

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

**System pro monitorování stavu prostředí
v budovách s využitím napájení energie z okolí**

**System for an Indoor Environment Monitoring
that is using Energy Harvesting Technology**

Studijní program: Elektronika a komunikace
Studijní obor: Elektronika

Autor: Jiří Pelant

Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa Ph.D.

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pelant** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **392870**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Systém pro monitorování stavu prostředí v budovách s využitím napájení z energie okolí

Název diplomové práce anglicky:

System for an Indoor Environment Monitoring that Is Using an Energy Harvesting Technology

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou měření stavu prostředí v budovách. Zjistěte možnosti měření základních hodnot prostředí a jejich přenosu do sběrného bodu. Prostudujte principy, které se využívají pro minimalizaci energetické spotřeby a pro podporu napájení s využitím energie z okolí.
2. Na základě získaných poznatků navrhnete zařízení, které bude schopno efektivně měřit, shromažďovat a vhodným způsobem zobrazovat požadované hodnoty.
3. Realizujte funkční systém a otestujte ho na typickém příkladu využití. Zhodnotte možnosti jeho využití s ohledem na nároky na údržbu v běžném provozu. Navrhnete možná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Garlík, B.: Inteligentní budovy, BEN - technická literatura, Praha 2012, ISBN 978-80-7300-440-8
- [2] Vedral, J., Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.
- [3] Mann, B.: C pro mikrokontroléry, 1. Vydání, Praha 2003, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-077-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. Adam Bouřa, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **12.09.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**


Ing. Adam Bouřa, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24.5.2019

.....
Jiří Pelant

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Adamovi Bouřovi, Ph.D. za vstřícnost při výběru mnou zvoleného tématu, za trpělivost v průběhu tvorby a za cenné rady v závěrečné fázi psaní této práce.

Dále bych chtěl poděkovat vedení společnosti IMA s.r.o. za prostor pro vývoj praktické části diplomové práce. Díky tomu mohlo vzniknout zařízení, které bude sloužit nejen pro obhajobu této práce, ale bude mít šanci i pro praktické využití v praxi.

Na závěr bych chtěl poděkovat mé manželce za trpělivost při tvorbě této práce, protože především její dokončení vyžadovalo mnoho mého úsilí a nervů. Z velké části jen díky ní tato práce spatřila světlo Světa.

Obsah

1.	Úvod	1
1.1.	Charakteristika problematiky	1
1.2.	Obsah práce	2
2.	Cíle práce	3
3.	Teoretický rozbor	5
3.1.	Energy harvesting	5
3.1.1.	Solární energie	6
3.1.2.	Tepelná energie	7
3.2.	Spínané zdroje	8
3.2.1.	Snižující topologie	8
3.2.2.	Zvyšující topologie	9
3.3.	Akumulace energie	9
3.3.1.	Superkondenzátor	9
3.4.	Měřicí senzory environmentálních veličin	12
3.4.1.	Senzory teploty	12
3.4.1.1.	Termistory	12
3.5.	Komunikační rozhraní	13
3.5.1.	Sériová komunikační rozhraní	13
3.5.2.	SPI – Serial Peripheral Interface	14
3.5.3.	I ² C – Inter Integrated Circuit	14
4.	Návrh řešení	16
4.1.	Rozbor řešení	16
4.2.	Topologie sítě	16
4.3.	Senzor	17
4.4.	Sběrný bod	19
5.	Konstrukce bezdrátového senzoru	19
5.1.	Shrnutí požadavků na senzor	19
5.2.	Energetický zdroj	19
5.2.1.	Solární článek	20
5.2.2.	Termoelektrický generátor	21
5.3.	Obvod zajišťující zvýšení napěťové úrovně	22
5.4.	Energetické úložiště	26
5.5.	Spínače	26

5.6.	Lineární stabilizátor napětí.....	27
5.7.	Spínaný zdroj napětí.....	28
5.8.	Bezdrátový komunikační modul.....	29
5.9.	Řídicí mikrokontrolér.....	30
5.10.	Topologie senzoru.....	31
5.10.1.	Zdrojová část.....	31
5.10.2.	Senzorová část.....	32
5.10.3.	Vysílací část.....	32
5.10.4.	Řídicí část.....	32
5.10.5.	Řízení energie – Power management.....	32
5.10.6.	Ochrana superkondenzátoru – balancování.....	32
5.11.	Programové vybavení senzoru.....	33
5.12.	Datová zpráva.....	34
5.13.	Návrh plošného spoje.....	35
5.14.	Hotový bezdrátový senzor.....	35
6.	Konstrukce sběrného bodu.....	38
6.1.	Shrnutí požadavků na sběrný bod.....	38
6.2.	Bezdrátový komunikační modul.....	38
6.3.	Řídicí mikrokontrolér.....	38
6.4.	Programové vybavení sběrného bodu.....	38
6.5.	Návrh plošného spoje.....	39
6.6.	Hotový sběrný bod.....	39
7.	Ověření funkčnosti a měření.....	41
7.1.	Testovací pracoviště.....	41
7.2.	Senzor.....	43
7.2.1.	Měření obvodu zajišťujícího zvýšení napěťové úrovně.....	43
7.2.2.	Měření dosahu zařízení v závislosti na parametrech přenosu dat.....	43
7.2.3.	Měření výdrže superkondenzátoru.....	44
7.2.4.	Měření klidové spotřeby.....	45
7.3.	Sběrný bod.....	45
7.3.1.	Výstup dat.....	45
8.	Závěr.....	47
	Použité zdroje.....	49
	Přílohy.....	I
I.	Schémata senzoru.....	I
II.	Schémata sběrného bodu.....	IV

III.	Plošné spoje senzoru.....	VI
IV.	Plošné spoje sběrného bodu.....	VII

Seznam zkratek

IoT	„Internet of Things“ – internet věcí
EH	Energy harvesting – sklizeň energie z okolí
SC	Solar cell – solární článek
TEG	Thermoelectric generator – termoelektrický generátor
TEC	Thermoelectric cooler – termoelektrický chladič
SMPS	Switch Mode Power Supplies – spínaný zdroj
EDLC	Electrical Double Layer Capacitor – kondenzátor s elektrickou dvojvrstvou
NTC	Negative Temperature Coefficient – termistor se záporným teplotním koeficientem
PTC	Positive Temperature Coefficient – termistor s kladným teplotním koeficientem
DPS	Deska Plošného Spoje
CAN	Controller Area Network – komunikační rozhraní
SPI	Serial Peripheral Interface – komunikační rozhraní
I ² C	Inter Integrated Circuit – komunikační rozhraní
MISO	Master In Slave Out – datový vodič sběrnice SPI
MOSI	Master Out Slave In – datový vodič sběrnice SPI
SCK	synchronizační hodiny sběrnice SPI
SS	Slave Select – povolovací signál sběrnice SPI
DO	Data Out – výstup dat
DI	Data In – vstup dat
SCL	synchronizační hodiny sběrnice I ² C
SDA	data sběrnice I ² C
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor – polem řízený tranzistor

LDO	Low-dropout – lineární regulátor s nízkým úbytkem
SRAM	Static random-access memory – statická paměť s náhodným přístupem
RTOS	Real-Time Operating System – operační systém reálného času
LwIP	Lightweight Internet Protocol – odlehčená verze IP stacku pro embedded zařízení

Seznam obrázků

- 3.1-1 (5) Blokové schéma energy harvesting systému [1]
- 3.2-1 (8) Snižující topologie spínaného zdroje [17]
- 3.2-2 (9) Zvyšující topologie spínaného zdroje [17]
- 3.3-1 (10) Nabíjení a vybíjení superkondenzátor [5]
- 3.3-2 (10) Náhradní obvodové schéma superkondenzátoru [5]
- 3.3-3 (11) Nabíjení superkondenzátoru [5]
- 5.2-1 (21) Napětí naprázdno a vnitřní odpor u článku TEC12703 [8]
- 5.3-1 (23) Doporučené zapojení obvodu BQ25505 od Texas Instruments [9]
- 5.3-2 (23) Doporučené zapojení obvodu LTC3108 od Analog Devices [10]
- 5.3-3 (24) Vnitřní zjednodušení zapojení obvodu LTC3108 od Analog Devices [10]
- 5.4-1 (26) Superkondenzátor Murata [11]
- 5.5-1 (27) Aplikační zapojení spínače SiP32431 [12]
- 5.6-1 (28) Typické aplikační zapojení obvodu MCP1810 [13]
- 5.7-1 (28) Typické aplikační zapojení obvodu TPS62740 [14]
- 5.8-1 (29) Typické obvodové zapojení CC1101 [15]
- 5.10-1 (31) Topologie senzoru
- 5.14-1 (35) Vysílací modul s CC1101
- 5.14-2 (36) Hotový senzor druhé revize bez vysílacího modulu
- 5.14-3 (36) Hotový senzor včetně vysílacího modulu
- 6.6-1 (40) Hotový sběrný bod
- 7.1-1 (41) Testovací pracoviště
- 7.1-2 (41) Detail senzoru v konfiguraci s termoelektrickým článkem na rozvodech teplé vody
- 7.1-3 (42) Detail senzoru v konfiguraci se solárním článkem
- 7.2-1 (43) Naměřené zatěžovací charakteristiky LTC3108
- 7.2-2 (44) Výdrž senzoru
- 7.3-1 (45) Logovací výstup přes virtuální sériový port po připojení k počítači
- 7.2-2 (46) Zobrazení dat odeslaných do cloudu
- I-1 (I) Obvod pro zvýšení vstupního napětí
- I-2 (I) Zapojení mikrokontroléru s programovacím a logovacím rozhraním
- I-3 (II) Zapojení modulového vysílače
- I-4 (II) Sensorová část
- I-5 (II) Power management první revize
- I-6 (III) Power management opravené druhé revize
- I-7 (III) Power management první revize druhá část
- I-8 (IV) Power management opravené druhé revize druhá část
- II-1 (IV) Zapojení konektorů pro připojení k vývojové desce Nucleo
- II-2 (V) Zapojení bezdrátového modulu
- II-3 (V) Zapojení tlačítek a indikačních diod
- II-4 (V) Zapojení displeje
- III-1 (VI) První revize senzoru
- III-2 (VI) Druhá revize senzoru
- IV-1 (VII) Rozšiřující deska sběrného bodu

Seznam tabulek

- 3.1-1 (6) Orientační hodnoty energií z okolí [16]
- 5.12-1 (34) Hlavička datové zprávy
- 5.12-2 (34) Nosná část datové zprávy
- 7.2-1 (44) Spotřeba energie a dosah v závislosti na parametrech vysílání

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem systému pro monitorování stavu prostředí jako jsou například teplota a vlhkost. Jedná se o systém, výsledné řešení je tedy souborem několika částí. Úkolem celého řetězce je získání hodnot o stavu prostředí a jejich přenesení až na místo konečného zpracování. Řešení zahrnuje kromě samotného měření hodnot i například získání energie pro jejich odeslání. Sensory jsou navrženy tak, aby splnily požadavky jako jsou co nejnižší nároky na údržbu, snadnou instalaci a spolehlivý provoz. Výstup dat umožňuje jejich odesílání k dalšímu zpracování. Obsah práce zahrnuje teoretický rozbor základních principů, které systém využívá, návrh a diskuze konstrukce, její výrobu a měření některých klíčových bloků včetně ověření jejich funkčnosti. Výsledkem je funkční systém složený z několika senzorů a jednoho sběrného bodu. Změřená data jsou předávána bezdrátově do sběrného bodu, a nakonec do dalšího zpracování.

Klíčová slova

měření prostředí, měření teploty, bezdrátová komunikace, energy harvesting, monitorování stavu prostředí, předávání dat přes Ethernet

Abstract

This diploma thesis deals with the design of a system for monitoring the environment such as temperature and humidity. It is a system, so the final solution is a set of several parts. The task of the whole chain is to get the values of the environment and their transfer to the place of final processing. The solution includes, besides the actual measurement of values, also acquisition energy for sending them. The sensors are designed to meet requirements such as low maintenance, easy installation and reliable operation. Data output allows sending them for further processing. The content of the thesis includes a theoretical analysis of the basic principles used by the system, design and discussion of construction, its production and measurement of some key blocks including verification of their functionality. The result is a functional system consisting of several sensors and one collection point. The measured data is transmitted wirelessly to the collection point and finally to the next processing.

Keywords

environmental measurement, temperature measurement, wireless communication, energy harvesting, environmental monitoring, data transfer over Ethernet

1. Úvod

1.1. Charakteristika problematiky

Rozvoj technologií, rozšíření internetu umožňuje vyvinout zařízení, které dříve vůbec neexistovaly, a pokud ano, tak pouze v mnohem jednodušších formách. Vzniklo odvětví technologií, kterému se říká Internet věcí (Internet of Things) – IoT. Máme možnost připojit jednoduchá zařízení, jako jsou senzory teploty do celosvětové sítě a v podstatě odkudkoliv sledovat naměřené hodnoty. Stejně tak můžeme naopak vzdáleně ovládat například topení, rozsvítit světla a další.

Důvodů pro například zmíněné vzdálené zobrazování hodnot může být několik. Můžeme zkrátka chtít mít jen představu, co se na daném místě děje a jaké tam panují aktuálně podmínky. Smysl ale může být i hlubší. Můžeme například hlídat teplotu z důvodu zabránění škod v případě, že by došlo k jejímu výraznému poklesu. Následovat by pak mohlo třeba zamrznutí vody a popraskání trubek topné soustavy, úhyn rostlin a další. Pokud budeme hodnoty kontrolovat, můžeme v případě poruchy tento stav rychle odhalit a zajistit nápravu.

Ať už ale bude důvod využití jakýkoliv, budeme potřebovat zdroj dat. Nároky na tento zdroj budou odpovídat dalšímu způsobu využití získaných dat. Zde se bude lišit třeba požadavek na údržbu a spolehlivost. Senzor v kategorii spotřební elektroniky, který slouží ke sledování místní venkovní teploty bude mít jiné nároky než zařízení, které kontroluje důležité soustavy a jehož výpadek může způsobit škody. Stejně jako požadavek na údržbu. U běžného senzoru nebude nezbytně nutné, aby jeho zdroj energie měl dlouhou výdrž. U komerčního zařízení naproti tomu bude v případě údržby znamenat výměn zdroje nezanedbatelné náklady.

Lišit se bude i zpracování získaných dat. Zatímco v případě běžného senzoru bude plně dostačující třeba i ostrovní systém místní sítě, který pouze zobrazí teplotu na displeji, komerční řešení bude zpravidla vyžadovat přístup vzdálený. Kromě toho bude zapotřebí data předávat dalšímu systému pomocí standardizovaných protokolů. Naopak zde bude displej zobrazující data nepotřebný, až zbytečný, protože bude jen navyšovat náklady na výrobu.

1.2. Obsah práce

Diplomová práce obsahuje teoretický rozbor problematiky a principů, které bude následně zkonstruované zařízení používat. Zařízení je navrženo a otestováno. Bude demonstrována funkčnost a zhodnoceny stanovené cíle.

2. Cíle práce

Cílem práce je návrh zařízení, které bude schopno efektivně měřit, shromažďovat a vhodným způsobem zobrazovat požadované hodnoty.

Zařízení by mělo být na základě návrhu realizováno a otestováno na typickém příkladu využití. Na závěr by měly být zhodnoceny možnosti jeho využití s ohledem na nároky na údržbu v běžném provozu, případně navrhnutá možná vylepšení.

Cíle práce jsou poměrně obecné, proto je vhodné je rozebrat důkladněji.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, je důležité rozlišit, pro jaká prostředí bude zařízení určeno a jaké na něj budou kladeny požadavky.

Sortiment spotřebního zařízení je dnes velmi široký. Pokud se budeme bavit o monitoringu stavu prostředí, bude se typicky jednat o domácí meteostanice. Mezi vlastnosti takového zařízení bude typicky patřit:

- Velmi jednoduché ovládání
- Napájení senzoru z primárního článku
- Měření teploty, případně vlhkosti
- Připojení externího senzoru – drátového v případě velmi levných provedení, případně bezdrátového v případě dražších variant
- Zobrazení naměřených hodnot na displeji zobrazovací části

Výhodou bude zejména nízká pořizovací cena zařízení a uživatelský komfort – extrémně snadná instalace a údržba. Takové meteostanice jsou tedy ideální pro zobrazení například venkovní teploty nebo teploty v ostatních místnostech.

Mezi nevýhody, které budou bránit využití přesahující informační úroveň bude patřit:

- Nemožnost připojení většího počtu senzorů
- Údržba – nutnost měnit primární články
- Nemožnost napojení na další systémy zpracovávající získané hodnoty

Cílem této práce by tedy mělo být řešení, které bude tyto nevýhody řešit. Zařízení by mělo být, pokud možno, bezúdržbové – tedy bez nároků na častou výměnu napájecích článků, mělo by mít možnost připojení většího počtu senzorů. A nakonec, sběrná část by

měla mít možnost napojení na další systémy – z toho plyne využití standardizovaných komunikačních rozhraní a protokolů.

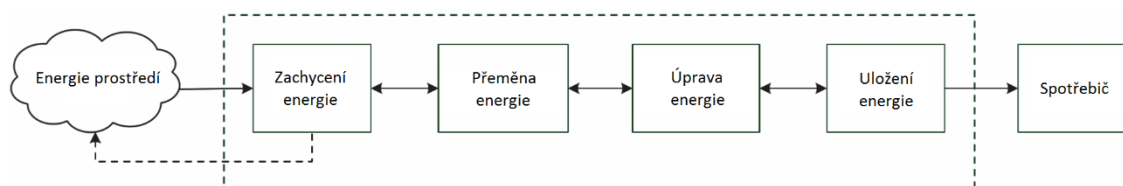
System bude obsahovat:

- Větší počet bezdrátových senzorů využívajících energie z okolí
- Sběrný bod dat napojený přes internet na další systémy

3. Teoretický rozbor

3.1. Energy harvesting

Anglický termín „Energy harvesting“, který by se dal volně přeložit jako sklizeň energie se obvykle vztahuje k zařízení, nebo systémům, které zachycují (neboli těží) okolní energii prostředí a převádí ji do užitečné formy, kterou je typicky elektřina. Široké spektrum obnovitelných zdrojů obsahuje například solární energii, větrnou energii nebo energii vodních vln. [1]



Obr. 3.1-1 Blokové schéma energy harvesting systému [1]

Z obr. 3.1-1, který zobrazuje blokové schéma typického energy harvesting systému je patrné, že získání elektrické energie z prostředí nelze typicky přímo, ale provádí se v několika krocích. Princip je možné demonstrovat například na solárním článku – solar cell SC nebo termoelektrickém generátoru – thermoelectric generator TEG. Energii prostředí je nejdříve nutné zachytit. V případě SC není tato část moc patrná, světelné záření bude dopadat skrz ochranné sklo na PN přechod. U TEG bude touto částí například chladič, který souží at' už k odvodu tepla, nebo v obráceném režimu jako zdroj tepla z prostředí. Následuje přeměna energie na elektrickou. SC generuje elektrickou energii dopadem fotonu na PN přechod, kde dojde k vyražení náboje fotonem a vzniklý elektron představuje elektrickou energii, u TEG vzniká elektrický proud rozdílem teplot na rozdílných kovech za přítomnosti Seebeckova jevu. Elektrická energie je tedy již nyní k dispozici. Bohužel, její forma ještě není plně využitelná. Napětí, zejména to, které je generované na TEG přechodu je při běžných podmínkách velmi malé. Navýšit ho lze zapojením několika článků do série, ale ani to není možné do nekonečna. Proto je nutné energii upravit. V tomto případě se jedná zejména o změnu napěťové úrovně na takovou, kterou je schopen připojený spotřebič akceptovat. Posledním blokem je uložení energie do zásoby. To je důležité zejména pokud je potřeba zařízení nepřetržitě napájet. Při běžném provozu nebude k dispozici neustálý tok světla, nebo tepelné energie. Dalším důvodem může být různá spotřeba zařízení v různých režimech – například vysílač, který odesílá zprávu jednou za několik minut. Zdroj není schopen dodat sám o sobě tolik

energie, většinu času se tedy energie ukládá a v případě potřeby se spotřebovává téměř výhradně z energie uložené.

V následující tabulce jsou orientační hodnoty energií, které je možné získat z okolí.

Tab. 3.1-1 Orientační hodnoty energií z okolí [16]

Zdroj energie	Energetická hustota [uW/cm ³]	
Solární	Přímé slunce	15000
	Zamračeno	150
	Kancelářský stůl	6
Vibrace	Piezoelektrická konverze	250
	Elektrostatická konverze	50
Akustický hluk	0,003	75 dB
	0,96	100 dB
Teplovní rozdíl	15	10 °C
Vložky do bot	330	elastická deformace
Lithiové baterie	45	nenabíjecí
Uhlovodíkové palivo (1 cm ³)	333	malý spalovací motor
Metanolový palivový článek (1 cm ³)	280	

3.1.1. Solární energie

Solární zdroje využívají světelné energie. Tato energie pochází typicky ze slunečního záření, možným zdrojem je ale i umělé osvětlení uvnitř budov.

Elektrická energie v tomto případě vzniká díky fotoelektrickému jevu. Vlastní článek je tvořený polovodiči typu P a N. Pokud umístíme oba polovodiče tak, aby vytvořily kontakt, majoritní nosiče polovodiče typu N difundují skrz rozhraní a rekombinují s dírami v polovodiči typu P, čímž vytvoří záporné ionty. Kladné ionty zůstanou v polovodiči typu N. Vytvoří se tedy dvě nábojové vrstvy, vznikne elektrické pole. Díky vzniklému poli může jedním směrem procházet elektrický proud. Vzniká elektrická dioda, která slouží jako usměrňovač. Pokud na PN přechod dopadá záření, dochází ke generacím párů elektron – díra. Ty jsou následně odsáty zabudovaným potenciálem. Ve vzniklém elektrickém obvodu tak může procházet proud. [1]

Mezi základní parametry SC patří například: [1]

- proud nakrátko

- napětí naprázdno
- maximální výkon
- účinnost

Základní typy SC jsou:

- monokrystalický
- polykrystalický
- amorfní
- polymerní

3.1.2. Tepelná energie

Termoelektrickým jevem se označuje přímá přeměna teplotních rozdílů na elektrické napětí a naopak. Termoelektrické napětí je generováno v případě, že je přítomen teplotní rozdíl, případně naopak – pokud je přiloženo napětí vzniká rozdíl teplot. Na atomární úrovni dochází k difundování nábojů z teplé strany na studenou. [2]

Termoelektrický jev úzce souvisí s celkem třemi pojmy [2]:

- Seebeckův jev
- Peltierův jev
- Thomsonův jev

Seebeckův jev popisuje přeměnu tepelné energie na elektrickou. [2]

Peltierův jev je opakem Seebeckova jevu – při průchodu proudu se jedna strana přechodu ochlazuje, druhá naopak zahřívá. [2]

Thomsonův jev popisuje zahřívání nebo ochlazování vodičů při průchodu nosičů náboje. [2]

Peltierovy články se v praxi označují jako termoelektrické chladiče – Thermoelectric cooler TEC. Termoelektrické generátory naopak jako TEG. Z výše uvedeného principu ale vyplývá, že termoelektrický jev je možné obrátit – využít zároveň jako generátor a zároveň jako chladič. Praktický rozdíl je tedy většinou spíše v konstrukci článku z hlediska provozních teplot – TEG články snesou vyšší provozní teploty než články typu TEC.

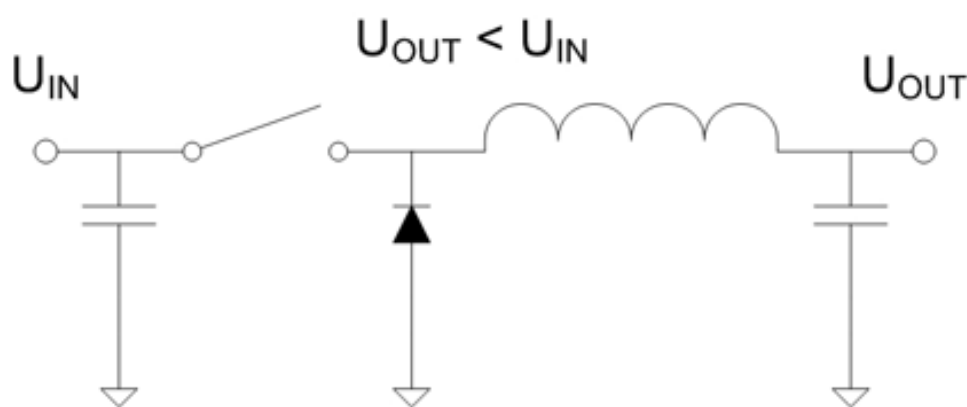
3.2. Spínané zdroje

Spínané zdroje – Switch Mode Power Supplies SMPS nahrazují klasické lineární stabilizátory. Jejich výhodou je hlavně snížení spotřeby díky zvýšení účinnosti, což vede k poklesu zahřívání, zmenšení rozměrů i váhy. SMPS využívají spínací techniky k dosažení požadovaného výstupního napětí. Spínaný zdroj obsahuje dva klíčové prvky – spínací obvod a regulační část. [3]

Jejich hlavní výhoda – vysoká účinnost je dosažena díky spínacímu prvku, který má (v ideálním případě) dva stavy – sepnuto a rozepnuto. Spínací prvek má v sepnutém stavu zanedbatelný odpor – je na něm tedy nulové napětí a nulový výkon. V rozepnutém stavu má zase odpor blízký se k nekonečnu, protékající proud a opět i výkon je nulový. Díky tomu nedochází ke ztrátám. [3]

3.2.1. Snižující topologie

Jak již bylo zmíněno výše, snižující režim může nahradit i lineární stabilizátor, díky nízké účinnosti je však vhodnější využití spínaného. Tento snižující druh se také označuje jako „buck“ topologie. [3]



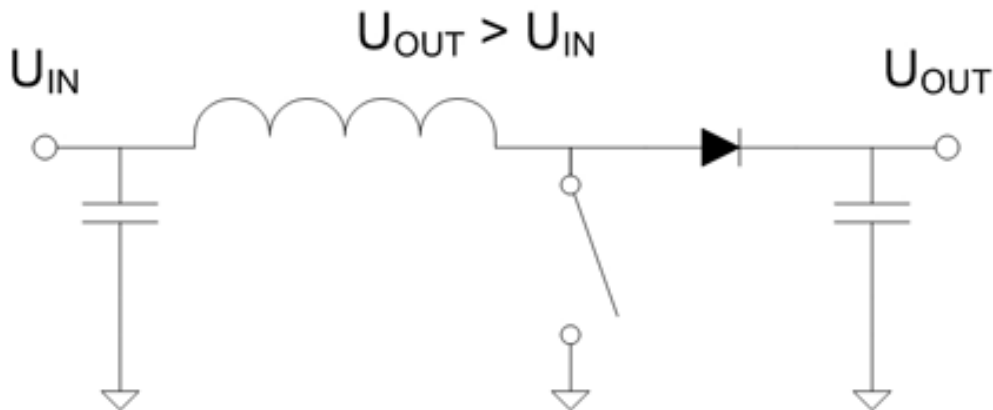
Obr. 3.2-1 Snižující topologie spínaného zdroje [17]

Obrázek 3.2-1 zobrazuje základní zjednodušené schéma snižující topologie spínaného zdroje. Paralelně se vstupním napětím je připojen nabíjecí kondenzátor, který slouží k filtraci a vyhlazení napětí, které může díky změnám odebíraného proudu kolísat. Jak již bylo řečeno, spínaný zdroj má dva provozní režimy – sepnuto a rozepnuto. V případě, že je spínač v sepnutém stavu se dioda stává závěrně polarizovanou a připojené vstupní napětí vyvolá tok proudu do cívky. Na výstupu proud nabíjí výstupní kondenzátor, zároveň se při průchodu cívkou vytváří magnetický tok. Následuje stav rozepnutí spínače, který způsobí, že magnetické pole cívky začne vytvářet opačné napětí,

tentokrát bude dioda polarizována propustně a proud stejného směru bude dále dobíjet kondenzátor. [3]

3.2.2. Zvyšující topologie

Na rozdíl od snižující topologie, zvyšující varianta nemůže nahradit lineární stabilizátor. Tato topologie je také nazývána jako „boost“ topologie.



Obr. 3.2-1 Zvyšující topologie spínaného zdroje [17]

Při sepnutí spínače dochází průchodem proudu k akumulaci energie do cívky. Dioda je polarizována závěrně, proud na výstup tedy žádný neteče. Následuje fáze rozepnutí spínače. Magnetické pole cívky indukuje napětí, které má stejnou orientaci jako napětí zdroje. Toto napětí se přičte k napětí zdroje. Dioda se otevře a proud nabíjí výstupní kondenzátor. [3]

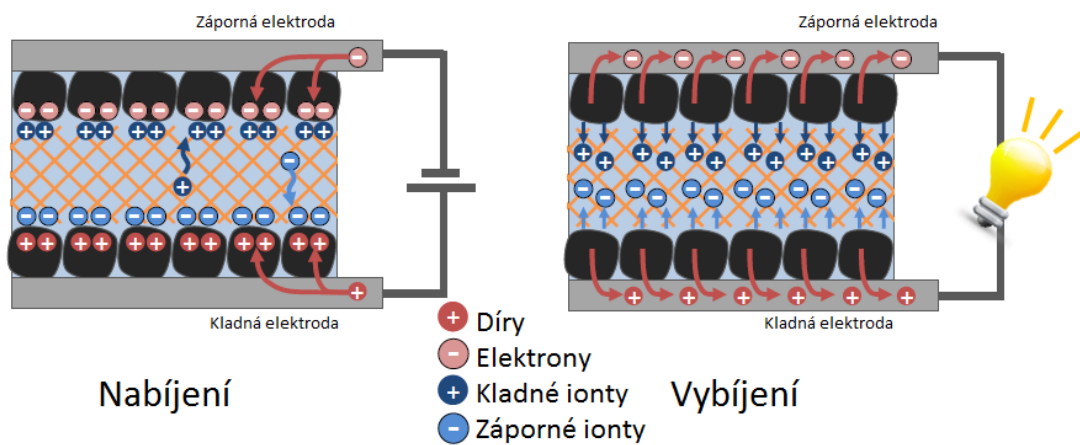
3.3. Akumulace energie

3.3.1. Superkondenzátor

Superkondenzátory jsou jedny z kondenzátorů, které dosahují nejvyšších kapacit. Někdy se také označují kondenzátory s elektrickou dvojvrstvou – Electrical Double Layer Capacitor EDLC. Na rozdíl od ostatních typů kondenzátorů zde neslouží k oddělení kladné a záporné elektrody dielektrikum. Místo toho je prostor vyplněn elektrolytem (pevným nebo tekutým), který obsahuje kladné a záporné ionty. Vytvoří se páry elektronů a kladných iontů, a páry elektrických děr a iontů záporných. Tento stav se chová jako dielektrikum a poskytuje vysokou kapacitu. Nazývá se také jako elektrická dvojvrstva. [5]

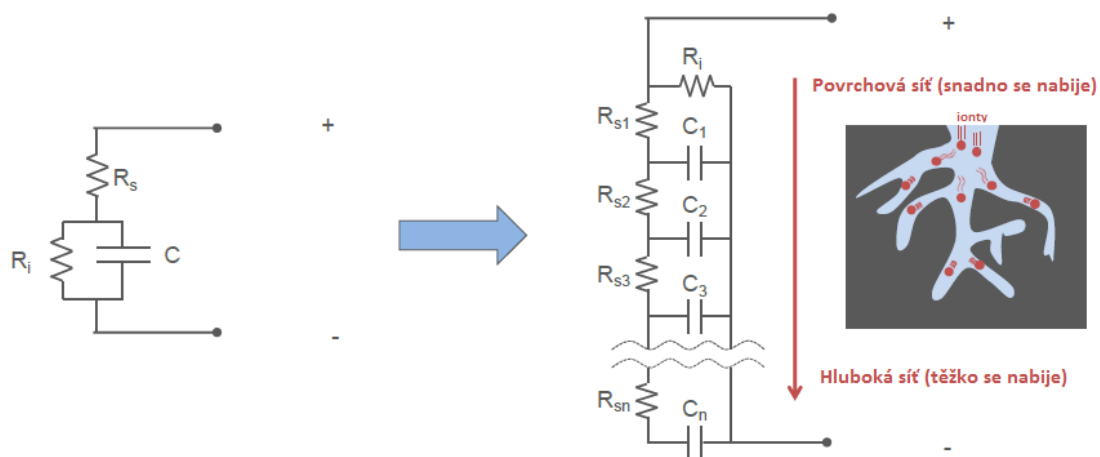
Kapacita kondenzátoru je přímo úměrná ploše jeho elektrod. K dosažení co nejvyšších hodnot kapacity se využívá uhlíkový prach. Ten má velkou plochu a díky tomu

je často využívám jako materiál elektrod. Při nabíjení dochází k pohybu iontů na povrch uhlíku, naopak, při vybíjení dochází k pohybu iontů do dielektrika. [5]



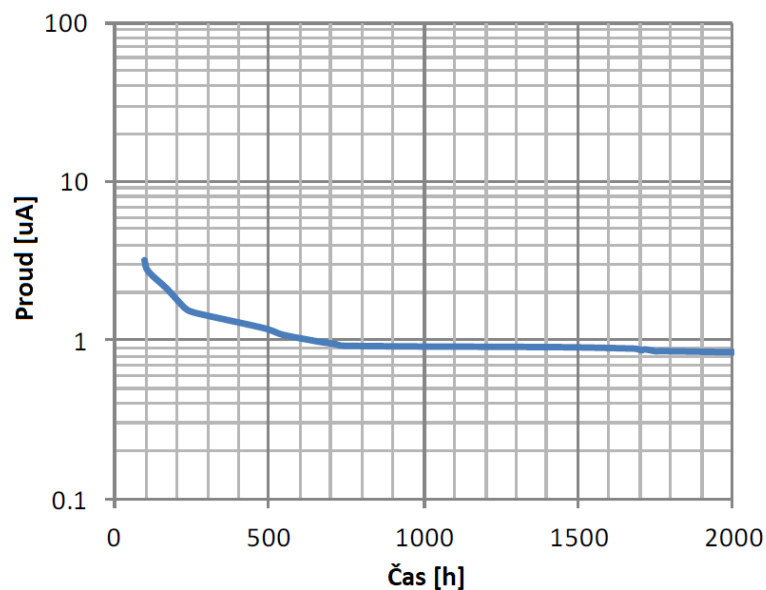
Obr. 3.3-1 Nabíjení a vybíjení superkondenzátoru [5]

Náhradní obvodový model může být sestaven například ze sério-paralelních kombinací kapacity (C), sériového odporu (R_s) a odporu izolace (R_i). Pro přesnější model ale není možné využít pouze jednoduchou kombinaci těchto tří prvků. Uhlíkový povrch elektrod má velmi pórovitý povrch. To způsobuje, že elektrické náboje představující pohybující se ionty se mohou snadno pohybovat po povrchu elektrod, průnik do hlubších pórů je ale velmi pomalý. Prakticky to znamená, že povrch elektrod je možné nabít velmi rychle, plné nabití je ale kvůli pórům velmi pomalé. Proto reálný model obsahuje několikanásobné R-C kombinace. Ekvivalentní odpor pórů je velký. [5]



Obr. 3.3-2 Náhradní obvodové schéma superkondenzátoru [5]

Z toho vyplývá poměrně nepříjemná vlastnost, která se může projevit z krátkodobého hlediska, například při měření a přechodových dějích, jako je rychlé nabití a vybití. V případě, že byl kondenzátor relativně rychle nabit, se po odpojení od zdroje, nebo při měření odebrané kapacity bude jevit jako ne úplně nabitý a naopak – pokud bude rychle vybit, po nějaké době napětí opět vzroste. Z toho vyplývá, že je poměrně složité jednoduše určit svodové proudy. Proud, který do kondenzátoru (klidně po několika stovkách hodin) teče ještě není proudem svodovým. To může být poměrně velká komplikace pro měření aplikací s extrémně nízkými proudy.



Obr. 3.3-3 Nabíjení superkondenzátoru [5]

Uvedený fakt dobře vyplývá z obr. 3.3-3. Nabíjecí proud po nabíjení dlouhém klidně i v řádech tisíců hodin stále klesá. [5]

Skutečný svodový proud se tedy určuje těžce, nicméně lze předpokládat, že je menší, než 1 uA. Výrobce uváděný údaj je zpravidla nadhodnocený, protože se jedná o proud např. po 96 hodinách nabíjení. [5]

Možnosti využití superkondenzátorů jsou zejména: [5]

- vyhlazování napětí
- vyrovnávání výkonových špiček odběru například pro zařízení, jejichž zdroj není schopen dodávat tak vysoký okamžitý výkon
- záloha energie pro případ výpadku napájení
- úložiště energie pro energy harvesting

3. Měřicí senzory environmentálních veličin

3.4.1. Senzory teploty

Teplotní senzory je možné rozdělit podle principu přenosu tepla na samotný měřicí element na kontaktní a bezkontaktní. V případě kontaktního senzoru je nutné, aby citlivá část snímacího prvku byla v tepelném kontaktu s látkou, kterou je třeba měřit. Dále je možné senzory dělit podle toho, zda citlivý element elektrický signál pouze moduluje, nebo přímo generuje. Takovému senzoru se také jinak říká generátorový neboli aktivní – ke své činnosti nepotřebuje napájení. Typickým příkladem aktivního senzoru je termočlánek, naopak příkladem modulačního senzoru je například termistor, termodioda nebo termotranzistor. [6]

Klasické teploměry, ať už rtuťové nebo kapalinové, dále pak odporové teploty z platiny mají teplotní koeficient odporu téměř konstantní vzhledem k teplotě. Výstupní údaj je tedy lineární, což je výhodné pro další zpracování. Naopak teplotní senzory polovodičové mají teplotní koeficient silně teplotně závislý, proto je výstupní signál ze senzoru dále zpracovat. [6]

3.4.1.1. Termistory

Výhodou termistorů ve srovnání s ostatními teplotními senzory je jejich velká citlivost pro běžné okolní teploty (-30 °C až + 60 °C). Jejich charakteristiky jsou značně nelineární, je proto možné použít několik lineárních rezistorů pro jejich linearizaci. Termistory jsou v praxi velmi často využívány. Při měření je nezbytné senzor příliš proudově nezatěžovat, aby nedocházelo k ovlivnění měření díky zahřívání procházejícím proudem. [6]

V závislosti na teplotním koeficientu α senzory dále dělíme na termistory s kladným koeficientem – PTC (někdy také označovaný jako pozistor) a termistory se záporným koeficientem – NTC (někdy také označovaný jako negastor). Princip je založen na teplotní změně rezistivity. Závislost odporu pro termistor typu NTC lze přibližně vyjádřit

$$R = Ae^{\frac{\beta}{T}},$$

kde T je teplota, β je teplotní konstanta materiálu a A materiállová konstanta závislá na tvaru snímacího prvku. Konstantu β lze také vyjádřit jako

$$\beta = \frac{2,3026 \log\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}},$$

kde R_1 a R_2 jsou odpory termistoru při teplotách T_1 a T_2 . Pro zjednodušení se u termistorů udává zpravidla teplotní koeficient odporu α , pro který platí

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2}.$$

Typické hodnoty konstanty β se pohybují v rozmezí 3000 K až 4500 K. [6]

3.5. Komunikační rozhraní

3.5.1. Sériová komunikační rozhraní

Sériová komunikační rozhraní se v mikropočítačové technice využívají ke komunikaci a předávání informací mezi jednotlivými obvody. Výhod sériového rozhraní je několik. Oproti paralelnímu rozhraní není potřeba tolik propojovacích vodičů. Z toho vyplývá, že lze použít pouzdra s menšími počty vývodů, která jsou menší. Stejně tak deska plošného spoje – DPS bude obsahovat méně cest a bude menší. Sériové rozhraní je většinou standardizované, což umožňuje snadno propojit různorodé obvody. Obvody většinou využívají příslušnou periférii, která usnadňuje práci s daty. Pokud ale přesto periférie není přítomna, dá se ve většině případů dosáhnout programové emulace pomocí obyčejných vstupně výstupních pinů. [7]

Sériové sběrnice se dělí, především podle délky komunikační vzdálenosti, do dvou hlavních skupin: [7]

- 1) Komunikační rozhraní na dlouhé vzdálenosti. Využívá se zpravidla mezi jednotlivými, samostatně pracujícími moduly. Délka vedení je v tomto případě od jednotek metrů až po stovky. Výhodou je, že fyzická vrstva těchto rozhraní částečně řeší i odolnost proti rušení, případně umožňuje použití různých ochran. Mezi velmi rozšířené, poměrně staré, ale stále používané rozhraní patří standard RS232 a RS485. Kromě nich je dnes velmi rozšířené rozhraní Controller Area Network – CAN. CAN se dnes běžně využívá například v automobilech pro bezpečnostní i komfortní příslušenství. Déle lze mezi sériové rozhraní počítat i rozhraní typu Ethernet, které se dnes masově používá např. pro propojení počítačů.
- 2) Komunikační rozhraní pro krátké vzdálenosti. Využívá se zpravidla pro komunikační spoje mezi jednotlivými integrovanými obvody v rámci jedné

DPS, a to především z důvodu, že fyzická vrstva neumožňuje zabezpečení proti rušení a dalším elektromagnetickým vlivům. Mezi nejrozšířenější patří Serial Peripheral Interface – SPI a Inter Integrated Circuit – I²C.

3.5.2. SPI – Serial Peripheral Interface

SPI se používá především pro komunikaci s přídavnými periferiemi mikrokontroléru jako jsou například vnější paměti, A/D převodníky a další. Jedná se o sběrnici typu singlemaster. Na sběrnici se nachází jeden master, tedy řídicí prvek (například mikrokontrolér) a typicky jeden slave (periferie). Zapojení více slave zařízení možné je, ale v takovém případě je třeba standardní zapojení upravit tak, aby na datových vodičích byl vždy právě jeden vysílač a přijímač. To je možné buď za pomoci tzv. daisy-chain zapojení, tzn. zřetězení SPI zařízení, nebo použití separátních povolovacích signálů pro každé zařízení. Výhodou zřetězení je, že nejsou potřeba žádné další vodiče, nevýhodou pak, že všechna data na sběrnici se posouvají jako v posuvném registru přes všechna zařízení. To zpomaluje provoz. První řešení naopak vyžaduje více vodičů, z čehož vyplývá více místa na DPS. [7]

Propojení zajišťuje typicky čtyřvodičová sběrnice. Ta obsahuje Datové vodiče Master In Slave Out – MISO, Master Out Slave In – MOSI, synchronizační hodiny SCK a Slave Select. Vodič MISO je vstupem dat řídicího obvodu, která generuje obvod řízený. Vodič MOSI naopak přenáší data z posuvného registru řídicího obvodu do obvodu řízeného. Synchronizační hodiny SCK určují platnost dat na vodičích MISO a MOSI. A konečně poslední vodič SS povoluje rozhraní na řízeném obvodu. Přenosová rychlost sběrnice je v řádech jednotek MHz. [7]

Signály MISO a MOSI bývají někdy definovány jako Data In – DI a Data Out – DO. Výhodou prvního označení je jednoznačnost z hlediska obvodového zapojení – propojují se vodiče MISO s MISO a MOSI s MOSI. Ve druhém případě označení DI a DO je nutné propojit DI s DO a naopak. Vodič MISO definuje, že v případě řídicího obvodu se jedná o vstup dat tedy DI a v případě obvodu řízeného o DO, tedy výstup dat. U vodiče MOSI je to naopak.

3.5.3. I²C – Inter Integrated Circuit

Na rozdíl od sběrnice SPI je I²C sběrnice typu multimaster. Má proto zabudované mechanismy arbitrace a adresování jednotlivých zařízení. Každé zařízení má buď 7 nebo 10 bitů adresy. Všechny zařízení na sběrnici jsou propojeny jednotně datovým

vodičem - SDA a hodinovým signálem - SCL. Vysílání zahajuje jedno ze zařízení na sběrnici. To je, nebo se stane masterem, tedy řídicím zařízením. V případě, že v danou chvíli dojde k zahájení vysílání více zařízení se o tom, které zařízení se stane masterem rozhodne při vysílání prvního adresního znaku. Zařízení s vyšší adresou zvítězí. Data se přenášejí rychlostí v řádech stovek kHz. Maximální délka sběrnice je omezena kromě rozsahu adres kapacitou vedení, typicky 400 pF. To teoreticky umožňuje propojení i na delší vzdálenost, ale z již uvedených důvodů to není vhodné a používá se tak pouze na DPS. [7]

4. Návrh řešení

4.1. Rozbor řešení

Úkolem systému pro monitorování stavu prostředí bude zjednodušeně řečeno změřit hodnoty prostředí a jejich hodnoty předat do cílového místa. Tato definice je velmi obecná a je proto nutné definovat další informace a principy, které budou důležité nejen pro samotnou realizaci, ale musí zároveň zohlednit například i instalaci systému a provozní podmínky. Instalace a požadavky na údržbu budou důležité zejména v případě průmyslového využití, protože v takovém případě se do celkových nákladů na provoz promítá nejen cena zařízení, ale současně právě i instalace a údržba. Ty mohou někdy dokonce přesáhnout cenu samotného zařízení. Cílem proto bude vyvinout zařízení, které bude mít v ideálním případě velmi jednoduchou instalaci a nebude vyžadovat žádné požadavky na údržbu.

Data je potřeba naměřit a předat do cíle určení. Pro lepší představu je možné uvažovat například model domu. Systém bude autonomně měřit teploty v jednotlivých místnostech, bude umožňovat i měření venkovní teploty nebo například rozvodů teplé vody, resp. stav zásobníkového ohříváče vody a další. Z výše uvedeného vyplývá, že je potřeba, aby systém obsahoval:

- soustavu několika měřících senzorů
- jeden sběrný bod dat

V případě stavby nových domů je součástí projektu zpravidla i tvorba dokumentace elektroinstalace – kabelových rozvodů pro zásuvky, světla a třeba i ovladače topení. Stejně tak jsou určeny rozvody vody, umístění kotle a topných prvků. V takovém případě není problém s kabeláží i pro senzory. Aby byl ale systém maximálně univerzální a splnil požadavek na maximální jednoduchost instalace je potřeba uvažovat i případy, kdy bude instalace již hotová, nebo by třeba ani v požadovaných místech nebyla možná. Pak ale instalace kabelových rozvodů nepřichází v úvahu. Systém tedy nemůže být závislý na kabeláží, umístění z hlediska dostupného napájení – musí být propojen bezdrátově a pracovat bez externího napájení.

4.2. Topologie sítě

V předchozí kapitole byly rozebrány obecné požadavky a bylo určeno, že výsledný systém nebude obsahovat kabelové spoje, bude tedy plně bezdrátový.

Pro bezdrátovou komunikaci připadají v úvahu především dvě možné topologie:

- topologie hvězdy
- topologie smíšená, tzv. „mesh“ topologie

U topologie hvězdy je určen jeden centrální bod, všechny ostatní body komunikují přímým spojením s tímto centrálním bodem.

U mesh sítě není obecně určen žádný bod, nicméně v případě, že síť bude využívána pro sběr dat se jeden z bodů jako cílový stejně definuje. Oproti výše zmíněné hvězdě mohou tedy body komunikovat i mezi sebou. Výhodou je, že při vhodném návrhu komunikačních protokolů je možné značně prodloužit dosah sítě, který může být teoreticky nekonečný. Data totiž mohou být předávána i mezi jednotlivými body. V případě, že by dosah spojení nestačil, stačilo by jen jednoduše přidat jeden bod nebo více bodů. Z toho zároveň vyplývá i zápor tohoto řešení. Kromě nutnosti implementace ne úplně jednoduchého protokolu pro spolehlivé předávání zpráv musí některé body (kromě sběrného) komunikovat i v případě, že žádná vlastní data přenášet nepotřebují. To znamená zvýšení požadavků na energii.

Pokud budou komunikační vzdálenosti z hlediska možností bezdrátových rozhraní malé, je možné použít jednodušší variantu – hvězdu. Výsledný systém bude tedy využívat topologii hvězdy.

4.3. Senzor

Senzor musí splnit požadavek na bezdrátovou instalaci, z toho vyplývá nutnost přítomnosti bezdrátového komunikačního rozhraní. Pro funkci elektrického zařízení je nezbytné zajistit napájení v požadovaném rozsahu. Pokud má být instalace bezdrátová, přichází v úvahu:

- napájení z primárních článků
- napájení z akumulátorů
- napájení z energie prostředí

Primární články se běžně používají v nejrůznějších zařízeních spotřební elektroniky. Výhodou je nízká cena, dobrá dostupnost, většinou poměrně jednoduchá výměna a velmi malé nároky na konstrukci obvodů zajišťujících napájení v zařízení. Nevýhodou je pak v dnešní době dost často zmiňovaná ekologie.

Sekundární články neboli akumulátory mají oproti primárním výhodu v možnosti opakovaného použití. Pořizovací cena je o něco vyšší a v případě dobíjení je navíc potřeba příslušné nabíječky.

Poslední možností je napájení z energie okolí, pomocí tzv. energy harvesting. Podstatnou výhodou tohoto řešení je, že při vhodném návrhu zařízení umožňuje spolehlivý provoz a nevyžaduje (z hlediska energetického zdroje) žádnou údržbu jako je výměna baterií, dobíjení a další. Toto řešení bohužel také má dvě hlavní nevýhody:

- konstrukce zařízení je podstatně složitější, z toho plynou vyšší náklady na vývoj a následnou konstrukci zařízení
- provoz zařízení je sice bezúdržbový, ale vyžaduje splnění požadavků na vhodnou instalaci a není ho možné umístit libovolně

První nevýhoda je spíše otázkou ekonomickou, tedy zda se vyplatí levnější zařízení, které bude vyžadovat údržbu, nebo zda je lepší investovat do dražšího, o které se již dále nebude nutné starat.

Druhá nevýhoda znamená, že je nutné důkladně zvážit požadavky na provoz zařízení. To znamená dostupnost volných energií prostředí. Částečně souvisí i s prvním bodem, tzn., jaké jsou požadavky na maximální cenu zařízení. Je totiž možné vyvinout i zařízení, které bude mít více alternativních zdrojů a v případě, že jeden nebude dostupný, ať už z principu, tedy že solární energie nebude díky instalaci např. ve sklepě k dispozici, nebo bude dočasně nedostupná, protože je noc.

Zdroje energie založené na tomto principu jsou ale jinak velmi spolehlivé a časově stálé. Pokud je pominut případ vnějšího mechanického poškození, je možné mluvit v podstatě o neomezeném provozu, v řádech desítek let.

Aby byl splněn požadavek co nejnižších provozních nákladů bude zvolen tento způsob energetického zdroje.

Senzor tedy bude pracovat následně:

- 1) senzor získá dostatek energie pro zajištění energetických požadavků na provoz
- 2) senzor naměří požadované hodnoty
- 3) senzor odešle naměřená data do cílového bodu

4.4. Sběrný bod

Úkolem sběrného bodu bude sběr dat ze všech senzorů, jejich případné zpracování a vyhodnocení, a nakonec předání do dalších návazných systémů, které budou sloužit pro zobrazení uživatelům, strojové vyhodnocení nebo regulaci.

Stejně jako všechny senzory bude muset sběrný bod disponovat bezdrátovým rozhraním, které bude umožňovat komunikaci, resp. příjem dat se všech senzorů.

Jinak se ale bude funkčností podstatně lišit. Nebude zde třeba řešit zdroj energie, protože se předpokládá umístění v místech, kde bude možnost napojení na další informační síť. Napájení tedy bude k dispozici. Naopak bude třeba, aby sběrný bod disponoval vyšším výkonem, co se zpracování dat týče a hlavně, aby disponoval rozhraním pro připojení do dalších sítí.

Sběrný bod bude tedy fungovat následovně:

- 1) sběrný bod bude v režimu, kdy bude vyčkávat na vysílání dat ze senzorů
- 2) sběrný bod zachytí vyslaná data
- 3) sběrný bod dle konfigurace zpracuje přijatá data a odešle je dále

5. Konstrukce bezdrátového senzoru

5.1. Shrnutí požadavků na senzor

Na základě předchozí diskuze byly zhodnoceny požadavky na senzor tak, aby plně vyhověl praktickému provozu. Jsou to:

- bezdrátové komunikační rozhraní
- zdroj energie z tzv. energie okolí, tedy pomocí energy harvestingu
- měření hodnot prostředí – teplota, vlhkost
- měření z více senzorů – i externě
- přítomnost záložního napájení

V následující části budou podrobně rozebrány jednotlivé stavební bloky senzoru.

5.2. Energetický zdroj

Zařízení bude využívat energii z okolí. Mezi energie, se kterými je možné se setkat v příkladové aplikaci domu je typicky energie solární a energie tepelná.

Solární energie je k dispozici v případě, že bude senzor umístěn například na okně, nebo v jeho blízkosti. Dále je možné předpokládat, že v některých případech je dostupné světelné záření i ze zdrojů umělého osvětlení. Obecně lze tedy předpokládat, že se jedná o spolehlivý zdroj energie v případě, že je zaručeno umístění na světlo a v případě, že zbytek energetické soustavy počítá s tím, že je dostupné pouze například 1/3 dne.

Tepelným zdrojem energie je topení. Stejně jako předchozí solární varianta energie je nutné za normálních okolností počítat, že tepelný zdroj energie nemusí být v neustálém provozu, proto je nutné přizpůsobit záložní zdroj energie, aby pokryl výpadky energie. Na rozdíl od solární energie je ale tepelná energie dostupná všude. Pokud není k dispozici přímo topná soustava – radiátory, jsou zpravidla k dispozici dostupné přívody k radiátorům, rozvody teplé vody, zásobníkový ohříváč a další.

Kombinací výše zmíněných variant je tedy možné říct, že senzor vyhoví většině požadavků na běžný provoz. V nejzajímavějším případě je možné umístění senzoru v blízkosti zdroje energie a použití externího senzoru ve větší vzdálenosti.

5.2.1. Solární článek

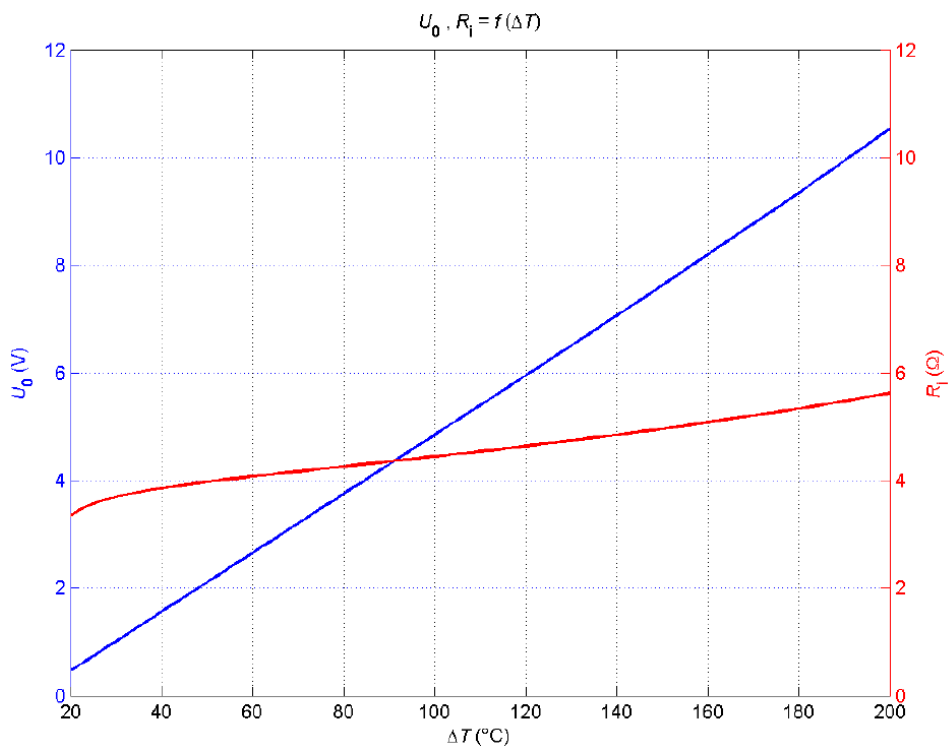
Solárních článků – SC je k dispozici hned několik variant. Při zjednodušení na jeden článek je možné uvažovat především různé technologie článků. Ty se liší zejména účinností a výstupním napětím. Nejběžněji využívané polykrystalické a monokrystalické články disponují velkou účinností, jejich nevýhodou však zpravidla bývá fakt, že neposkytují velké napětí naprázdno, a to hlavně v případě, že jsou umístěny v místech, kde není dostatek světelného záření. V případě navrhovaného senzoru nelze počítat, že bude k dispozici přímé sluneční záření, stejně tak nelze počítat s ideálním umístěním kolmo k dopadajícímu záření. Z tohoto důvodu byl vybrán amorfní SC. Jeho výhodou je fakt, že má vysoké výstupní napětí i v případě, že intenzita osvětlení je nízká. Možná horší účinnost není úplně důležitá, v případě větších energetických požadavků je možné zvolit článek o větších rozměrech a proto, že úkolem senzoru není výroba elektrické energie nebude mít jeho zvětšení podstatný dopad na cenu.

Byl vybrán SC od firmy Solems. SC byl k dispozici jako vzorek, který je momentálně ve vývoji. Nejsou k němu tedy dostupná přesnější data. Článek je zaměřený právě na prostředí s nízkým osvětlením. Rozměry článku jsou 25 x 25 mm. Měřením bylo zjištěno, že dosahuje výstupních napětí kolem 3 V při osvětlení o intenzitě již kolem 10 - 20 lx. To je hodnota, která dokonce umožňuje přímé napájení bez obvyklé konverze,

tedy zvýšení úrovně napájecího napětí. Velkou výhodou je, že to značně zjednoduší konstrukci zařízení. Kromě počtu využitých obvodů také odpadne nutnost řešit např. svodové proudy, které tyto zařízení odebírají a vybíjejí tak záložní zdroj energie.

5.2.2. Termoelektrický generátor

Termoelektrický generátor – TEG bude zdrojem elektrické energie z energie tepelné. Tepelným zdrojem bude topení, jeho rozvody, případně zásobníkový ohřívač vody. Teplota těchto zdrojů je typicky od 40 do 60 °C. Teplota okolí se pohybuje řádově kolem 20 až 25 °C. TEG by tedy měl být schopen provozu již od teplotního rozdílu 15 °C. Elektrická energie vzniká na přechodu dvou materiálů s teplotním rozdílem. Z toho vyplývá, že generované napětí je přímo úměrné počtu přechodů a teplotnímu rozdílu. Teplotní rozdíl je v tomto případě daný a není možné ho navýšit. Stejně tak použité materiály jsou typicky podobné. Vyšší napětí je tedy možné docílit pouze počtem přechodů. Sortiment TEG není tak levný a rozšířený, jako v případě TEC. TEC, tedy termoelektrický chladič je dnes hojně využíván například pro chlazení autoledniček. Jeho nevýhodou jsou nižší maximální provozní teploty, které je schopen snést. Vzhledem k tomu, že tyto teploty se pohybují kolem 150 – 200 °C, nemá to na použití v senzoru, kde teploty zcela jistě nepřesáhnou bod varu vody žádný vliv. Následující graf vykresluje závislost rozdílů teplot na napětí naprázdno.



Obr. 5.2-1 Napětí naprázdno a vnitřní odpor u článku TEC12703 [8]

Z obrázku 5.2-1 vyplývá, že TEC generuje napětí kolem 50 mV na jeden stupeň Celsia. To by mělo být více než dostatečné.

Je třeba dodat, že požadovaný teplotní rozdíl je uváděn jako teplota topného systému vzhledem ke vzduchu. V tomto případě je tento rozdíl alespoň 15 stupňů. Obrázek 5.2-1 zobrazuje teplotní rozdíl přímo na článku, což není to stejné. Použité materiály mají konečnou tepelnou vodivost, vzniklé teplotní ztráty tak negativně ovlivní teplotní rozdíl přímo na článku. Je potřeba uvažovat celé obvodové řešení. Mezi článkem a topením bude spoj, který bude mít tepelný odpor poměrně zanedbatelný. Dále bude následovat článek a z druhé strany připojení ke chladiči a samotný chladič. Zde budou již ztráty podstatnější, závislé hlavně na tepelném odporu chladiče. Na základě experimentů vychází, že výsledný úbytek na TEC bude pouze kolem 5 °C.

5.3. Obvod zajišťující zvýšení napěťové úrovně

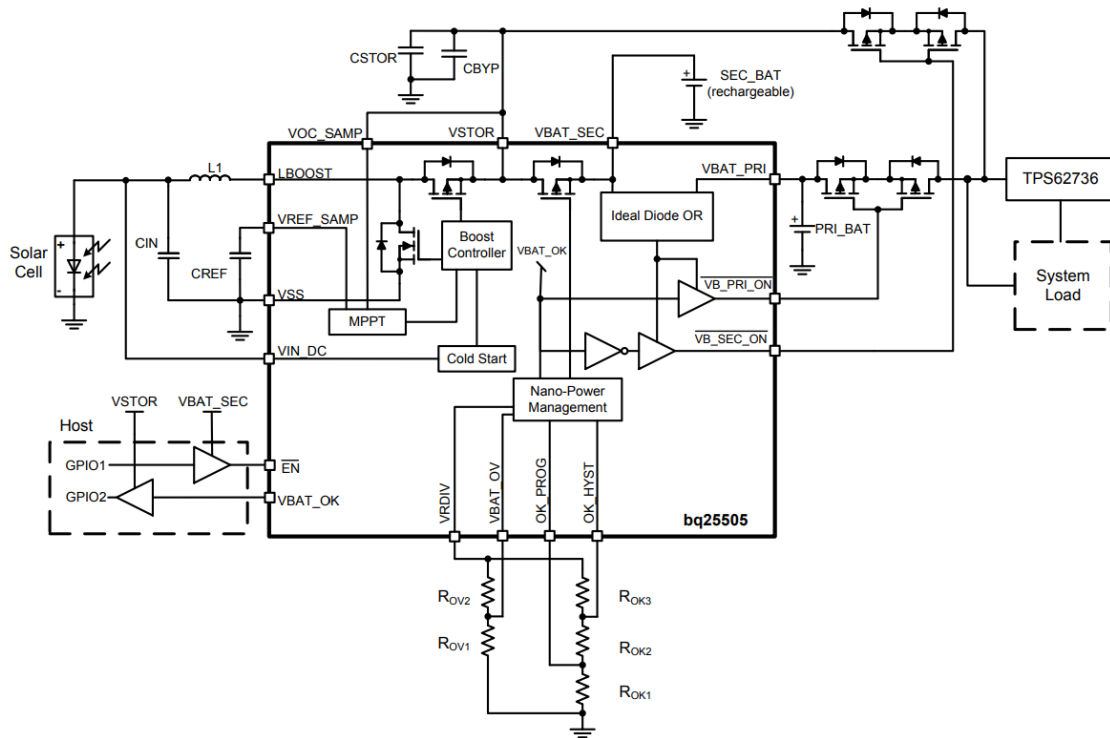
Solární energie ze senzoru bude v SC generovat dostatečné napětí, úprava jeho úrovně tedy není nutná.

U TEC bude výstupní napětí pouze kolem 100 mV. Bude tedy nutné jeho zvýšení.

Pro zvýšení napětí existuje spousta specializovaných obvodů. Obvody se liší v možnosti stabilizace výstupního napětí, nastavení různých úrovní v případě, že jsou určeny pro nabíjení akumulátoru, případně více výstupů pro periferie s různými požadavky. Kromě toho existují dále dvě hlavní kategorie lišící se obvodovým zapojením, a hlavně rozsahem vstupního napájení, při kterém jsou schopny pracovat.

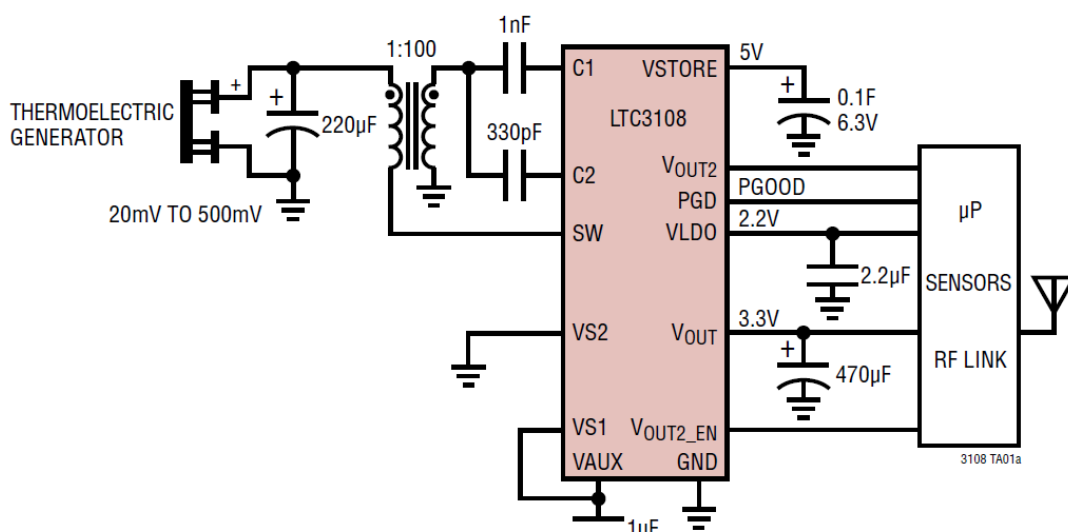
První kategorií jsou obvody nevyžadující externí transformátory. Typickým příkladem může být například obvod BQ25505 od Texas Instruments. Jeho doporučené obvodové zapojení je zřejmé z obrázku 5.3-1. Jako zdroj energie je využit solární článek. Ten je připojen na vstup přes cívku L1. Jedná se o standardní zdroj typu boost – zvyšující topologie. MOSFET na vstupu obvodu za L1 zkratuje cívku k zemi a dochází tak k tvorbě magnetického pole v cívce. Další MOSFET nahrazuje diodu z typického zapojení. To je především z důvodu minimalizace ztrát, které by za normálních okolností úbytek na diodě způsoboval. Výhodou tohoto řešení je zejména fakt, že zmiňovaná cívka je podstatně menší než transformátor, a je i podstatně levnější. Celé řešení je tedy menší. Dále je účinnost celého měniče je vyšší. Účinnost zmíněného obvodu je kolem 80 % v závislosti na velikosti vstupního napětí a dalších parametrech. Nevýhodou je vstupní rozsah napětí.

Ten se pohybuje od zhruba 100 mV. Tento údaj je navíc platný za předpokladu, že se měnič již rozběhl. Pokud ale bude nezbytné, aby bylo zařízení schopno rozběhnutí za všech podmínek, je nutné uvažovat tzv. startovací napětí. To se v případě tohoto obvodu pohybuje kolem 600 mV. Zdroj tedy musí dodávat alespoň krátkodobě 600 mV, jinak se obvod nespustí.



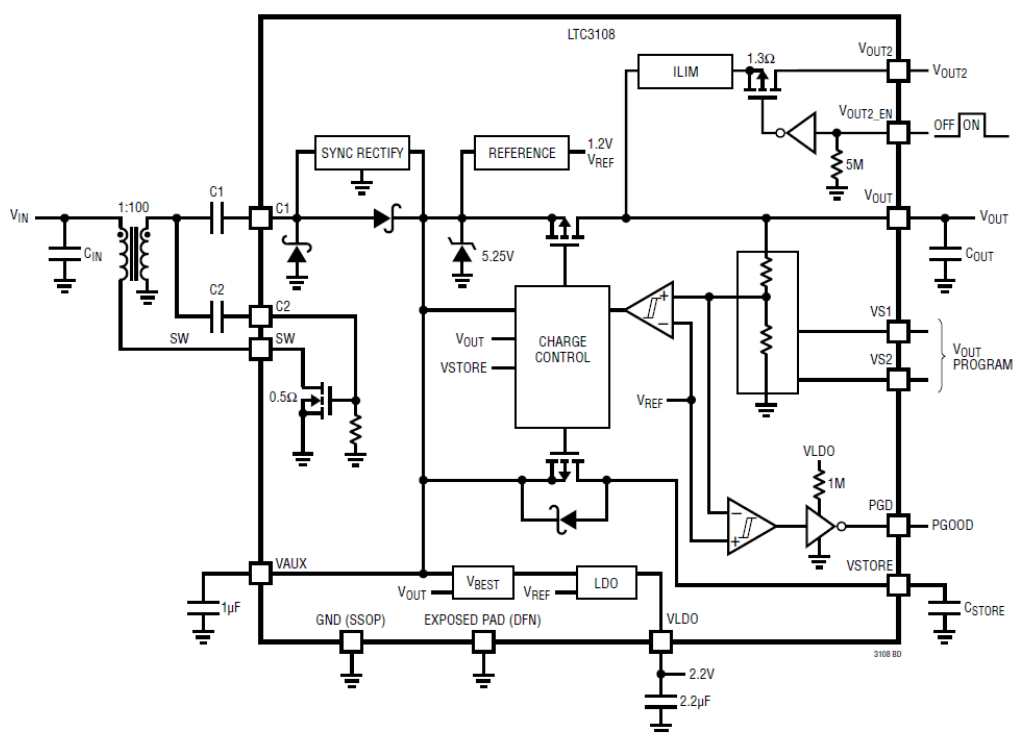
Obr. 5.3-1 Doporučené zapojení obvodu BQ25505 od Texas Instruments [9]

Do druhé kategorie spadají obvody s externím transformátorem. Celkové řešení je větší, dražší a s menší účinností. Jeden z takových obvodů je například LTC3108 od



Obr. 5.3-2 Doporučené zapojení obvodu LTC3108 od Analog Devices [10]

Analog Devices. Doporučené obvodové zapojení je na obrázku 5.3-2. Tento obvod byl vybrán do konstrukce senzoru, proto bude důkladněji rozebrán princip funkce.



Obr. 5.3-3 Vnitřní zjednodušené zapojení obvodu LTC3108 od Analog Devices [10]

Jak již bylo zmíněno, tento obvod obsahuje přídatný transformátor. Ten navyšuje rozměry zařízení, cenu a zhoršuje účinnost. Účinnost se pohybuje dle nastavení kolem zhruba 60 %. Výhodou ale je podstatně nižší minimální vstupní napětí. LTC3108 je možné použít s transformátory o různých poměrech. Výrobce uvádí data pro doporučené transformátory s poměry 1:20, 1:50 a 1:100. Čím vyšší poměr, tím je díky vnitřnímu odporu transformátoru účinnost horší. Pro 1:20 je uváděná účinnost až 60 %, pro poměr 1:50 až 50 % a pro nejvyšší poměr 1:100 je účinnost až pouhých 40 %. Poměr má rovněž vliv na vstupní impedanci obvodu. S rostoucím poměrem transformátoru impedance klesá. Tento aspekt je nutné uvažovat vzhledem k připojenému zdroji. Pro nejlepší výkonový přenos by se měly impedance zdroje a zátěže rovnat. A nakonec, s rostoucím poměrem transformátoru klesá minimální vstupní napětí. V případě poměru 1:100 je toto napětí pouhých 20 mV. To je oproti předchozí kategorii obvodů podstatně méně. Navíc zde není rozlišováno, zda se jedná o tzv. studený start, či ne.

Princip funkce je patrný ze zjednodušeného zapojení obvodu na obrázku 5.3-3. Vstupní sekce tvoří jednoduchý rezonanční obvod, spínání probíhá díky MOSFET. Při

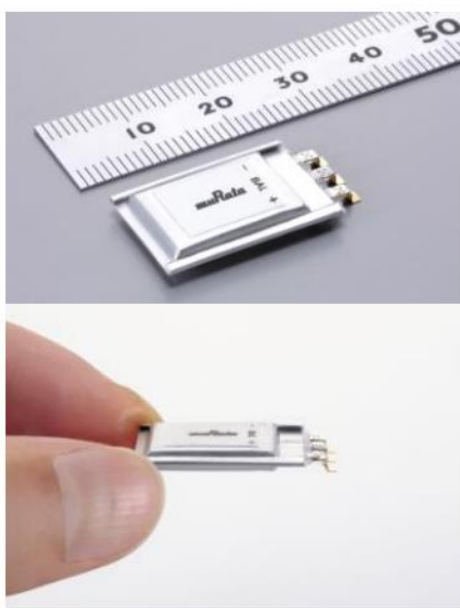
změně magnetického pole, která se projeví po připojení napájení na vstup dojde k indukci napětí do sekundárního vinutí. Toto napětí sepne přes kondenzátor C2 MOSFET, který při sepnutí uzemní vstupní proud přes primární vinutí transformátoru. Po nějaké době se začne magnetické pole transformátoru ustalovat a dojde opět k rozepnutí. Tento jednoduchý oscilátor tvoří střídavé magnetické pole, které se přes zvyšující poměr násobí na sekundárním vinutí. Dále je využit ještě princip nábojové pumpy přes kondenzátor C1. Při záporné půlčlenné periody napětí na sekundárním vinutí dochází díky vstupní diodě k nabíjení C1. V kladné půlčlenné periody se toto napětí přičítá k napětí na C1 a je tak skoro dvojnásobné. Dle obrázku zjednodušeného zapojení ale není zřejmé, jak je možné, že se oscilátor spustí. V klidovém stavu je totiž MOSFET zavřený, primárním vinutím neteče žádný proud a nemohlo by tedy dojít ke tvorbě magnetického toku indukujícího se do sekundárního vinutí. Spuštění zajistí přídavný obvod, který v klidovém stavu tvoří asi $12\ \Omega$ zátěž paralelně s MOSFET. Rezonanční frekvence obvodu je závislá na velikosti indukčnosti sekundárního vinutí transformátoru a pohybuje se přibližně v rozmezí 10 a 100 kHz. Aktivní části obvodu jsou napájeny z VAUX. Po připojení ke zdroji energie a zahájení funkce oscilátoru se začne nabíjet přes diodu na vstupu kondenzátor připojený k pinu VAUX. Po dosažení napětí 2 V dojde k zahájení činnosti dalších aktivních obvodů, jako je například synchronní usměrňovač. Po jeho startu dojde k přemostění usměrňovací diody, což sníží úbytek na ní a sníží se tak ztráty na diodě. Po startu další důležité části – napěťové reference a k překročení napětí 2,5V dojde k připojení výstupu VOUT. Ten je udržován připojený až do nastavené hodnoty pomocí VS1 a VS2. Po jejím překročení dojde k odpojení výstupu, po opětovném poklesu dojde opět k připojení. Vzhledem k tomu, že obvod neumožňuje odpojení vstupu, bude napětí VAUX stále růst, pokud nebude odběr větší než energie dodaná na vstupu. Aby se zabránilo přílišnému zvýšení napětí, integrovaná Schottkyho dioda zajistí, že napětí nepřesáhne 5,25 V. Přebytná energie se tedy odvádí v tepelné energii. LTC3108 ještě poskytuje řadu dalších obvodů, které umožňují například připojit další zařízení a pomocí LTC3108 ho odpojovat, nebo připojení záložního kondenzátoru, protože ale nejsou využity jejich funkce není rozebrána. Bohužel svodové proudy těchto obvodů jsou příliš velké ve srovnání s další konstrukcí a dalšími požadavky. Napětí VOUT je nastaveno pomocí propojek na DPS na 4,1 V.

5.4. Energetické úložiště

Pro případ výpadku napájení je nutné zajistit záložní energetický zdroj. Tento zdroj by se měl standardně (v případě napájení solárním senzorem) během dne dobíjet, a v noci napájet vysílací část senzoru.

Pro tento účel byl vybrán superkondenzátor DMT334R2S474M3DTA0. Jedná se o výrobek firmy Murata. Maximální provozní napětí je 4,2 V. Kapacita superkondenzátoru je 470 mF, vnitřní sériový odpor pak 130 m Ω . Výrobce udávaný svodový proud je 5 uA, nicméně lze předpokládat, že tento údaj je nadhodnocený, protože výrobce uvádí nabíjecí proud po 96 hodinách nabíjení. Skutečný proud lze uvažovat za menší, než 1 uA.

Kondenzátor obsahuje celkem tři svorky, kromě kladného a záporného pólu i jeden pro balancování. Je to kvůli tomu, že kondenzátor je vnitřně vytvořen ze dvou kondenzátorů zapojených sériově. Napětí na každém z nich tedy nesmí přesáhnout 2,1 V. Z tohoto důvodu je vyvedena balanční svorka. Napětí se totiž díky různým vlivům, jako jsou výrobní nepřesnosti, stárnutí a tepelné namáhání mohou rozcházet, díky čemuž může dojít k překročení napětí na článku, i když celkové napětí je ve stanovených mezích.



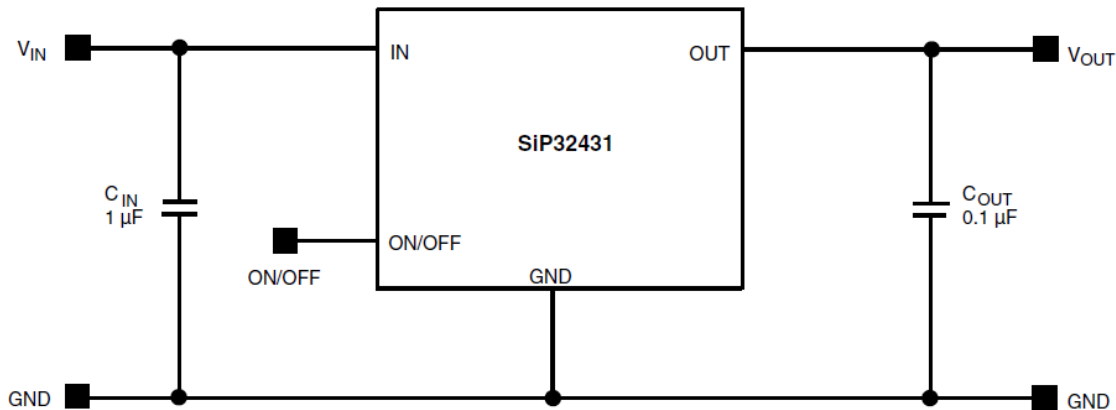
Obr. 5.4-1 Superkondenzátor Murata [11]

5.5. Spínače

Senzor obsahuje řadu periférií, které nejsou většinu času využívány, protože senzor vysílá zprávu zpravidla jednou za několik minut, přičemž vysílání trvá jen několik

milisekund. Periferie většinou mají režimy nízké spotřeby, nicméně i tyto hodnoty jsou většinou poměrně velké.

Z toho důvodu byl vybrán universální spínač, který tyto proudy minimalizuje. Jedná se o výrobek firmy Vishay Siliconix, typ SiP32431. Spínač pracuje v rozsahu napětí od 1,5 do 5,5 V.



Obr.5.5-1 Aplikační zapojení spínače SiP32431 [12]

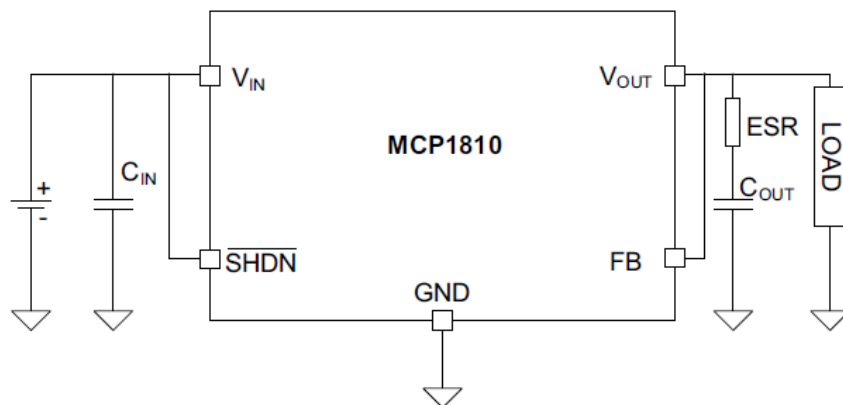
Spínač má vstup, výstup, připojení na zem a ovládací vstup. Obsahuje omezovač rychlosti přeběhu, maximální trvalý proud je až 1,4 A. Svodový proud je ve většině případů v řádu desetin nA.

5.6. Lineární stabilizátor napětí

Zdrojem energie pro senzor je primárně superkondenzátor, který je dobíjen pomocí měniče z energie okolí. Napětí tedy není konstantní, záleží na aktuálních provozních podmínkách, jako je například intenzita osvětlení. Dále bude záležet hlavně na aktuálním nabití kondenzátoru.

Obvody senzoru sice mají širší vstupní rozsah, nicméně jeho nejvyšší hodnoty nedosahují napětí, které bude na vstupu. Dále je možné u některých obvodů snížit odebíraný proud tím, že se sníží vstupní napětí.

Pro tento účel byl vybrán lineární stabilizátor MCP1810 od firmy Microchip Technology s nízkým úbytkem tzv. LDO, který také dosahuje nízkých hodnot klidového proudu. Výstupní napětí je pevně nastaveno na 1,8 V. Klidový proud je typicky 20 nA. Maximální proud, který je schopný regulátor dodat je 100 mA, resp. 150 mA dle výše vstupního napětí. Obsahuje i vstup, kterým je možné odpojit výstup. Obrázek 5.6-1 zobrazuje typické zapojení tohoto obvodu.

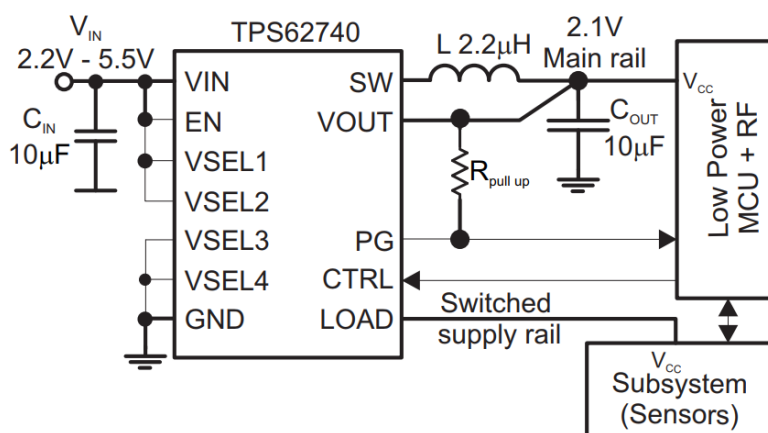


Obr. 5.6-1 Typické aplikační zapojení obvodu MCP1810 [13]

5.7. Spínaný zdroj napětí

Stejně jako lineární regulátory, spínané zdroje slouží rovněž pro změnu napěťových úrovní. Spínané zdroje ale na rozdíl od lineárních regulátorů umožňují změnit napětí teoreticky bez výkonových ztrát. To je vhodné zejména v případě, že je nutné dosáhnout vysoké efektivity převodu. Výkonová ztráta je úměrná napěťovému rozdílu na vstupu a výstupu. V tomto případě bude vysílací část pracovat na zhruba 2 V, zdroj poskytuje až zhruba 4 V, výkonová ztráta by tedy byla až 50 %.

Nevýhodou spínaného řešení je kromě vyššího počtu součástek a z toho plynoucí ceny a velikosti řešení také fakt, že dosahuje podstatně vyšších klidových proudů. To nebude vadit v případě, že bude aktivní jen v případě potřeby.



Obrázek 5.7-1 Typické aplikační zapojení obvodu TPS62740 [14]

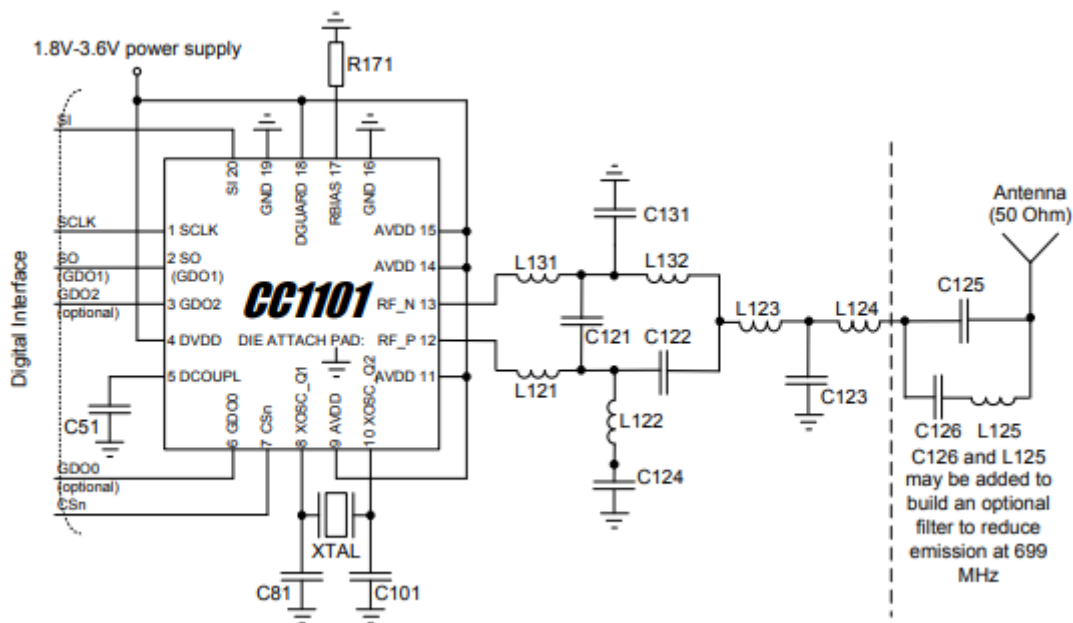
Jako řešení spínaného zdroje byl vybrán obvod TPS62740 od firmy Texas Instruments. Obvod je malý a potřebuje ke své funkci jeden vstupní a jeden výstupní kondenzátor. Dále je třeba jedna cívka. Obvod se řídí digitálními vstupy, pomocí kterých se aktivuje a deaktivuje a dále nastavuje napětí s krokem 100 mV. Dále disponuje jedním

výstupem, který indikuje přítomnost požadovaného napětí na výstupu. Snížení napětí je možné až z 5,5V. Klidový proud obvodu je kolem 360 nA, a dosahuje až 90% účinnosti převodu.

5.8. Bezdrátový komunikační modul

Senzor bude odesílat data bezdrátově, proto je nutné použití obvodů s příslušným rozhraním. Při výběru tohoto obvodu byl kladen důraz mimo jiné i na fakt, aby byl obvod dostupný i do budoucna tak, aby se v případě výroby dal bez problémů sehnat. Také by se mělo jednat o rozšířený model, který je už brán jako spolehlivý.

Jako komunikační rozhraní byl vybrán obvod CC1101 od firmy Texas Instruments. Obvod je vyráběný již dlouhou dobu a těší se velké oblibě. Mezi jeho výhody patří zejména univerzálnost. Podporuje řadu pásem na frekvencích od 300 až do 900 MHz. v případě potřeby je tedy možné změnit vysílací frekvenci ať už z důvodu jiných místních předpisů, či požadavku jiného pásma. Mezi ty nejpoužívanější patří typicky 433 a 868 MHz pro Evropu a 315 a 915 MHz pro Ameriku. V případě změny pásma stačí přenastavení hodnot několika registrů a odpovídající změna obvodů anténní části.



Obrázek 5.8-1 Typické obvodové zapojení CC1101 [15]

Napájení obvodu je přípustné v mezích 1,8 a 3,6 V. Obvod komunikuje přes rozhraní SPI a kromě příslušných vodičů sběrnice má ještě dva konfigurovatelné signální výstupy, které lze s výhodou využít například jako zdroj přerušení pro zjednodušení a usnadnění komunikace.

5.9. Řídicí mikrokontrolér

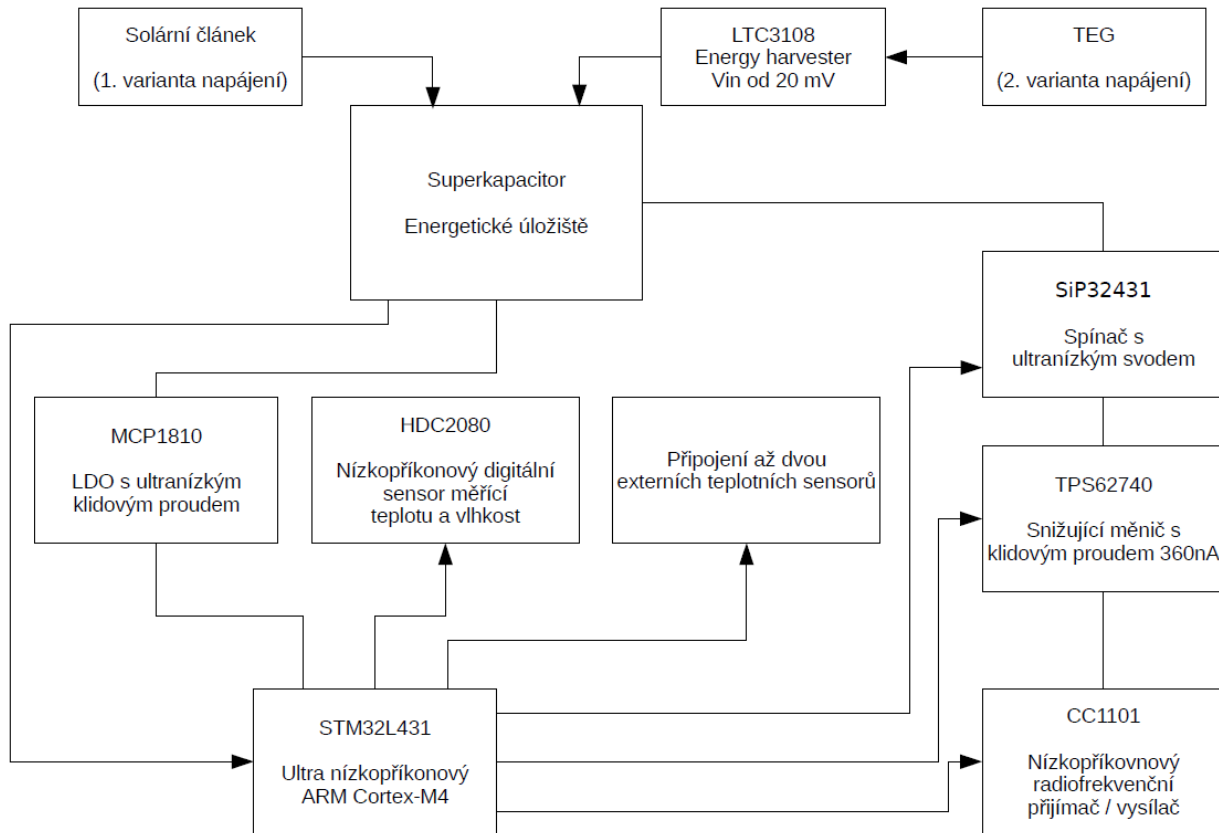
Data o hodnotách prostředí je třeba změřit a odeslat do vzdáleného sběrného bodu dat. Pro to ale nestačí samotné periferie. Je potřeba centrálního prvku, který zajistí naměření dat (například zapnutí napájení měřícího senzoru a vyčtení dat) a naměřená data nějak zpracuje. Dále sestaví datovou a tu vyšle pomocí bezdrátového rozhraní.

Kromě rozměrů a ceny je na mikrokontrolér stejný požadavek jako na ostatní prvky, a to, pokud možno co nejnižší spotřeba. U mikrokontrolérů je otázka spotřeby většinou komplexnější, protože obsahují řadu režimů, které se svou spotřebou značně liší. Rozdíl v jednotlivých režimech je pak v tom, jak rychle je například možný přechod do hlavního režimu, nebo kolik periférií je dostupných. Dále také, jestli je zachována paměť a další.

Pro senzor byl vybrán mikrokontrolér s jádrem Arm® 32-bit Cortex®-M4. Konkrétně se jedná o typ STM32L431CBT6 od výrobce STMicroelectronics. Napájecí napětí procesoru by se mělo pohybovat v rozmezí 1,7 a 3,6 V. Při nejnižším napětí a pokojové teplotě se spotřeba pohybuje v neúspěšnějším režimu kolem 280 nA.

Mikrokontrolér obsahuje řadu periférií a disponuje pamětí typu FLASH o velikosti 128 kB. Velikost paměti SRAM je pak 64 kB.

5.10. Topologie senzoru



Obr. 5.10-1 Topologie senzoru

Senzor obsahuje několik pomyslných bloků. V následující části bude popsána jejich úloha v senzoru i princip jejich funkce.

5.10.1. Zdrojová část

Prvním blokem je energetický zdroj a energetické úložiště. Hlavním úložištěm elektrické energie je superkondenzátor. Jeho kapacita je dimenzována tak, aby byl schopen pokrýt výpadky energie v typickém provozu, což je typicky 24 hodin.

Superkondenzátor je dobíjen dvěma alternativními zdroji. První z nich je solární článek. Vybraný solární článek poskytuje dostatečné výstupní napětí, proto je možné jeho připojení přímo, aniž by bylo nutné zvyšovat napět'ovou úroveň. Tento vstup lze případně využít pro další zdroje energie, jediný požadavek je na dostatečné výstupní napětí.

Druhým zdrojem je tepelná energie z TEG. Zde je nutné zvýšení napět'ové úrovně, což zajišťuje LTC3108. Minimální vstupní napětí v tomto případě je pouhých 20 mV.

5.10.2. Senzorová část

Pro měření hodnot prostředí jsou použity až tři senzory.

První variantou je kombinovaný digitální senzor HDC2080, který umožňuje měření teploty a vlhkosti.

Další variantou jsou dva externí analogové vstupy. K nim je možno připojit běžný senzor typu NTC.

5.10.3. Vysílací část

Bezdrátové odesílání zpráv zajišťuje vysílač CC1101. Vysílač je spojen přímo s řídicím kontrolérem, napájení zajišťuje spínaný zdroj.

5.10.4. Řídicí část

Celkové řízení činnosti zajišťuje mikrokontrolér STM32L431CBT6. Jsou k němu připojeny všechny periferie, které ovládá a spíná jim napájení.

5.10.5. Řízení energie – Power management

Senzor obsahuje ještě další prvky, které nejsou z blokového schéma dobře viditelné, a to je část power managementu. Ten zajišťuje napájení všech periférií a je řízen z mikrokontroléru. Obsahuje také několik spínačů, které z důvodu úspory energie v případě nečinnosti odpojují nepotřebné bloky.

Další úlohou power managementu je také hlídání přípustných mezí napětí na superkondenzátoru a jeho balancování.

5.10.6. Ochrana superkondenzátoru – balancování

Poslední z důležitých prvků, částečně spadajících do předchozí kategorie řízení energie je pak balancování superkondenzátoru. Ten má totiž definované maximální provozní napětí. V případě zvolené varianty tohoto typu pak ještě maximální provozní napětí každého článku. Je tedy nezbytně nutné zajistit, aby nedošlo k překročení povolených hodnot na každém z článků, protože by to mohlo způsobit destrukci superkondenzátoru. Podobné obvody jsou celkem populární například u lithium-iontových akumulátorů, které jsou na překročení maximálního napětí velmi citlivé. Tam jsou v nejjednodušších případech zpravidla využívány precizní Zenerovy diody v paralelním zapojení. Bohužel jejich využití v tomto případě by znamenalo velký nárůst svodových proudů. To by negativně ovlivnilo výdrž senzoru. Balancování je tedy

řešeno pasivně pomocí odporů, které se připínají přes spínače. Ty jsou řízeny z mikrokontroléru, který hlídá maximální napětí článků.

5.11. Programové vybavení senzoru

Jak již bylo řečeno, o funkčnost celého senzoru se stará řídicí mikrokontrolér. Pro ten byl napsán program tak, aby splňoval požadovanou funkčnost a zajistil co možná nejnižší možnou spotřebu.

Princip funkce na následující:

Nejdříve proběhne inicializace mikrokontroléru a všech jeho periférií. Dojde ke změření napěťové úrovně na superkondenzátoru. To obnáší připojení měřícího děliče, změření hodnoty a jeho opětovné odpojení. V případě, že není k dispozici dostatek energie, procesor přejde do úsporného režimu a čeká definovanou dobu. Pokud by byl senzor vybitý, pokus o odeslání by kvůli nedostatku energie stejně selhal, takže by nemělo smysl pokračovat. V případě, že je energie dostatek, program pokračuje dále.

Dojde k vyčtení unikátního sériového čísla procesoru, a vytvoření hlavičky zprávy. Dle aktuální konfigurace je zapnuto napájení pro příslušné senzory, jsou změřeny hodnoty. V případě například externího NTC senzoru je na základě napětí vypočtena teplota. Naměřené hodnoty jsou dosazeny do zbytku zprávy a připraveny k odeslání.

Je spuštěno napětí pro spínaný zdroj, který je následně povolen. Jeho náběh není okamžitý, proto je nutné vyčkat na přítomnost správného napětí. Vysílač CC1101 je inicializován a jsou odeslány data.

Po ukončení cyklu senzor přejde do úsporného módu, kde vyčkává požadovanou dobu, například 5 minut. Celý cyklus se následně opakuje.

V případě nečinnosti procesoru jsou využity jeho úsporné módy tak, aby se maximálně šetřila energie. V tomto případě jsou využity dva režimy.

První z nich je režim snížené spotřeby, tzv. STOP mód. V tomto režimu je zachována hodnota paměti SRAM, jsou ale vypnuty hodiny obvodu. Je využit konkrétně režim STOP1. Výhodou je rychlé probuzení pohybující se kolem 7 μ s, a spotřeba pohybující se kolem 5 μ A. Probuzení je realizováno pomocí přerušení generované nastaveným časovačem a využívá se pro krátké časové intervaly v řádu ms. Je využit například při čekání na náběh spínaného zdroje.

Druhým režimem je tzv. Standby mód s obvodem reálného času. Jedná se v podstatě o režim, při kterém mikrokontrolér spotřebovává nejnižší množství energie a je zároveň schopen se z tohoto režimu samostatně probudit. Jsou ztraceny hodnoty všech pamětí, vyjma několika registrů. Je zachováno nastavení výstupních pinů procesoru. Spotřeba je v tomto případě kolem 280 nA. Před přechodem do tohoto režimu je nastaven časovač reálných hodin, který po vypršení vygeneruje přerušení, které zahájí nový cyklus. Standby režim je využit pro čekání v řádech sekund až minut.

Programové vybavení – firmware byl vytvořen v prostředí System Workbench for STM32. Dále byly využity základní knihovny periférií jako například SPI nebo A/D převodník dodávaných od výrobce obvodů z balíku STM32CubeMX. Ostatní knihovny, jako například ovladače vysílače CC1101 byly vytvořeny v rámci této práce.

5.12. Datová zpráva

Datová zpráva byla navržena tak, aby co nejlépe odpovídala této aplikaci. Obsahuje dvě části – hlavičku a naměřená data.

Tab. 5.12-1 Hlavička datové zprávy

0. bajt	1. bajt	2. bajt	4. bajt	5. bajt	6. bajt	7. bajt
Unikátní číslo senzoru UID (8 B)						
Typ senzoru (2 B)		Identifikátor senzoru ID (6 B)				

Hlavička datové zprávy je dlouhá 8 bajtů a obsahuje dvě části. První dva byte charakterizují typ senzoru. Slouží pro další použití, aby bylo možné vytvářet různé typy senzorů měřící různé hodnoty. Typ senzoru bude určovat i formát dat v druhé části zprávy. Druhá polovina – 6 bajtů je identifikační číslo senzoru. Slouží pro rozlišení senzorů. Číslo je unikátní a je převzato ze sériového čísla mikrokontroléru, u kterého výrobce zajišťuje unikátnost. Dohromady tvoří unikátní číslo senzoru, podle kterého budou v napojeném systému data ukládány do databáze.

Tab. 5.12-2 Nosná část datové zprávy

8. bajt	9. bajt	10. bajt	11. bajt
Teplota 1 [°C] (int8_t)	Teplota 2 [°C] (int8_t)	Stav energie [%] (uint8_t)	Vstupní výkon [%] (uint8_t)

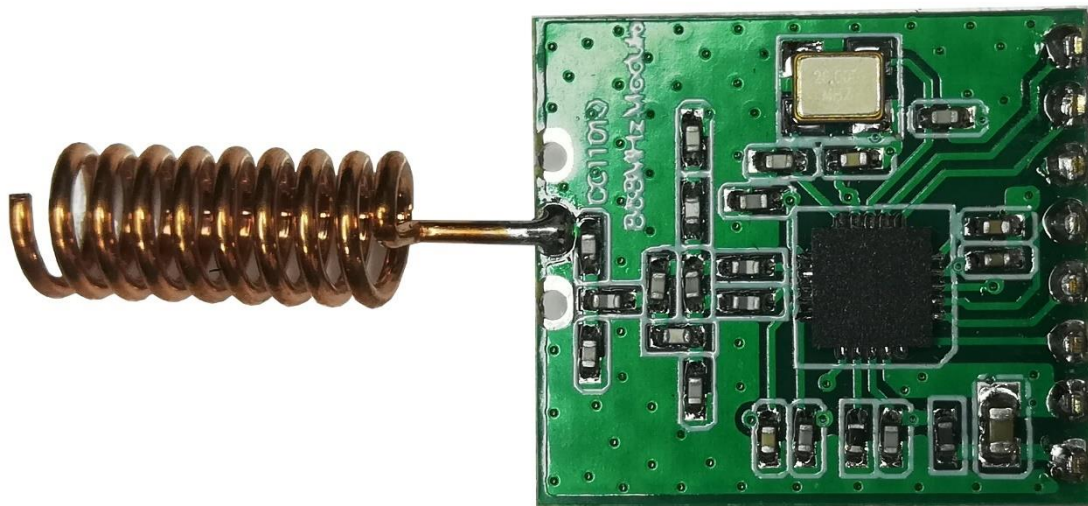
Druhá část datové zprávy obsahuje užitečná data. V případě typu senzoru popsaného v této práci obsahuje hodnoty teplot na každém z externích senzorů, údaj o stavu energie a relativní údaj o dodávané energii z TEG.

5.13. Návrh plošného spoje

Na základě schémat, která jsou v příloze byl vytvořen návrh plošného spoje. Výsledkem je dvouvrstvý plošný spoj. Senzor byl vytvořen ve dvou revizích, druhá revize obsahuje některé návrhové chyby, které se projeví při testování prototypu. Návrh byl proveden v návrhovém systému Eagle. Výsledné motivy jsou k nahlédnutí v příloze. Rozměry senzoru jsou 52 x 22 mm, rozměry druhé revize jsou shodné s první, byly pouze přidány některé obvody.

5.14. Hotový bezdrátový senzor

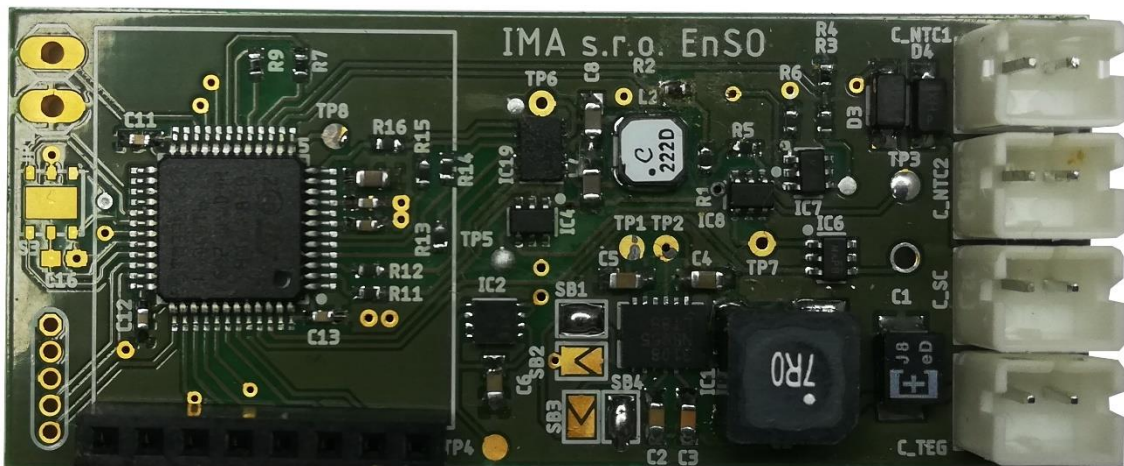
Na základě vybraných obvodů, jejich doporučeného obvodového zapojení a požadované funkčnosti byla sestavena schémata. Byla navržena první revize senzoru. Tento prototyp byl následně využit pro některá měření a testování. Byly ale objeveny chyby, které napravuje revize druhá. Ta byla vyrobena ve větší sérii pro možnost testování modelového příkladu.



Obr. 5.14-1 Vysílací modul s CC1101

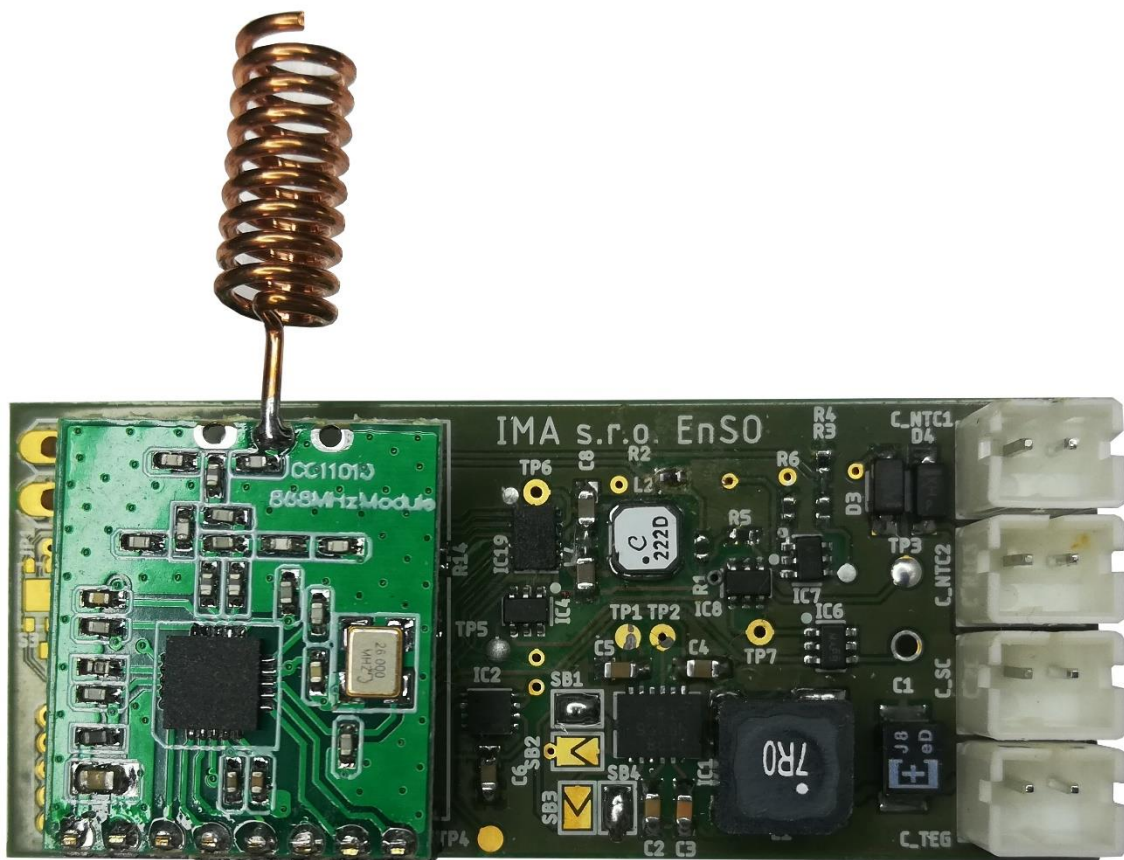
Mezi největší změny patří úprava balancovacích obvodů pro superkondenzátor. Ty totiž v první revizi neumožňovaly balancování oběma směry. Další změnou je přidání odporů do cest spínaného zdroje. První revize totiž vykazovala vlastnost, že při určitém rozsahu vstupního napětí zdroje došlo k přetížení a restartu kontroléru. Na odporech by bylo možné měřit tekoucí proudy. Na druhé revizi se tato závada již neobjevila, chyba

tedy mohla být například v poškozeném kuse obvodu. Odpory tedy byly nahrazeny nulovými. Poslední úpravou bylo přidání diod, protože měnič pro TEG LTC3108 vykazoval větší svodový proud, než bylo očekáváno. Dioda byla také přidána ke vstupu SC.



Obr. 5.14-2 Hotový senzor druhé revize bez vysílacího modulu

Vysílač CC1101 byl využit již v hotové osazené verzi modulu. Připojuje se přes konektor. Výsledné řešení je jednodušší a i menší.



Obr. 5.14-3 Hotový senzor včetně vysílacího modulu

Kromě konektoru vysílacího modulu senzor obsahuje celkem konektory. Dva slouží pro připojení externích senzorů, jeden pro připojení SC a jeden pro připojení TEG.

6. Konstrukce sběrného bodu

6.1. Shrnutí požadavků na sběrný bod

Na základě předchozí diskuze byly zhodnoceny požadavky na sběrný bod tak, aby plně vyhověl praktickému provozu. Jsou to:

- bezdrátové komunikační rozhraní pro příjem dat od senzorů
- připojení pomocí standardizovaného rozhraní na navazující systémy

Dále bude popsána konstrukce bezdrátového sběrného bodu.

6.2. Bezdrátový komunikační modul

Bezdrátový komunikační modul je využit stejný, jako v případě senzoru. Jeho vlastnosti byly popsány v předchozí části.

6.3. Řídicí mikrokontrolér

V tomto případě nejsou požadavky na spotřebu zásadní. Sběrný bod bude připojen na trvalé napájení. Oproti senzoru je ale třeba, aby byla data předávána dalším systémům. Z toho vyplývá požadavek na standardizované a rozšířené rozhraní. Pro tento účel se nejlépe hodí rozhraní typu Ethernet. Zařízení tak bude možno připojit do sítě, jako například běžné počítače. Mikrokontrolér tedy musí kromě rozhraní pro připojení bezdrátového modulu obsahovat i rozhraní typu Ethernet.

Výrobce obvodů dnes nabízejí množství vývojových sad, kde jsou obvody zapojené v typickém zapojení. Nabízí se tedy možnost využití této varianty.

Byla vybrána vývojová deska NUCLEO-F207ZG. Obsahuje napájecí a programovací port microUSB, konektor RJ45 pro připojení do ethernetu, několik signalizačních diod a tlačítka. Deska obsahuje většinu vývodů dostupných na rozšiřovacích konektorech.

6.4. Programové vybavení sběrného bodu

Programové vybavení – firmware sběrného body využívá stejné prostředí a balíky jako sensorová část. Na mikrokontroléru běží reálnový operační systém RTOS. Dále jsou využívány knihovny pro TCP/IP spojení LwIP a nakonec knihovny MbedTLS pro uskutečnění šifrovaného spojení.

Činnost sběrného bodu začíná inicializací periférií mikrokontroléru. Dále jsou inicializovány všechny knihovny, které se používají.

Příjem dat se aktivuje prvním tlačítkem. Pokud je příjem zapnutý, jsou data přijímána a předávána na sériovou linku. Ty je možné zobrazit například v připojeném počítači přes microUSB port.

Odesílání dat vzdáleně je aktivováno druhým tlačítkem. V takovém případě je při obdržení dat navázáno spojení s nadefinovaným serverem. Jedná se o šifrované spojení SSL. Data jsou odeslána a připojení ukončeno.

6.5. Návrh plošného spoje

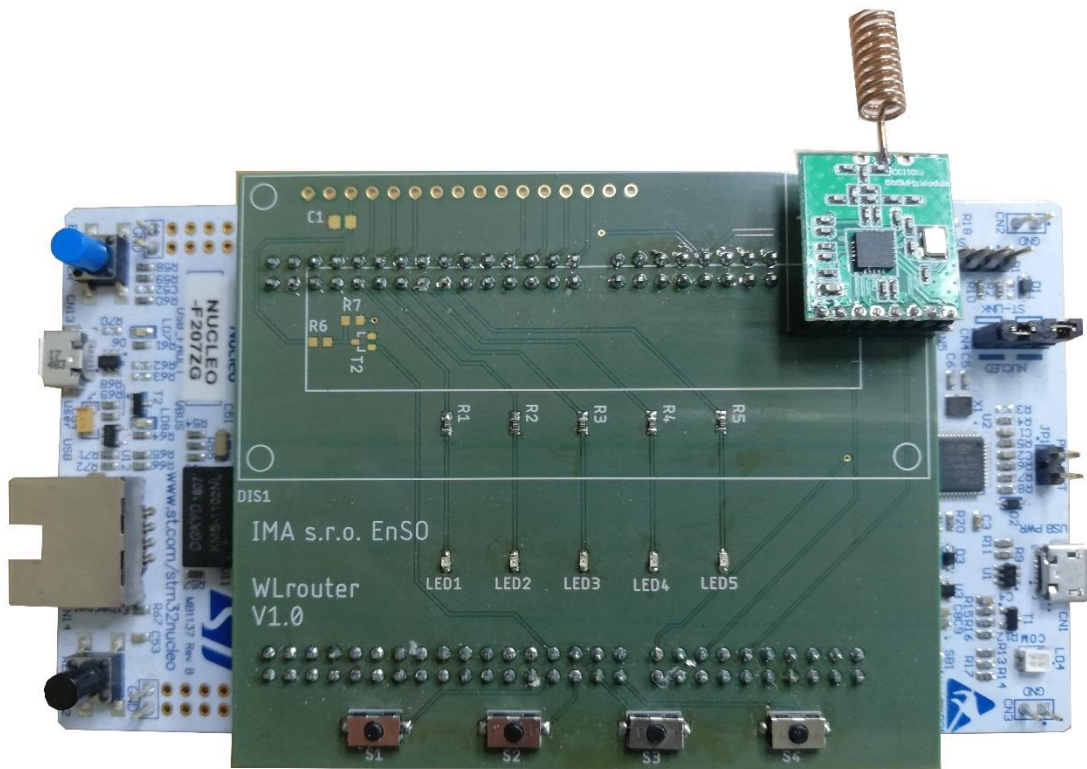
Na základě sestavených schémat byla vytvořena rozšiřující deska do vývojové desky Nucleo. Deska obsahuje i další prvky, které nejsou momentálně využity, jako je například displej. Stejně jako senzor byl návrh proveden v návrhovém systému Eagle.

DPS je dvouvrstvý, obsahuje konektor, který přesně zapadá do desky Nucleo.

6.6. Hotový sběrný bod

DPS byly osazeny a byl vytvořen prototyp sběrného bodu.

Na obrázku 6.6-1 je vidět hotový sběrný bod s osazeným modulem přijímače. Spodní bílou deskou je DPS vývojové sady Nucleo. Deska obsahuje čtyři testovací tlačítka a pět indikačních diod.

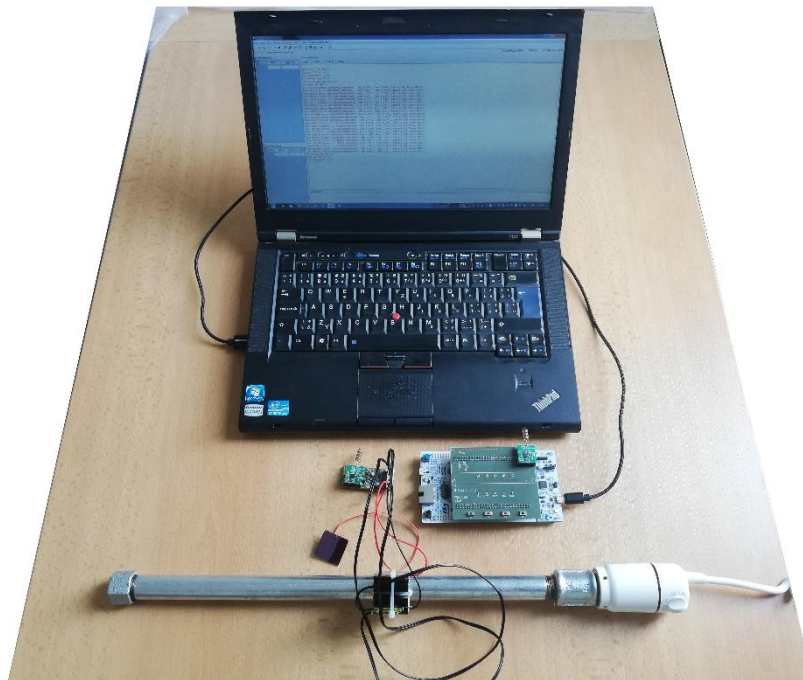


Obr. 6.6-1 Hotový sběrný bod

7. Ověření funkčnosti a měření

7.1. Testovací pracoviště

Z důvodu ověření funkčnosti bylo sestaveno testovací pracoviště.

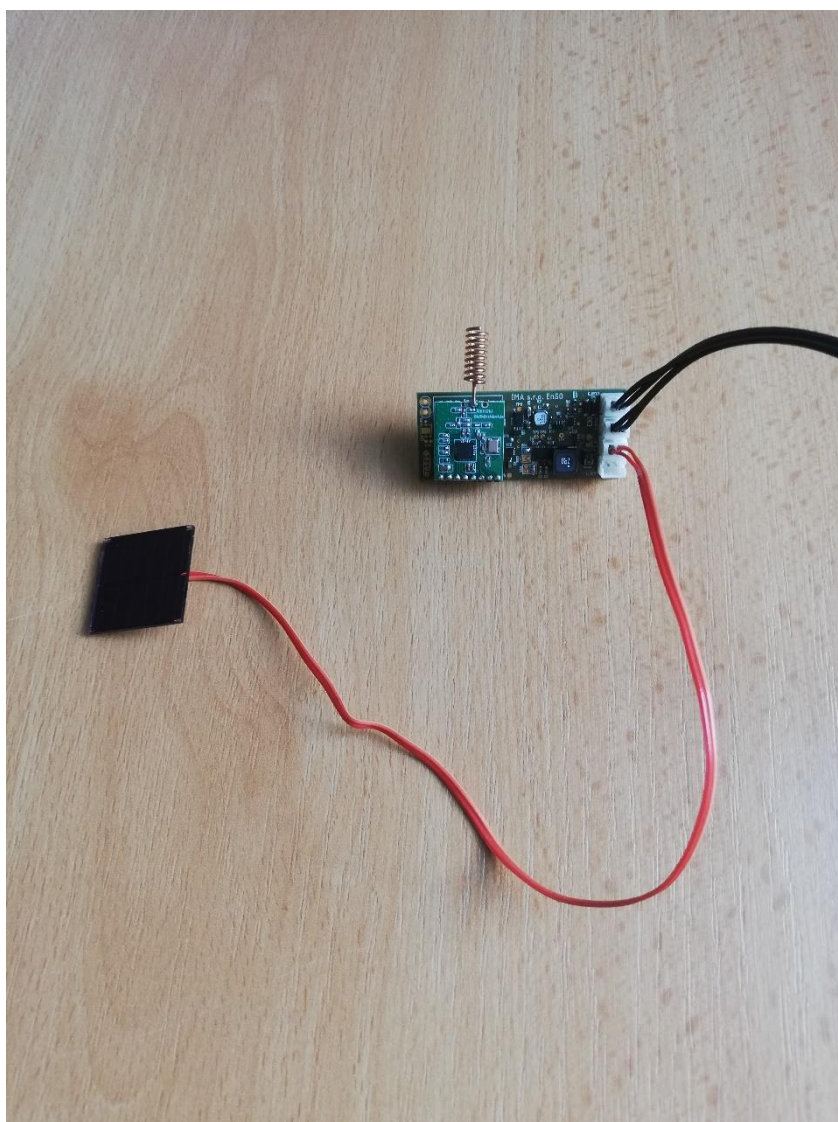


Obr. 7.1-1 Testovací pracoviště

Počítač slouží pro napájení sběrného bodu a zároveň vypisuje přes terminál přijatá data.



Obr. 7.1-2 Detail senzoru v konfiguraci s termoelektrickým článkem na rozvodech teplé vody

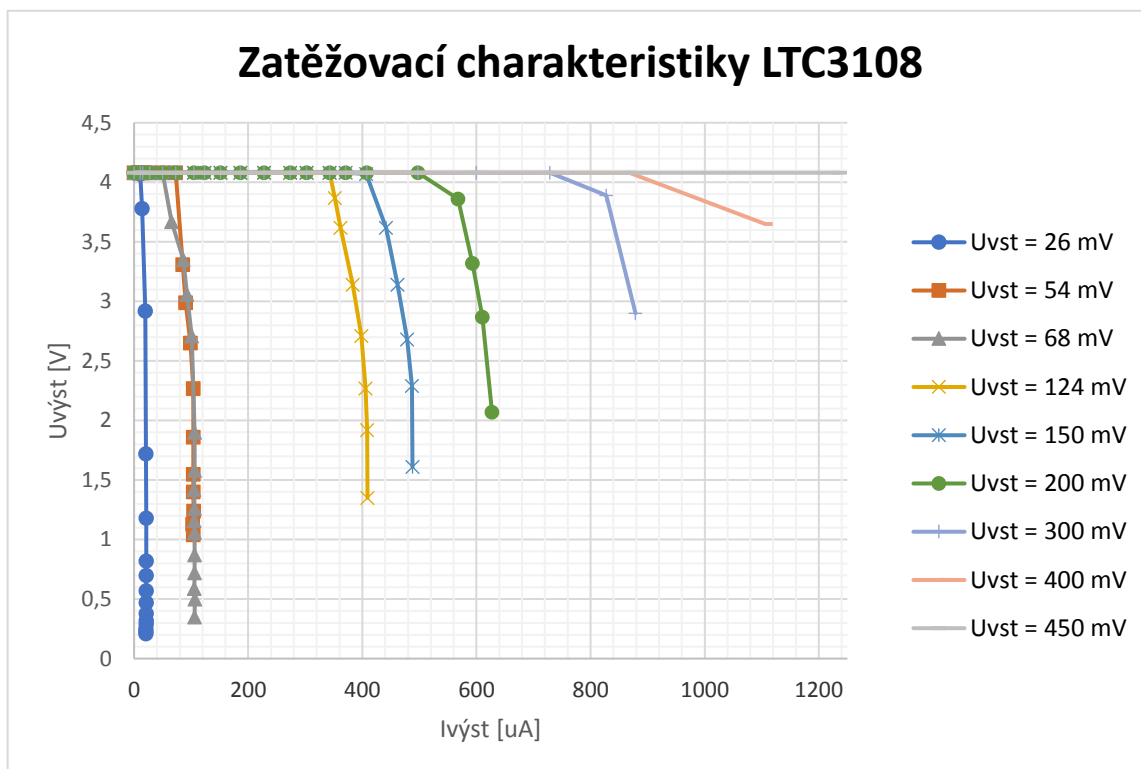


Obr. 7.1-3 Detail senzoru v konfiguraci se solárním článkem

7.2. Senzor

7.2.1. Měření obvodu zajišťujícího zvýšení napěťové úrovně

Byl měřen obvod sloužící k převodu nízkonapěťových zdrojů, jako jsou například TEG. Byly měřeny zatěžovací charakteristiky pro různá vstupní napětí.



Obr. 7.2-1 Naměřené zatěžovací charakteristiky LTC3108

Naměřené hodnoty odpovídají předpokladům z datasheetu obvodu. Z grafu je vidět, že již při napětí kolem 50 mV je generován nabíjecí proud 100 μA , což je pro potřeby senzoru více než dostatečné. Napětí naprázdno je dáno nastavením propojek, které je v tomto případě 4,1 V.

7.2.2. Měření dosahu zařízení v závislosti na parametrech přenosu dat

Komunikační modul CC1101 umožňuje kromě běžné změny frekvence také nastavení přenosové rychlosti a vysílacího výkonu. Tyto parametry ovlivňují dosah zařízení a také spotřebu energie.

Při měření byly zaznamenávány hodnoty proudu pro dané režimy, délka vysílání testovací zprávy a fakt, zda bylo možné zprávu na modelovém příkladu úspěšně doručit, či nikoliv. Jednalo se o přenos dat v modelové budově přes dvě patra.

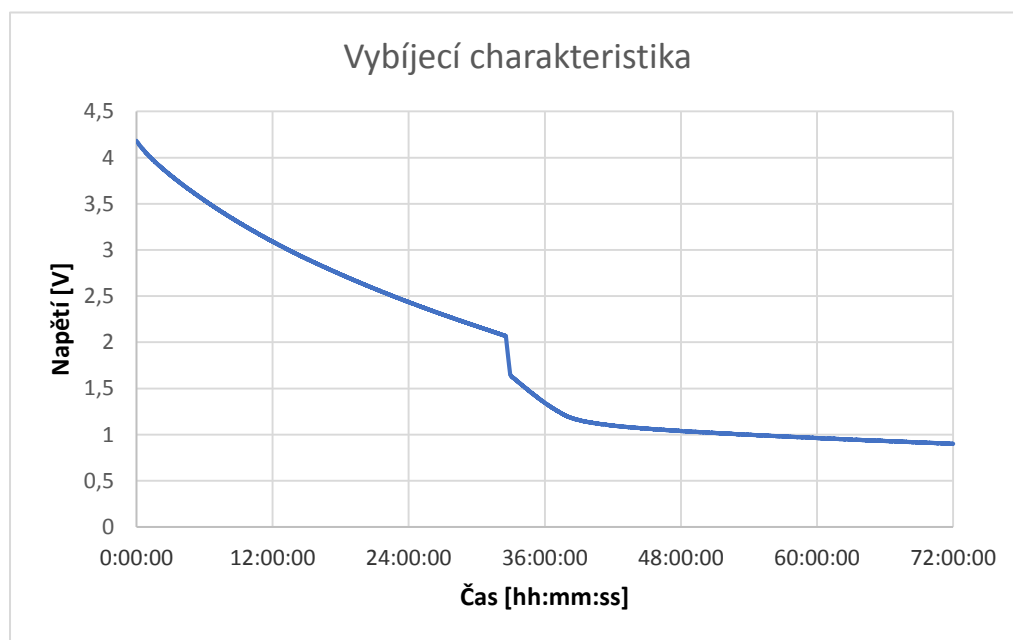
Tab. 7.2-1 Spotřeba energie a dosah v závislosti na parametrech vysílání

Vysílací výkon	12 dBm (0xC0)	10 dBm (0xC5)	7 dBm (0xCD)	5 dBm (0x86)	0 dBm (0x50)	-6 dBm (0x37)	-10 dBm (0x26)	-15 dBm (0x1D)	Vysílání @ 32 B [ms]
Rychlost	Energie [uWh]								
1,2 kbit/s	8,237	7,225	6,214	4,793	4,046	3,950	3,492	3,203	289
10 kbit/s	1,029	0,903	0,776	0,599	0,505	0,493	0,436	0,400	36,1
100 kbit/s	0,144	0,126	0,108	0,084	0,071	0,069	0,061	0,061	5,04
250 kbit/s	0,085	0,074	0,064	0,049	0,042	0,041	0,041	0,036	2,97
500 kbit/s	0,066	0,058	0,050	0,038	0,032	0,032	0,032	0,028	2,32
Proud [mA]	34,2	30	25,8	19,9	16,8	16,4	14,5	13,3	
Napětí [V]	3	3	3	3	3	3	3	3	

Tabulka 7.2-1 zobrazuje spotřebu energie a dosah zařízení v závislosti na parametrech vysílání. Jednotlivé sloupce rozlišují nastavení výkonu, řádky pak hodnotu přenosové rychlosti. Po stranách je uvedena doba vysílání testovací zprávy a spotřebovaný proud. Z těchto hodnot je pak spočtena energie na vyslání zprávy. V případě, že se zprávu podařilo na modelovém příkladu doručit je políčko vybarveno zeleně, v případě, že k doručení nedošlo pak červeně.

Z tabulky je možné určit nejlepší možné nastavení tak, aby byla spotřeba energie pokud možno co nejnižší.

7.2.3. Měření výdrže superkondenzátoru



Obr. 7.2-2 Výdrž senzoru

Obrázek 7.2-2 zobrazuje graf vybíjení senzoru. Měření a odesílání dat probíhalo s minutovou periodou. Superkondenzátor byl do plna nabíjen zhruba hodinu tak, že nabíjecí proud poklesl pod 30 μA . Celkem byl senzor chopen odeslat 1950 zpráv. Náhlý pokles napětí je způsoben poklesem napětí pod úroveň minimálního napětí mikrokontroléru. V tom případě totiž podpět'ová ochrana aktivuje reset obvodu, což zvýší jeho spotřebu.

7.2.4. Měření klidové spotřeby

Jako poslední měření bylo určení klidové spotřeby v režimu spánku. Byla naměřena hodnota 380 nA.

7.3. Sběrný bod

7.3.1. Výstup dat

U sběrného bodu byl otestován příjem dat a napojení na další systémy pro správu dat. Nejjednodušší možností je připojení k počítači a zobrazení logu posílaného přes virtuální sériový port. Ten obsahuje kromě přenášených dat i informace o stavu připojení do sítě a podrobnosti z navázání šifrovaného spojení.

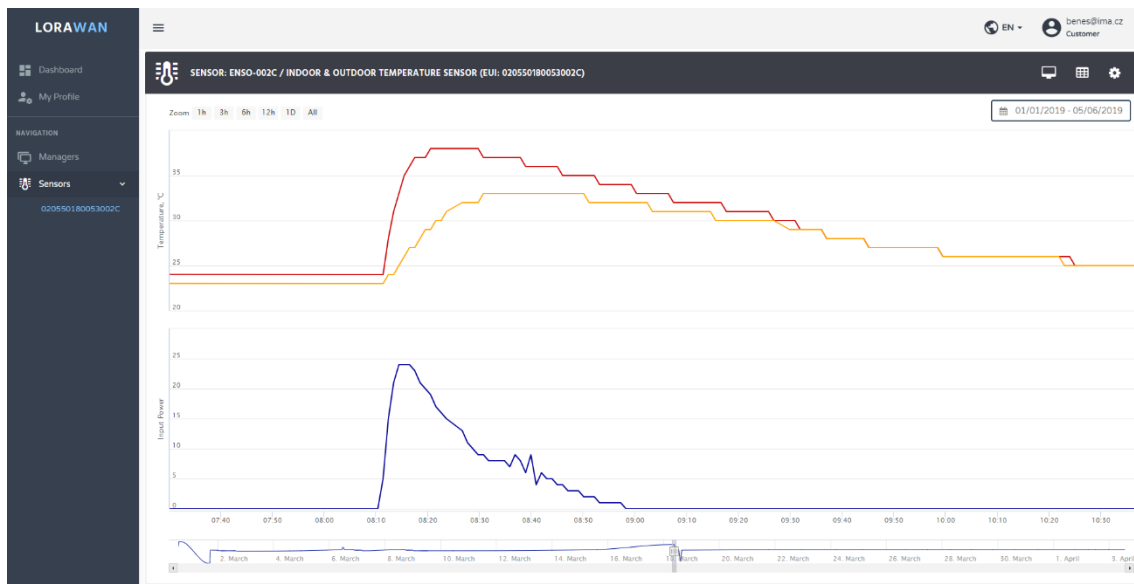
```

Communication
Colors&Fonts Mode  COM13  115200, None, 8, 1
ASCII  HEX  Decimal  Binary
Wireless init OK<LF>
Button INIT OK.<LF>
Starting DHCP...<LF>
IP address get OK.<LF>
IP is:192.168.201.246.<LF>
Wireless RX OK<LF>
IoT sending OK<LF>
New MSG(1):Sensor UID:0205501800600065, Temp 1:24°C, Temp 2:25°C, Battery:94%, Power:0%<LF>
<LF>
. Seeding the random number generator... ok<LF>
. Loading the CA root certificate ... ok (0 skipped)<LF>
. Connecting to tcp/iotlorawan.azurewebsites.net/443... ok<LF>
. Setting up the SSL/TLS structure... ok<LF>
. Performing the SSL/TLS handshake... ok<LF>
. Verifying peer X.509 certificate... ok<LF>
> Write to server: 303 bytes written<LF>
<LF>
POST /api/wlsensordatamessage HTTP/1.1<CR><LF>
Host: iotlorawan.azurewebsites.net<CR><LF>
Content-Type: application/json<CR><LF>
Authorization: RpTtZxApoRj82ewwS5dfQ8gBQLsGyJ5hrqnL8JTEVUyZgZ1EL19aJdAq9kptwhlgKqKSh<CR><LF>
Content-Length: 085<CR><LF>
<CR><LF>
{"eui":"0205501800600065", "temp1":24, "temp2":25, "battery":094, "inputPower":000}<CR><LF>
< Read from server: 353 bytes read<LF>
<LF>
HTTP/1.1 200 OK<CR><LF>
Cache-Control: no-cache<CR><LF>
Pragma: no-cache<CR><LF>
Expires: -1<CR><LF>
Server: Microsoft-IIS/10.0<CR><LF>
X-AspNet-Version: 4.0.30319<CR><LF>
X-Powered-By: ASP.NET<CR><LF>
Set-Cookie:
ARRAffinity=c45b2495ae03ea857a2ae59a578014a755cdf62e87f1e2959a8aff0a42d7d3e8;Path=/;HttpOnly;Dom
ain=iotlorawan.azurewebsites.net<CR><LF>
Date: Mon, 06 May 2019 09:33:08 GMT<CR><LF>
Content-Length: 0<CR><LF>
<CR><LF>
> Communication closed<LF>
<LF>
<LF>

```

Obr. 7.3-1 Logovací výstup přes virtuální sériový port po připojení k počítači

Po inicializaci byl pomocí tlačítek zapnut příjem a odesílání dat. Dále je na logu z obrázku 7.3-1 vidět přijetí zprávy ze senzoru. Je vidět unikátní identifikátor senzoru, naměřené teploty, stav energie a dobíjecí výkon. Po přijetí zprávy se začne zahajovat spojení se serverem a jsou odeslány data.



Obr. 7.3-2 Zobrazení dat odeslaných do cloudu

Obrázek 7.3-2 zobrazuje návazné zpracování dat. Přijatá data jsou uložena do databáze a přes webové rozhraní je možné jejich zobrazení. Na obrázku je také vidět závislost generované energie na teplotě TEG. Dvě zobrazované hodnoty jsou totiž teploty teplé a studené strany TEG. Test byl simulován přiložením hrnku s teplou vodou. Po přiložení začne teplota teplé strany stoupat. Teplotní rozdíl se začne zvětšovat, stoupá i výkon získaný ze článku. Po nějaké době se ale celá sestava prohřeje a teplotní rozdíl opět klesá. S tím klesá i generovaný výkon.

8. Závěr

Úvodní část obsahuje shrnutí základních principů problematiky, která je následně využita. Jsou rozebrány možnosti energy harvesting jako solární články a termoelektrické generátory. Dále jsou popsány principy funkce spínaných zdrojů a je rozebrána problematika superkondenzátorů především s ohledem na svodové proudy a teplotní senzory. V závěru je shrnutí nejpoužívanějších komunikačních rozhraní.

Dále jsou stanoveny cíle práce a jsou určeny požadavky na výsledné zařízení. Jedná se především o zařízení s důrazem na levnou instalaci, spolehlivý provoz s minimem údržby tak, aby byly náklady na provoz systému minimalizovány.

Byla zvolena komunikační topologie hvězdy, použité množství senzorů komunikuje se sběrným bodem přímo.

Na základě stanovených cílů byly navrženy bezdrátové senzory se záložním zdrojem energie – superkondenzátorem. Ten jednak zabezpečuje energetické požadavky v případě špičkových odběrů, jako je například vysílání a dále v případě, že není k dispozici zdroj energie. Jako ten byl vybrán solární článek a termoelektrický generátor. Je využit amorfní solární článek s dostatečným napětím bez nutnosti zvýšení napětí a termoelektrický generátor s odpovídajícím měničem napětí. Byl vytvořen jeden prototyp a druhá revize opravující některé chyby revize první. Rozměry senzoru činí 52 x 22 mm.

Dále byl navržen sběrný bod, který má rozhraní typu Ethernet a je tak možné ho připojit do běžné počítačové sítě. Tam je schopen odeslat data pro další zpracování.

U senzoru byla dosažena klidová spotřeba 380 nA a na jedno nabití superkondenzátoru bez přítomnosti dalšího zdroje napájení senzor naměří a odešle až 1950 zpráv.

Sběrný bod je schopen zobrazit data buď místně, přes microUSB port na připojený počítač, nebo odeslat vzdáleně přes TCP/IP protokol šifrovaným SSL spojením na vzdálený server.

Navržený systém standardně nevykazuje žádné požadavky na údržbu. V případě správné instalace je schopen autonomního získávání energie a provozu. Nutný zásah přichází v úvahu pouze v případě poškození.

Jako možná vylepšení senzoru přichází v úvahu snížení počtu součástek na DPS na základě získaných poznatků. Konstrukce senzoru by mohla zohlednit i umístění do krabičky, případně konstrukce pro montáž na rozvody topení nebo teplé vody. Použitý superkondenzátor se jevil jako naddimenzovaný pro běžné využití, mohla by být použita menší varianta, která by byla i levnější. Dále by přicházelo v úvahu nahrazení modulového vysílače verzí umístěnou přímo na DPS senzoru.

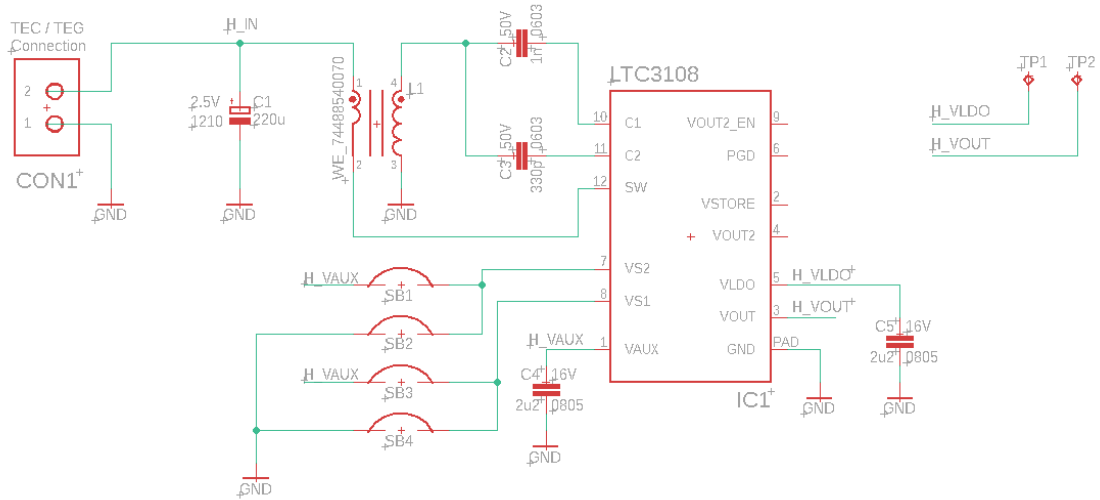
Použité zdroje

- [1] Brand O, Fedder GK, Hierold C, Korvink JG, Tabata O, Briand D, et al. Micro Energy Harvesting. DE: Wiley-VCH; 2015.
- [2] "Review of thermoelectricity to improve energy quality ", International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org), ISSN:2349-5162, Vol.2, Issue 3, page no.847-850, March-2015, Available :<http://www.jetir.org/papers/JETIR1503089.pdf>
- [3] Switch Mode Power Supply [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/switch-mode-power-supply.html>
- [4] Buck-boost topology delivers negative output from positive input [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273276#
- [5] Murata Supercapacitor Technical Note [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/capacitor/edlc/techguide/electrical/c2m1cxs-053.ashx>
- [6] HUSÁK, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Praha: Academia, 2008. Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [7] Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/Seriova_rozhrani.pdf
- [8] MACH, Jiří. Nouzové napájecí zařízení s termoelektrickým generátorem. Diplomová práce. Praha 2015.
- [9] Bq25505 ultra low-power boost charger with battery management and autonomous power multiplexer for primary battery in energy harvester applications [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf>
- [10] Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf>
- [11] DMT334R2S474M3DTA0 / Supercapacitor(EDLC) [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/281/MFCDST1E-1224041.pdf>
- [12] 10 pA, Ultra Low Leakage and Quiescent Current, Load Switch with Reverse Blocking [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/66597/sip32431.pdf>

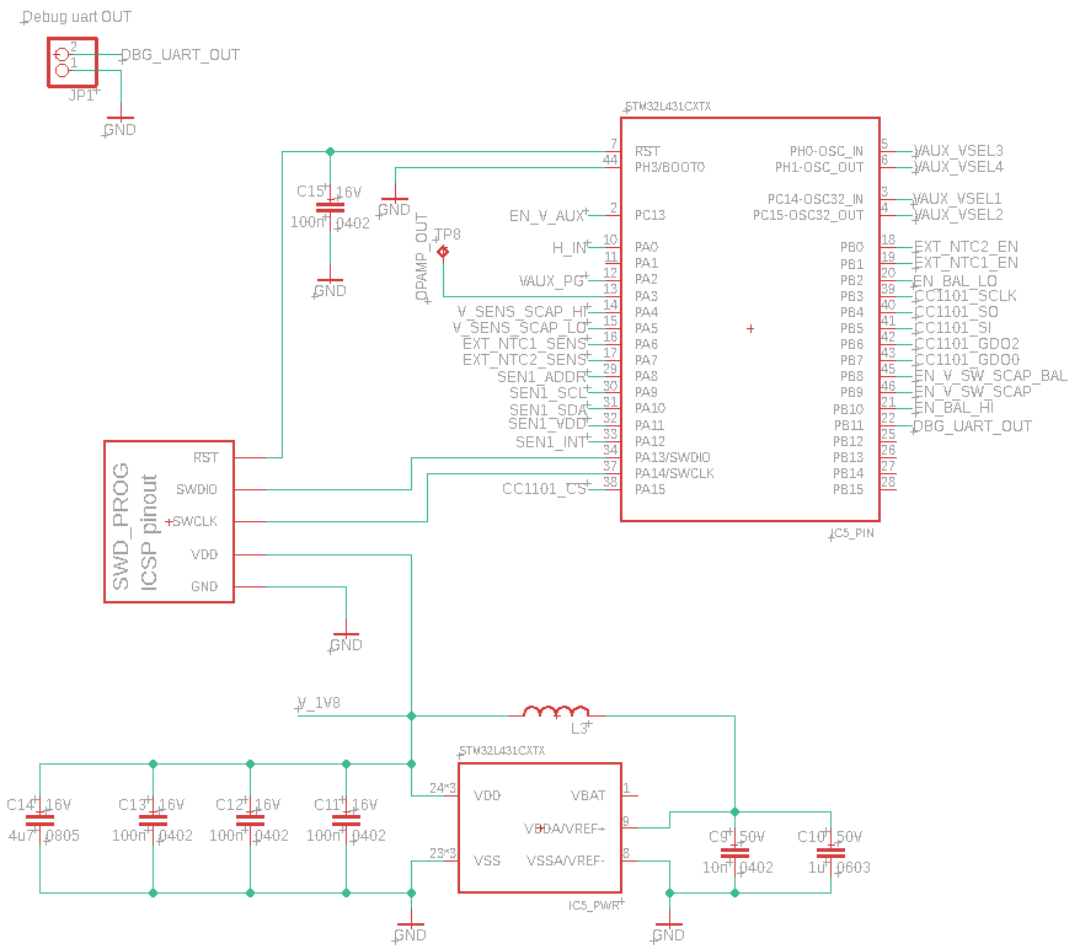
- [13] Ultra-Low Quiescent Current LDO Regulator [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005623A.pdf>
- [14] TPS6274x 360nA IQ Step Down Converter For Low Power Applications [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps62740.pdf>
- [15] Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>
- [16] Mst news: international newsletter on micro-nano integration. Teltow, Německo: VDI/VDE - Innovation + Technik, 2005, (4/05).
- [17] Buck-boost converters handle cold cranking in automotive electronics [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.edn.com/design/automotive-design/4011429/Buck-boost-converters-handle-cold-cranking-in-automotive-electronics>

Přílohy

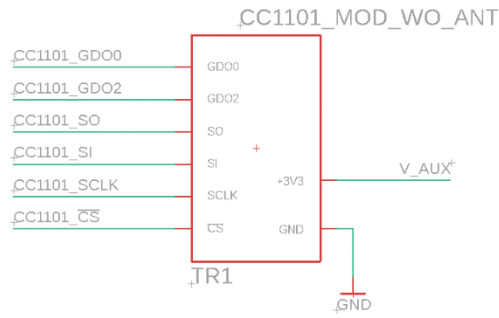
I. Schémata senzoru



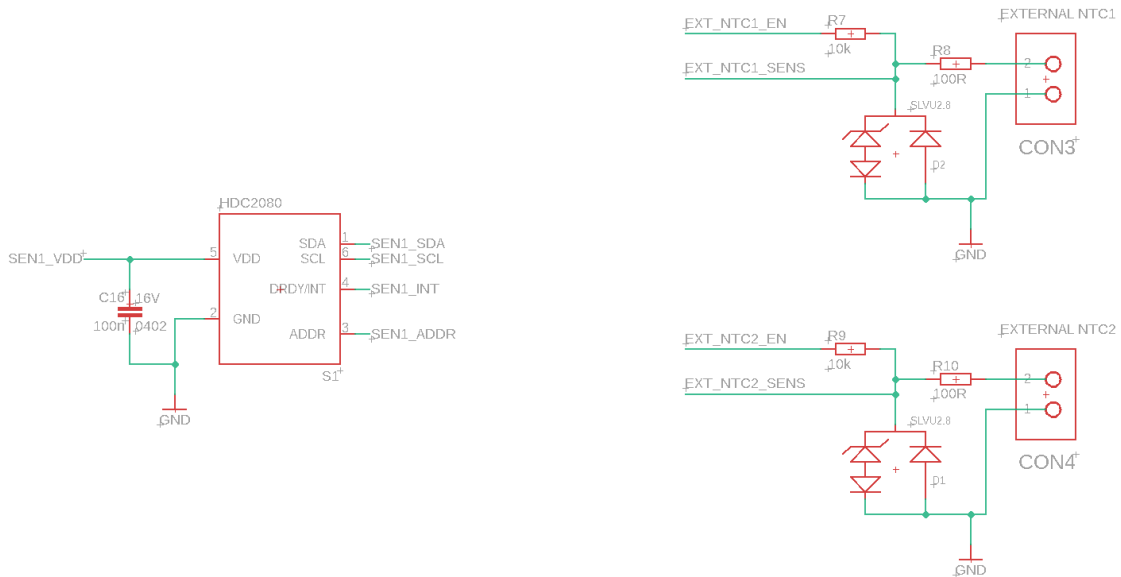
Obr. I-1 Obvod pro zvýšení vstupního napětí



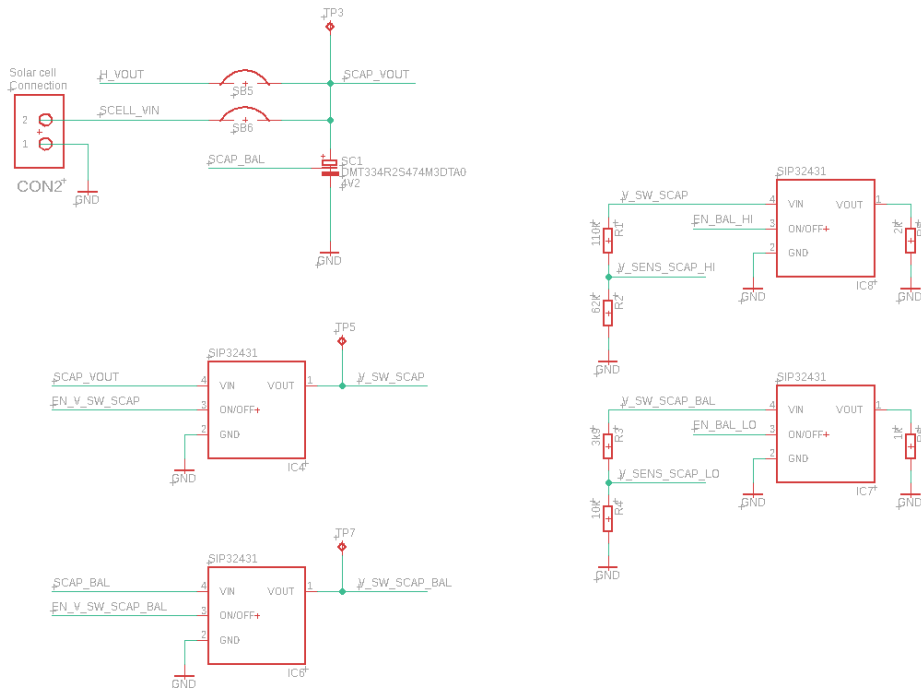
Obr. I-2 Zapojení mikrokontroléru s programacím a logovacím rozhraním



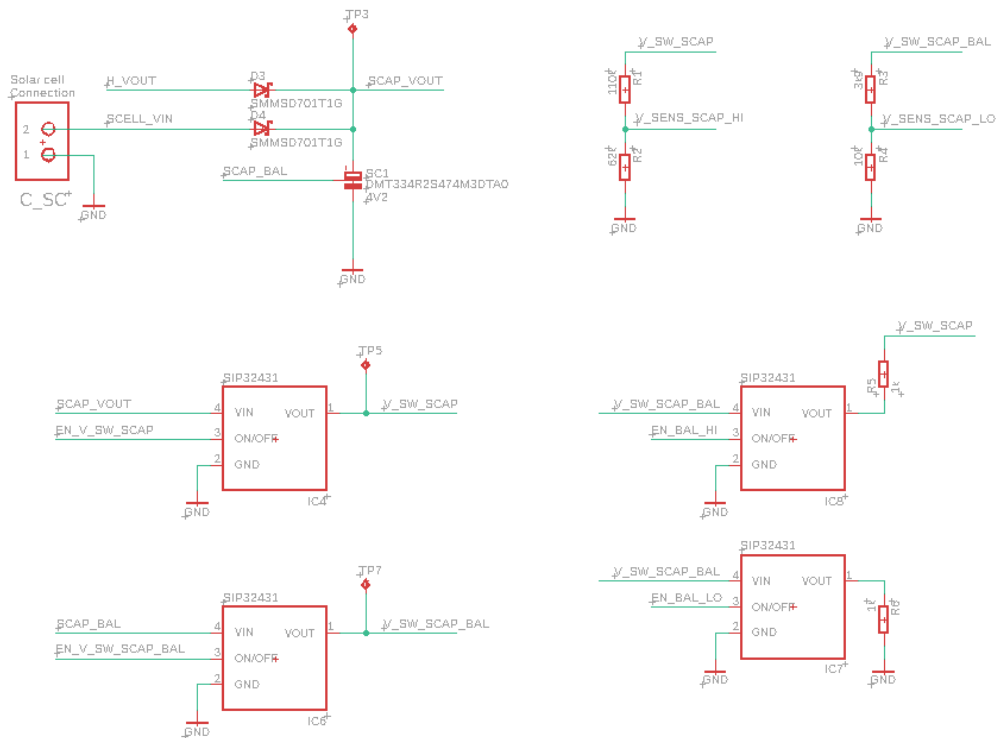
Obr. I-3 Zapojení modulového vysílače



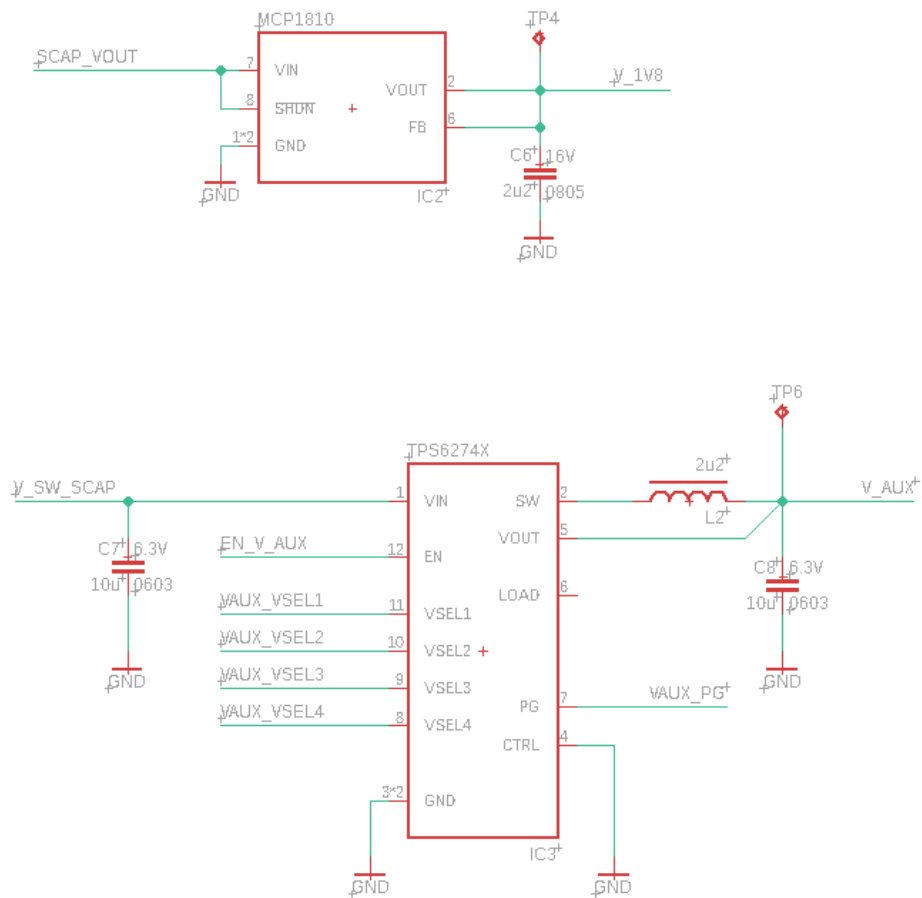
Obr. I-4 Senzorová část



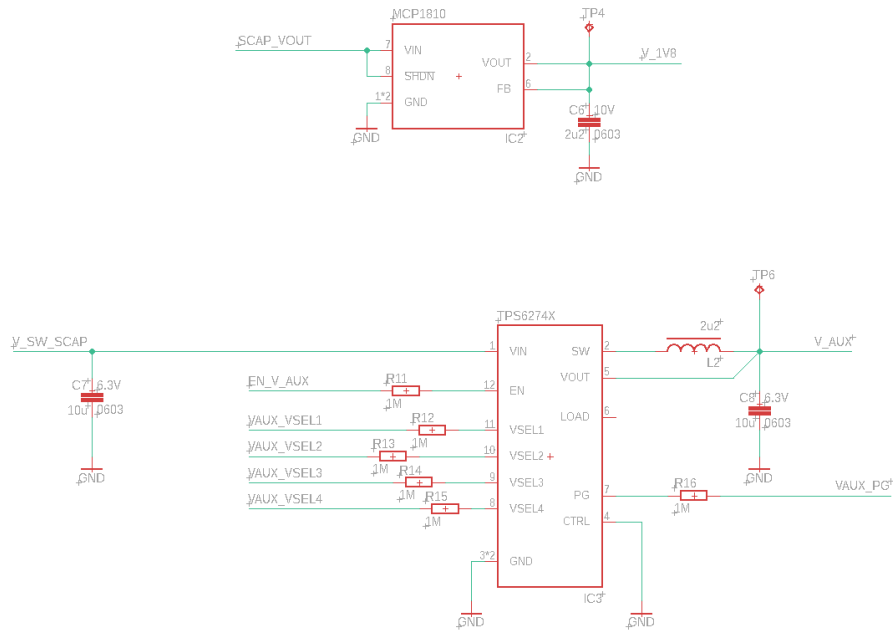
Obr. I-5 Power management první revize



Obr. I-6 Power management opravené druhé revize

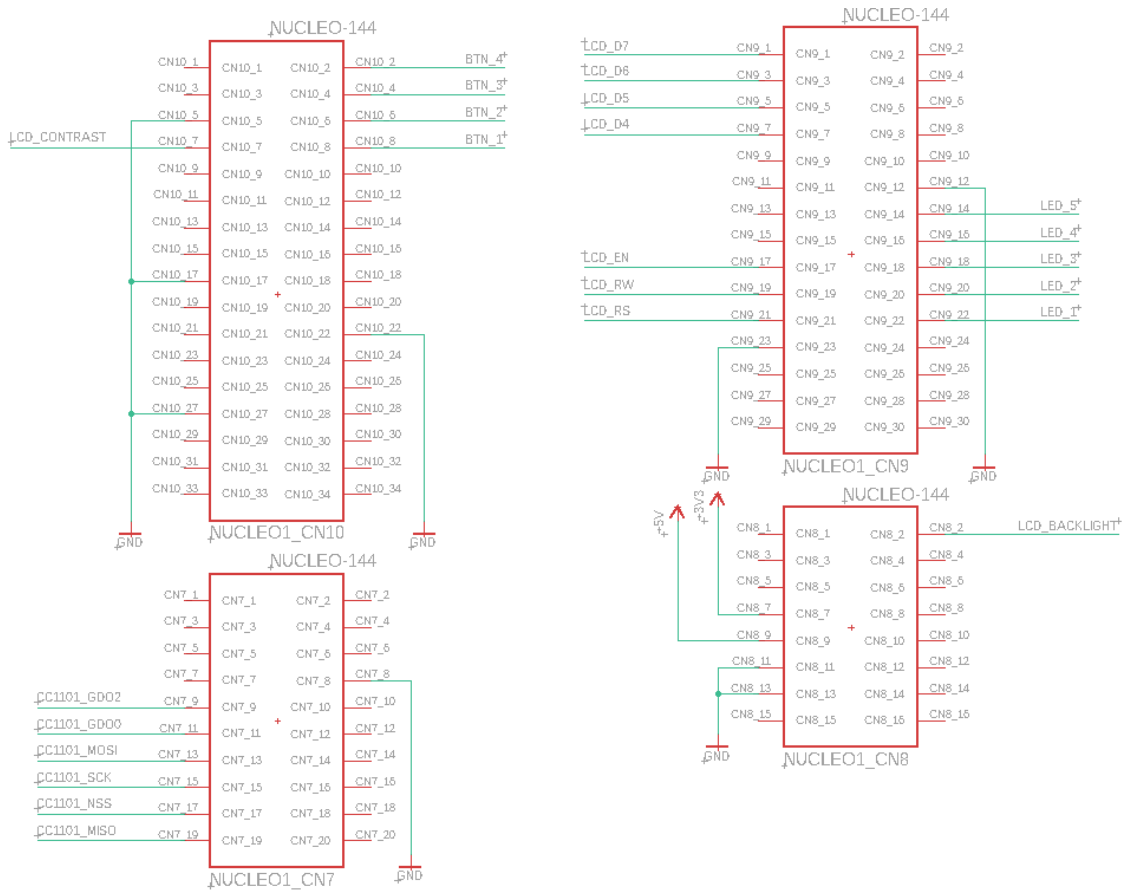


Obr. I-7 Power management první revize druhá část

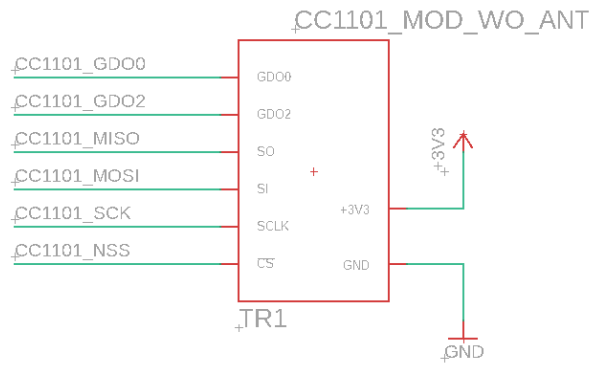


Obr. II-8 Power management opravené druhé revize druhá část

II. Schémata sběrného bodu



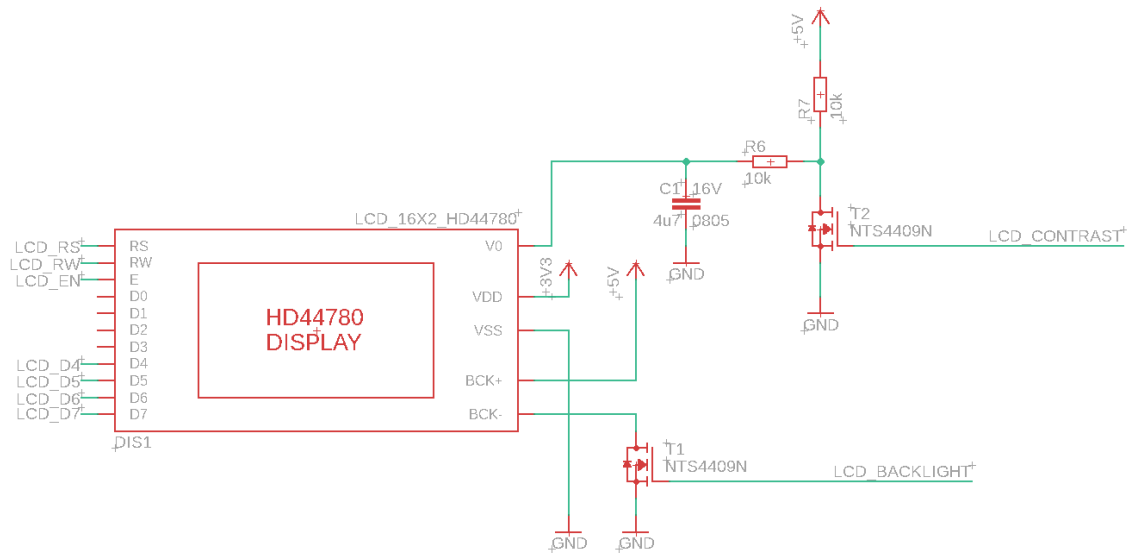
Obr. II-1 Zapojení konektorů pro připojení k vývojové desce Nucleo



Obr. II-2 Zapojení bezdrátového modulu

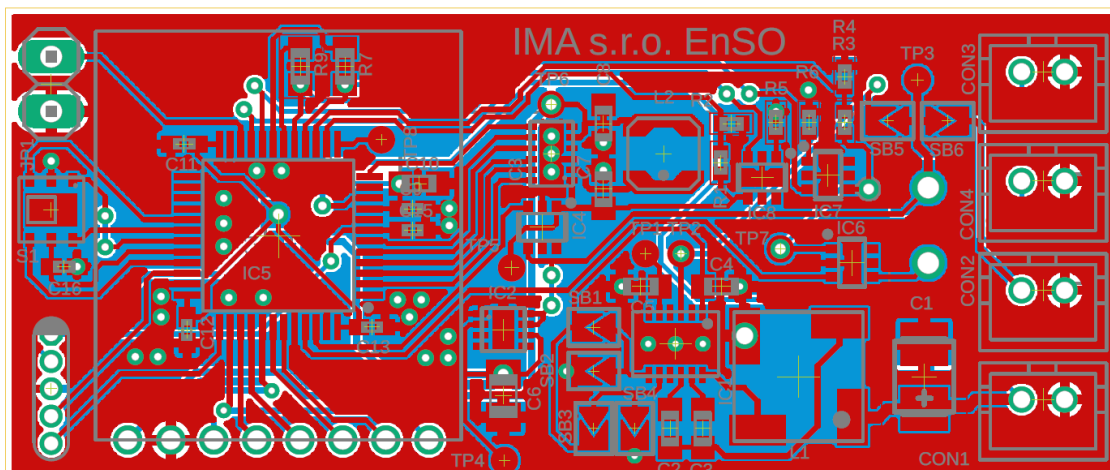


Obr. II-3 Zapojení tlačítek a indikačních diod

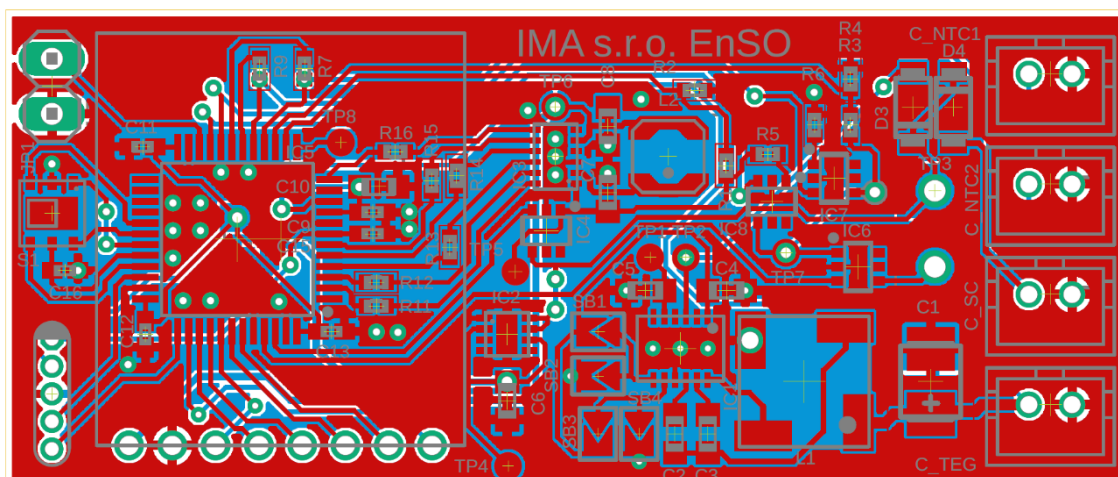


Obr. II-4 Zapojení displeje

III. Plošné spoje senzoru

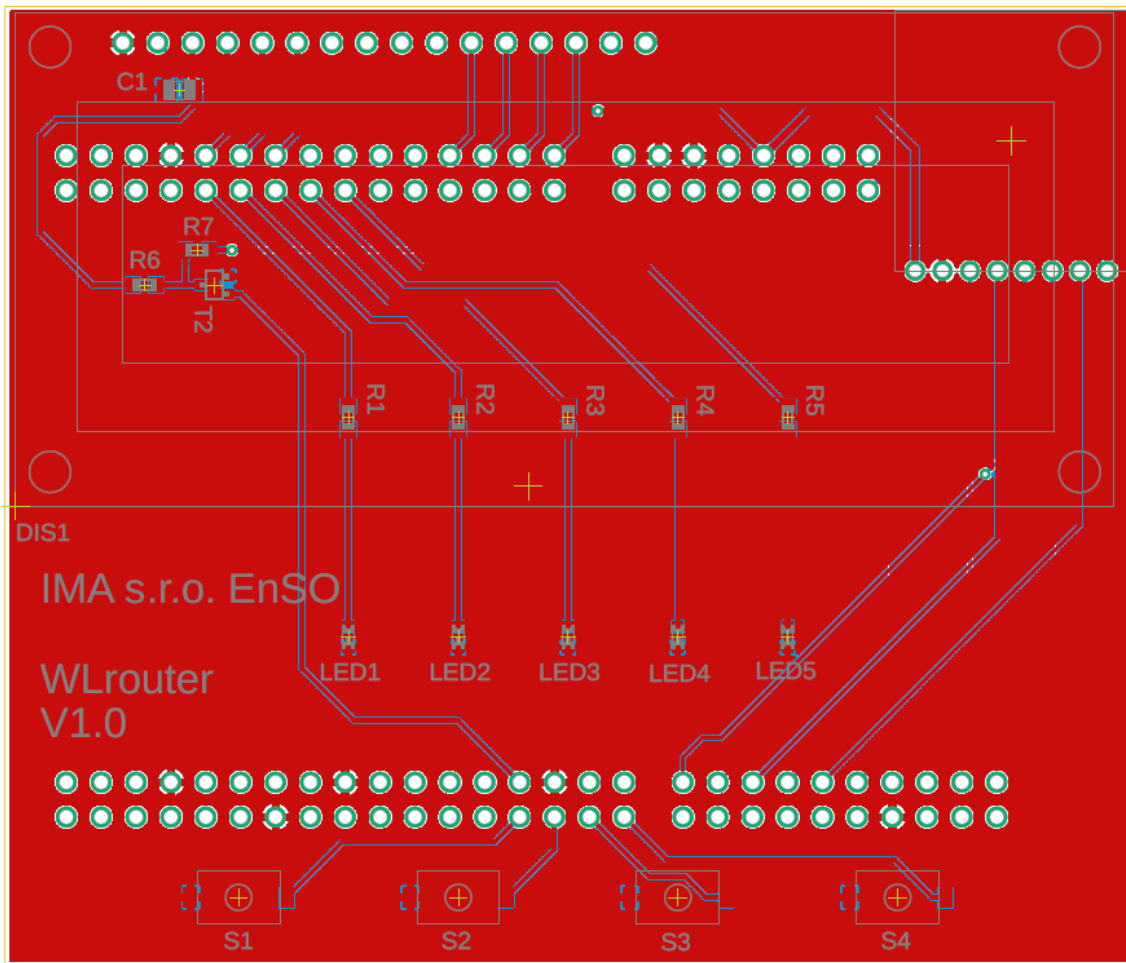


Obr. III-1 První revize senzoru



Obr. III-2 Druhá revize senzoru

IV. Plošné spoje sběrného bodu



Obr. IV-1 Rozšiřující deska sběrného bodu