjadruje zostatok energie v počte paketov, ktoré je systém schopný z daného impulzu dotovať.

Prírastok energie na N ďalších dátových prenosov					
Rozsah	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min	Priemer
10°	-0.81	-0.26	0.41	1.23	0.14
30°	-0.44	1.21	3.23	5.69	2.42
90°	0.69	5.63	11.70	19.07	9.27
180°	2.39	12.26	24.41	39.13	19.55

Tab. 5.8.3

Z týchto výsledkov je vidieť, že dynamickejšie impulzy dokážu generovať pomerne veľké rezervy čo je základným predpokladom pre udržateľnú energetickú sebestačnosť systému. Po odoslaní paketu ale spotreba systému nie je nulová. Je nutné zabezpečiť spotrebu senzoru, ktorý aj v ustálenom stave bez okamžitého prísunu energie, má minimálny príkon 41,6 μ W (pri vzorkovaní frekvenciou 13,9Hz). Nasledujúca tabuľka zobrazuje dobu, na ktorú dokáže získaná energia zabezpečiť spotrebu senzoru.

Prírastok energie na N minút činnosti senzor					
Rozsah	30 ot/min	60 ot/min	90 ot/min	120 ot/min	Priemer
10°	-0.17	-0.05	0.09	0.26	0.03
30°	-0.09	0.25	0.67	1.18	0.50
90°	0.14	1.17	2.43	3.96	1.93
180°	0.50	2.55	5.07	8.13	4.06

Tab. 5.8.4

Z týchto dát sa dá už pomerne objektívne zhodnotiť skutočná energetická sebestačnosť tohto senzoru. Aby bol systém skutočne sebestačný je potrebné, aby prísun energie za určitú periódu bol minimálne zhodný s energiou spotrebovanou za tento čas. Aby to platilo v tomto prípade by musela v priemere každé 2 - 3 minúty nastať výchylka o 90° s dynamikou 90ot/min. Či je možné s tak intenzívnymi a častými zmenami skutočne počítať je diskutabilné. Na exaktné posúdenie tohto predpokladu by bola vhodná meteorologická štúdia. Vo všeobecnosti je ale možné predpokladať že v priebehu roka sa v nejakých sporadických intervaloch vyskytujú veterné dni bohaté na prudké a časté výchylky. Vtedy by tento systém rozhodne nedostatkom energie netrpel a o jeho energetickej sebestačnosti by bolo zbytočné pochybovať. Naopak, pomerne bežné sú aj takmer bez veterné dni. Vtedy sa dajú očakávať aj celé hodiny bez pohybu a teda aj bez prísunu energie. Vtedy rezervy postačujúce rádovo na jednotky minút činnosti senzoru rozhodne stačiť nebudú. Systém v takýchto podmienkach je energeticky nesebestačný. Nadbytočnú energiu z veternejších dní by preto bolo vhodné akumulovať a následne dotovať činnosť senzoru v dňoch kedy sú

medzi prísunmi energie veľmi dlhé intervaly. Stačil by na to napríklad akumulátor o kapacite 100mAh (370mWh). Pri plnom nabití táto kapacita postačuje na takmer 8.900 hodín (1 rok) činnosti senzoru s príkonom 41,6 μ W.

Za týchto okolností je pravdepodobné, že systém bude skutočne samostatný a na jeho nepretržitú činnosť nebude potrebný nijaký externý zdroj napájania.

6 ZÁVER

Výsledkom tejto práce je funkčný prototyp energeticky sebestačného senzoru smeru vetra napájaný z mechanických impulzov produkovaných vychyľovaním lopatky do smeru vetra. Do procesu jeho vzniku spadala návrh vhodného spôsobu určenia polohy, optimalizácia aktivity senzoru a minimalizácia jeho spotreby, výber a implementácia vhodného konvertoru mechanickej energie na elektrickú, riešenie zachytávania a akumulácie malých objemov energie extrahovaných z mechanických vstupov, hardvérové riešenie vrátane návrhu a implementácie dosiek plošných spojov, návrh vhodného uloženia jednotlivých komponentov a vyhotovenie jednotky demonštrujúcej informáciu získanú senzorom v podobe fyzického natočenia indikátora. Hlavným výsledkom tejto práce je dôkaz, že už pri dnešných technológiách je možné konfigurovať špecifické zariadenia tak, že medzi ich typickou činnosťou a požiadavkami na napájanie môže vzniknúť synergia, umožňujúca cyklickú činnosť tohto zariadenia bez ďalších externých zdrojov energie. Energetická sebestačnosť so sebou prináša obrovský potenciál nasadenia vo veľmi širokom spektre aplikácií. Práve bezdrôtové sensorové moduly sú najlepším adeptom na komerčné nasadenie mikro energy harvesting-u v tom pravom slova zmysle. Utopická snaha o „*perpetuum mobile*“ v tomto prípade už nie je márnym pokusom o popretie fyzikálnych zákonov, ale dobrou motiváciou k optimalizáciám.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] CHEN, Xi, Shiyu XU, Nan YAO a Yong SHI. 1.6 V Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting Using PZT Nanofibers. *Nano Letters* [online]. 2010, vol. 10, issue 6, s. 2133-2137 [cit. 2013-12-29]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/nl100812k>. Dostupné z [www: https://www.princeton.edu/~nyao/pdf/Nano%20Letter%202010%20nl100812k.pdf](http://www.princeton.edu/~nyao/pdf/Nano%20Letter%202010%20nl100812k.pdf)
- [2] About Bluetooth® Low Energy Technology. In: [online]. Dostupné z [www: http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy-tech-info.aspx](http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy-tech-info.aspx)
- [3] ANT Basics. *ANT Basics* [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z [www: http://www.thisisant.com/developer/ant/ant-basics/](http://www.thisisant.com/developer/ant/ant-basics/)
- [4] Approaching the horizon of energy harvesting. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z [www: http://www.ti.com/lit/wp/sszy004/sszy004.pdf](http://www.ti.com/lit/wp/sszy004/sszy004.pdf)
- [5] DK-EVAL-04 IQRF development kit. In: [online]. Dostupné z [www: http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=190](http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=190)
- [6] MITCHESON, P.D., E.M. YEATMAN, G.K. RAO, A.S. HOLMES a T.C. GREEN. Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2008, vol. 96, issue 9, s. 1457-1486 [cit. 2013-12-29]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2008.927494>. Dostupné z [www: http://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/1219/1/proc_IEEE_08.pdf](http://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/1219/1/proc_IEEE_08.pdf)
- [7] Energy Harvesting Technology. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z [www: http://sk.mouser.com/applications/rf_energy_harvesting/](http://sk.mouser.com/applications/rf_energy_harvesting/)
- [8] General Guide to IQRF. In: [online]. Dostupné z [www: http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=257](http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=257)
- [9] IXOLARTM High Efficiency SolarBIT. In: [online]. Dostupné z [www: http://ixapps.ixys.com/DataSheet/20110302-KXOB22-12X1-DATA-SHEET.pdf](http://ixapps.ixys.com/DataSheet/20110302-KXOB22-12X1-DATA-SHEET.pdf)
- [10] DEMENTYEV, Artem, Steve HODGES, Stuart TAYLOR a Joshua SMITH. Power consumption analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT sensor nodes in a cyclic sleep scenario. *2013 IEEE International Wireless Symposium (IWS)* [online]. [cit. 2013-12-29].

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ieee-iws.2013.6616827>. Dostupné z [www: http://research.microsoft.com/pubs/192688/IWS%202013%20wireless%20power%20consumption.pdf](http://research.microsoft.com/pubs/192688/IWS%202013%20wireless%20power%20consumption.pdf)

[11] RF Energy Harvesting and Wireless Power for Low-Power Applications. In: [online]. Dostupné z [www: http://www.powercastco.com/PDF/powercast-overview.pdf](http://www.powercastco.com/PDF/powercast-overview.pdf)

[12] . RF-based Wireless Charging and Energy Harvesting. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z [www: http://sk.mouser.com/applications/rf_energy_harvesting/](http://sk.mouser.com/applications/rf_energy_harvesting/)

[13] Technical Guide. In: *Technical Guide* [online]. Dostupné z [www: http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=79](http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=79)

[14] . Thermoelectric Energy Harvesting. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z [www: http://www.digikey.com/us/en/techzone/energy-harvesting/resources/articles/thermoelectric-energy-harvesting.html](http://www.digikey.com/us/en/techzone/energy-harvesting/resources/articles/thermoelectric-energy-harvesting.html)

[15] TR-55D Transceiver Module Data Sheet. In: [online]. Dostupné z [www: http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=239](http://www.iqrf.org/weben/downloads.php?id=239)

[16] ULP meets energy harvesting. [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z [www: http://www.ti.com/corp/docs/landing/cc430/graphics/slyy018_20081031.pdf](http://www.ti.com/corp/docs/landing/cc430/graphics/slyy018_20081031.pdf)

[17] *ZigBee Specification* [online]. [cit. 2013-12-29]. Dostupné z [www: http://www.zigbee.org/Specifications.aspx](http://www.zigbee.org/Specifications.aspx)

[18] *TI BQ-25504*. In: TI BQ-25504 [online]. DOI: Ultra Low Power Boost Converter with Battery Manag. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>

[19] Encoders. In: [online]. DOI: Rotary Encoder (Incremental/Absolute) E6C3. Dostupné z: <http://www.webddigital.com/fabricantes%5Comron%5Cpdf%5Cencoders%5CE6C3.pdf>

[20] [online]. DOI: e6_encoder. Dostupné z: http://www.usdigital.com/assets/images/galleries/e6_webproduct_01.jpg

[21] HUBDISK-2 2" Transmissive Rotary Codewheel. In: [online]. DOI: Rotary Codewheel. Dostupné z: http://www.usdigital.com/assets/images/galleries/hubdisk2_webproduct_01.jpg

ZOZNAM PRÍLOH

- [A] Zdrojový kód modulu: *Encoder.c*
- [B] Návrhy DPS: *Eagle.zip*
- [C] Vizualizácie: *Inventor.zip*