

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

Návrh bezdrátového senzorového uzlu s možností
napájení pomocí energie z okolí

Design of a Wireless Sensor Node with the Possibility of
Powering by Energy from its Environment

Bakalářská práce

Autor práce: Alexandr Gregor

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gregor** Jméno: **Alexandr** Osobní číslo: **492057**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh bezdrátového senzorového uzlu s možností napájení pomocí energie z okolí

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a Wireless Sensor Node With the Possibility of Powering by Energy from its Environment

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou komunikačních rozhraní, která se využívají pro účely sběru senzorových dat z okolního prostředí [1, 2]. Prostudujte principy, které se využívají pro napájení autonomních systémů s využitím energie z okolí [2, 3].
2. Na základu získaných poznatků navrhnete zařízení pro automatizovaný sběr a ukládání senzorových dat a jejich odeslání do centrální jednotky s využitím vybraného alternativního zdroje energie pro napájení. Provedte dlouhodobou charakterizaci tohoto zdroje energie a navrhnete optimální způsob pracovního režimu senzorového uzlu a ukládání energie.
3. Sestavte testovací pracoviště a ověřte funkčnost vašeho řešení. Vše kriticky zhodnoťte a navrhnete případná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Garlík, B.: Inteligentní budovy, BEN - technická literatura, Praha 2012, ISBN 978-80-7300-440-8
- [2] Hac, A.: Wireless sensor network design, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, ISBN 0-470-86736-1
- [3] Labouret, A., Villoz, M.: Solar Photovoltaic Energy (Let Renewable Energy), The Institution of Engineering and Technology, UK, 2010, 4th edition, ISBN: 978-1-84919-154-8
- [4] HUSÁK, M.: Mikrogenerátory elektrické energie s termoelektrickým principem, DPS – Elektronika od A do Z, 2014, vol.2, p. 4.-11., ISSN: 1805-5044
- [5] Matoušek, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR AT mega 16, 4. díl, Praha 2006, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-174-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.01.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

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

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne 20.5.2022

Alexandr Gregor

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů.....	9
Abstrakt.....	10
1 Úvod.....	11
2 Cíle práce.....	11
1 Teoretický rozbor.....	12
1.1 Komunikační rozhraní.....	12
1.2 Drátové.....	12
1.2.1 I2C.....	12
1.2.2 SPI.....	12
1.2.3 OneWire.....	12
1.3 Bezdrátové.....	13
1.3.1 LoRa.....	13
1.3.2 Sigfox.....	15
1.3.3 DASH7.....	15
1.3.4 Bluetooth Low Energy – BLE.....	15
1.4 Získávání energie z okolí „Energy Harvesting“.....	16
1.4.1 Solární energie.....	16
1.4.2 Tepelná energie.....	18
1.4.3 Kinetická energie.....	18
1.5 Použité obvody.....	19
1.5.1 STM32L031.....	19
1.5.2 Ai-Thinker RA-02.....	20
1.5.3 Texas Instruments TPS7A03.....	20
1.5.4 Senzory prostředí.....	20
2 Návrh zařízení.....	21
2.1 Návrh zapojení sensorového uzlu.....	21
2.2 Konstrukční provedení uzlu.....	22
2.3 Program sensorového uzlu.....	24
2.4 Sběrný bod.....	26
3 Testování a měření.....	27
3.1 Určení spotřeby uzlu.....	27
3.2 Test dosahu.....	28
3.3 Integrace do stávajícího systému Home Assistant.....	28
3.4 Měření intenzity osvětlení v místech následného nasazení sensorového uzlu.....	30

3.5	Výběr solárního panelu	31
3.5.1	Charakterizace solárního panelu Panasonic AM-5904.....	32
	Možná vylepšení.....	33
4	Závěr.....	33
5	Citovaná literatura.....	34
	Seznam tištěných příloh	36

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZKRATKA	VÝZNAM
AAA	Označení velikosti válcového článku (průměr 10,5mm a délka 44,5 mm)
AČ	Analogově-digitální
BLE	Bluetooth Low Energy
BW	Šířka pásma (z ang. Bandwidth)
CR	Kódová rychlost (z ang. Coding rate)
CRC	Cyklický redundantní součet (z ang. Cyclic redundancy check)
CSS	Metoda rozprostření spektra (z ang. Chirp Spread Spectrum)
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Druh paměti (z ang. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
FFT	Rychlá Fourierova transformace (z ang. Fast Fourier transform)
FHSS	Metoda rozprostření spektra skoky (z ang. Frequency-Hopping Spread Spectrum)
FSK	Klíčování frekvenčním posuvem (z ang. Frequency-shift keying)
GFSK	Druh FSK (z ang. Gaussian frequency-shift keying)
GPIO	Univerzální vstupní/výstupní pin (z ang. General-purpose input/output)
HA	Home Assistant
HAL	Hardwarová abstraktní vrstva (z ang. Hardware Abstraction Layer)
I2C	Sériová sběrnice (z ang. Inter Integrated Circuit)
LDO	Regulátor s nízkým úbytkem (z ang. Low Dropout Regulator)
LoRa	Komunikační metoda s dlouhým dosahem (z ang. Long Range)
MCU	Jednočipový počítač (z ang. Microcontroller unit)
MISO	Výstup dat z podřízeného obvodu (z ang. Master Input, Slave Output)
MOSI	Vstup dat do podřízeného obvodu (z ang. Master Output, Slave Input)
MQTT	Síťový komunikační protokol pracující na vrstvě TCP/IP
NI-MH	Nikl-metal hydridový
OOK	bipolární modulace (z ang. On-Off Keying)
PN	Přechod polovodiče typu P a typu N
RAM	Paměť s přímým přístupem (z ang. Random Access Memory)
RC	Článek složený z rezistoru a kondenzátoru
RFID	Identifikace na rádiové frekvenci (z ang. Radio Frequency Identification)
RTC	Hodiny reálného času (z ang. Real-time clock)
SCK	Hodinový signál rozhraní SPI (z ang. Serial clock)
SCL	Hodinový signál rozhraní I2C (z ang. Serial clock)
SD	Paměťová karta (z ang. Secure Digital)
SDA	Datový signál rozhraní I2C (z ang. Serial data)
SF	koeficient rozprostření (z ang. spreading factor)
SPI	Sériové periferní rozhraní (z ang. Serial Peripheral Interface)
TCP/IP	Protokol pro řízení přenosu v počítačových sítích
USART	Synchronní/asynchronní sériové rozhraní (z ang. Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter)
Wi-Fi	Standard pro bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem bezdrátového sensorového uzlu pro sběr dat uvnitř fóliovníků a skleníků, s možností využít energie z okolního prostředí pro prodloužení životnosti zařízení. Je popsáno, jakými způsoby lze energii z prostředí získávat a pomocí jakých přenosových rozhraní lze naměřené údaje přenášet. Součástí je také charakterizace množství slunečního záření uvnitř pěstitelského objektu v období s nejkratší dobou slunečního svitu, jejíž výsledky byly využity pro návrh sensorového uzlu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Senzorový uzel, LoRa, získávání energie z okolí, přenosová rozhraní, sběr meteorologických dat

ABSTRACT

Goal of this thesis is to design a wireless sensor node for data collection inside greenhouses, with the possibility of using energy from its environment to extend the lifetime of the sensor node. Description of ways to harvest energy from environment and how to transmit collected data is given as well. Included is also a characterization of the amount of solar radiation inside the greenhouse during season with the smallest amount of sunshine, the results of which were used to design the sensor node.

KEYWORDS

Sensor node, LoRa, energy harvesting, communication interface, collection of meteorological data

1 ÚVOD

Cílem této práce je vytvoření systému pro sběr údajů o teplotách a vlhkostech uvnitř fóliovníků i skleníků využívající energii z okolí pro své napájení, který bude možné integrovat do systému Home Assistant využívaném pro monitoring, vizualizaci a ukládání dat. Motivací pro vznik této práce je nahrazení vysluhujících senzorů využívajících komunikace pomocí rozhraní Wi-Fi, závislých na napájení z rozvodové sítě.

Zahrnut je základní přehled způsobů získávání energie z okolního prostředí a popis komunikačních rozhraní jak drátových, tak bezdrátových s hlubším popisem modulační technologie LoRa. Na teoretický rozbor navazuje popis použitých obvodů, návrh zapojení sensorového uzlu, konstrukční provedení a popis metody, jakou je nakládáno se získanou energií ze slunečního záření. Následuje měření spotřeby uzlu společně s charakterizací použitého solárního panelu a měření množství dostupné sluneční energie provedené v rámci semestrálního projektu. Na závěr jsou uvedeny i případné náměty pro vylepšení sensorového uzlu.

2 CÍLE PRÁCE

Cíle mé práce jsou:

- 1) Návrh sensorového uzlu pro bezdrátové odesílání dat do centrální jednotky
- 2) Provedení dlouhodobé charakterizace dostupné energie z okolí sensorového uzlu
- 3) Realizace napájení s využitím energie z okolí sensorového uzlu
- 4) Vývoj firmware pro optimalizaci energetické spotřeby sensorového uzlu a pro začlenění změřených dat do stávajícího systému pro vyhodnocení

1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 KOMUNIKAČNÍ ROZHRAŇÍ

Rozhraní se označuje zařízení zajišťující komunikaci a přenos dat mezi jinými zařízeními, lze je dělit na rozhraní využívající drátová nebo bezdrátová přenosová média. Drátová média jsou specifická tím, že přenášený signál prochází pouze skrze ně (tzv. jej vedou) a až na nežádoucí vyzářování, které se snažíme maximálně omezit, je signál neopouští. Naproti tomu bezdrátová média předpokládají šíření signálu ve formě elektromagnetických vln otevřeným prostorem ve všech směrech či jen v určitém konkrétním směru. [1]

1.2 DRÁTOVÉ

1.2.1 I2C

Inter Integrated Circuit je sběrnice vyvinutá firmou Philips sloužící k propojení čipů spotřební elektroniky. Jedná se o sběrnici typu multimaster, tedy na jedné sběrnici může být jedno nebo více nadřazených (master) zařízení a jedno nebo více podřízených (slave). Každé zařízení na sběrnici má svou vlastní adresu a pro přenos je využito dvojice vodičů SDA (serial data) a SCL (serial clock) se společnou zemí. Z elektrického hlediska je zapojení obou vodičů typu otevřený kolektor. Jejich maximální délka a počet zařízení na sběrnici je dáno nejvyšší přípustnou kapacitou 400 pF. [2]

1.2.2 SPI

Sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface) byla vyvinuta firmou Motorola jako rozhraní pro rychlou komunikaci mezi čipy v rámci jednoho zařízení. Umožňuje synchronní sériovou komunikaci obvykle mezi mikrokontrolérem a periferními obvody (některé AČ převodníky, EEPROM, FLASH... paměti). Komunikaci řídí takzvaný master a podřízená zařízení se označují jako slave.

Pro přenos dat je zapotřebí trojice vodičů, dva datové MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out) a jeden hodinový SCK (Serial Clock). Navíc každý slave obvod potřebuje vlastní CS (Chip Select) vodič, který určuje, zda probíhající komunikace je určena jemu. Samozřejmostí je společná zem, vůči které jsou vztaženy veškeré signály. Přenos zahajuje master nastavením logické 0 na CS pinu obvodu, se kterým chce komunikovat, poté zároveň pod taktem SCK dochází k sériovému přenosu dat po vodičích MOSI a MISO. [2]

1.2.3 OneWire

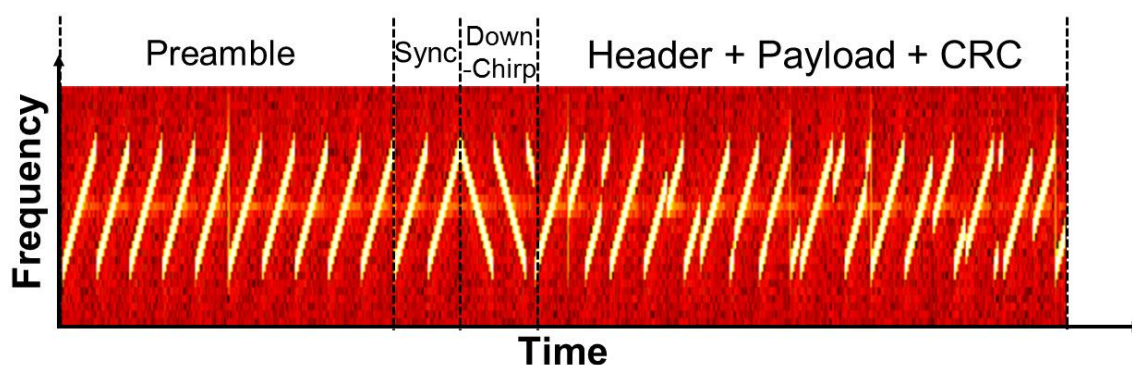
Komunikační rozhraní firmy Maxim, určené pro komunikaci s pomalejšími zařízeními, kterými mohou být například digitální teploměry či identifikační čipy. Rozhraní řídí jeden master a mohou být připojeny až stovky slave zařízení, kde každé má vlastní 64bitové identifikační číslo. Komunikace probíhá pouze pomocí jednoho datového vodiče a zemi, jedná se o asynchronní komunikaci, tedy není přítomen hodinový signál. Připojená zařízení mohou být napájena přímo z datového vodiče, kde napájení v době logické 0 je zajištěno vyrovnávacím kapacitorem (800 pF) integrovaným v každém slave zařízení. [2]

1.3 BEZDRÁTOVÉ

1.3.1 LoRa

LoRa je proprietární komunikační schéma vyvinuté firmou Semtech využívající modulace Chirp Spread Spectrum (CSS), kde přenášená informace je modulována na pilovitě rozmítaný nosný signál v rozmezí šířky pásma. Frekvence může lineárně narůstat, označováno jako upchirp, nebo lineárně klesat-downchirp.

Na obr. 1 je zobrazen záznam LoRa paketu, jako první je vyslána série shodných opakujících se nemodulovaných symbolů upchirp označovaná jako preamble, sloužící k synchronizaci přijímače s příchozími daty. Následují 2 modulované symboly využitelné k odlišení různých sítí (například hodnota 0x34 [3] je vyhrazena pro síť LoRaWAN, označováno jako synchronizační slovo), a 2,25 nemodulovaných symbolů downchirp označující počátek dat. Samotná data jsou modulovaná na signály upchirp, kde se každý symbol odlišuje počáteční frekvencí, na které začíná rozmítání. Po dosažení nejvyšší možné frekvence se pokračuje od nejnižší tak, aby symbol skončil na frekvenci, ve které začínal. Shodně je modulováno i synchronizační slovo. [4] [5]



Obr. 1: Struktura LoRa paketu, převzato z [5]

Strmost změny frekvence je ovlivňována dvojicí parametrů, a to koeficientem rozprostření (SF spreading factor) a šířkou pásma (BW bandwidth). Výslednou dobu trvání symbolu lze poté popsat rovnicí (1.1). Počet bitů, které je schopen jeden symbol reprezentovat, je roven hodnotě koeficientu rozprostření. [6] Kombinace těchto parametrů ovlivňuje výslednou citlivost přijímače, viz tab. 1, ukazující citlivost v dBm konkrétního přijímače SX1278 využitého v této práci. Zvýšení SF vede k navýšení citlivosti, naopak rozšíření šířky pásma citlivost snižuje.

$$t_{symbol} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (1.1)$$

Tab. 1: Citlivost přijímače SX1278 (dBm) [3]

$BW \setminus SF$	7	8	9	10	11	12
125 kHz	-125	-128	-131	-134	-136	-137
250 kHz	-122	-125	-128	-131	-133	-134
500 kHz	-118	-121	-124	-127	-129	-130

Pro přenos hlavičky a následných dat je dalším důležitým parametrem kódová rychlost (CR coding rate) určující schopnost opravy chyb. Je udávána ve formátu 4/x, kde ke každým 4 bitům

informace je přidáno $x-4$ redundantních bitů pro případnou opravu chyb. Hlavička obsahuje informace o délce dat, kódové rychlosti dat a zda je na konci obsažen 16bitový cyklický redundantní součet (CRC). Hlavička má vždy kódovací rychlost 4/8 a je zakončena svým vlastním CRC. Pro případy, kdy jsou parametry dat a kódování předem známy, je možné zkrátit dobu vysílání vynecháním hlavičky (označováno jako implicitní režim). Užitečnou přenosovou rychlost je poté možno získat dosazením popsanych parametrů do rovnice (1.2).

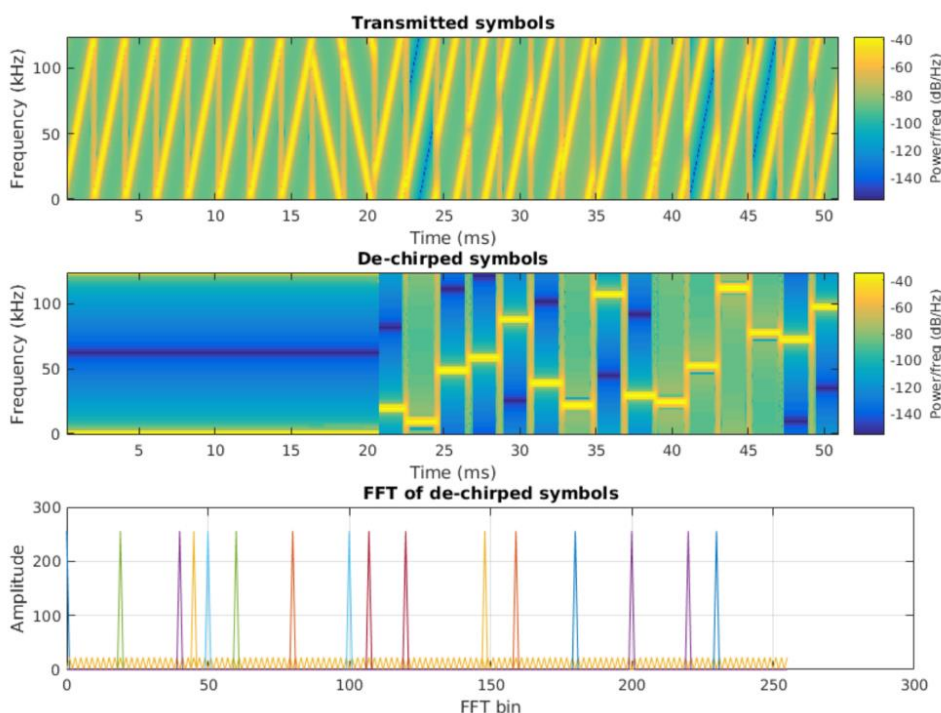
$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR \text{ bit/s} \quad (1.2)$$

V tab. 2 Chyba! Chybný odkaz na záložku. je uveden soupis velikostí jednotlivých částí LoRa paketu, výsledná délka hlavičky a dat vyjádřená v počtu vyslaných symbolů je závislá na volbě SF a CR, vyšší hodnota SF znamená menší počet potřebných symbolů, naopak vyšší poměr CR počet symbolů zvyšuje. V tab. 3. je poté uveden soupis možných hodnot výše popsanych parametrů podporovaných obvodu od firmy Semtech. [7]

Tab. 2: Struktura LoRa paketu

Preamble	Synchronizační slovo	Downchirp	Hlavička	CRC hlavičky	Data	CRC dat
6-65535 symbolů	2 symboly	2,25 symbolu	Možno vynechat 0-3 bajty		0-255 bajtů	0-2 bajty

Demodulace LoRa signálu je naznačena na obr. 2. Přijatý signál je nejdříve vynásoben s lokálně generovaným signálem downchirp stejných parametrů jako přijímaný, tím signál přejde na podobu „De-chirped symbols,“ následnou aplikací FFT lze jednoduše získat hodnotu, kterou daný symbol reprezentoval. V případě, že se fáze příchozího a místního pomocného signálu neshodují, dojde k posunu jednotlivých indexů získaných z FFT. Ke korekci tohoto posunu lze využít povinné preamble, která by měla odpovídat nulovému indexu FFT. [8]



Obr. 2: Demodulace LoRa pomocí FFT, převzato z [8]

Tab. 3: Možné hodnoty hlavních parametrů [3]

<i>Parametr</i>	<i>Možné hodnoty</i>
<i>SF – Koefficient rozprostření</i>	6, 7 , 8, 9, 10, 11, 12
<i>BW – Šířka pásma (kHz)</i>	7,8; 10,4; 15,6; 20,8; 31,2; 41,7; 62,5; 125 ; 250; 500
<i>CR – Kódovací rychlost</i>	4/5 , 4/6, 4/7, 4/8
<i>Synchronizační slovo</i>	0x00 až 0xFF, výchozí 0x12 , LoRaWAN 0x34

Tučně zvýrazněné hodnoty jsou výchozím nastavením většiny obvodů firmy Semtech

Hlavními přednostmi LoRa modulace je odolnost vůči vícecestnému šíření, vlivu Dopplerova jevu či úzkopásmovému rušení. Dále využití lineárně rozmítaných nosných signálů snižuje nároky na přesnost oscilátorů a navíc vzájemná ortogonalita různých koeficientů rozprostření umožňuje dekódovat několik různých signálů ve shodném kanále. [6]

LoRu je možné v ČR provozovat na volných kmitočtech 433,05–434,79 MHz a 863,0–870,0 MHz.

1.3.2 Sigfox

Jedná se o technologii vyvinutou francouzskou firmou Sigfox pracující ve volném frekvenčním pásmu 868 MHz se 400 kanály se šířkou pouze 100 Hz. Každé koncové zařízení v této komunikační síti je omezeno na 140 zpráv za den o maximální velikosti 12 bajtů s rychlostí až 100 bit/s. Dosah slibovaný poskytovatelem se pohybuje v rozmezí 30–50 km ve volném prostoru a 3–10 km uvnitř zástavby. [7]

1.3.3 DASH7

Jeden z dalších protokolů využívající nelicencovaná pásma 433 MHz, 868 MHz a 915 MHz. Je určen především pro tvorbu soukromých sítí senzorů či aktuátorů, s maximálním dosahem kolem 2 km a vychází ze standardu ISO 18000-7 pro RFID systémy. Veškeré specifikace a parametry jsou volně dostupné bez jakýchkoliv licenčních požadavků. [7]

1.3.4 Bluetooth Low Energy – BLE

BLE je určeno pro aplikace s důrazem na nízkou spotřebu a malé objemy přenášených dat. Stejně jako Bluetooth pracuje ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz, ale využívá 40 kanálů se šířkou 2 MHz oproti 79 kanálům se šířkou 1 MHz u „klasického“ Bluetooth. Vzhledem k tomu, že pásmo 2,4 GHz je silně rušeno, využívá se metody rozprostření spektra FHSS, kdy dochází k rychlým skokům mezi dostupnými kanály. Samotná data jsou modulována pomocí GFSK, jedná se o modulaci využívající frekvenčního posuvu, kde binární data jsou reprezentována dvojicí diskrétních frekvencí v daném kanále. V případě FSK dochází ke změně frekvence skokově, ale v případě GFSK je změna frekvence pozvolná což má za následek zúžení postranních pásem ve spektru. BLE je schopno přenášet data rychlostmi 125 Kb/s až 2 Mb/s na vzdálenosti maximálně desítek metrů. [9] [10]

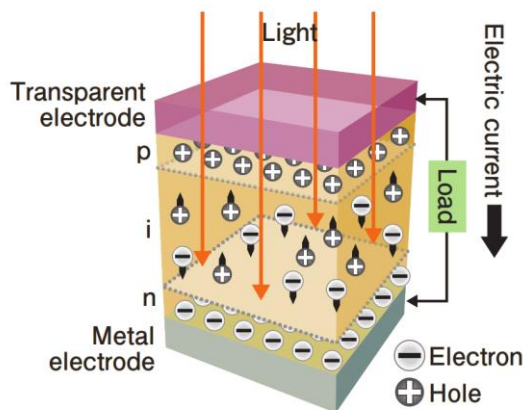
1.4 ZÍSKÁVÁNÍ ENERGIE Z OKOLÍ „ENERGY HARVESTING“

Pojmem „Energy Harvesting“ se obvykle označují zařízení, která přeměňují volně dostupnou energii z prostředí do využitelné podoby, většinou elektrické energie. Pro účely napájení malých zařízení lze využít obvyklých zdrojů jako je sluneční záření, pohyby vod či vzduchu, ale i méně obvyklé, například vibrace, akustické vlny, chemické a biologické procesy, elektromagnetický smog a mnoho dalších. [11] Vzhledem k tomu, že navrhovaný sensorový uzel bude umístěn uvnitř pěstitelských objektů (skleníky, fóliovníky), jeví se jako nejvhodnější využití slunečního záření.

1.4.1 Solární energie

Pro přeměnu solární energie na elektrickou energii se využívá fotovoltaických článků, sestávajících se z PN přechodu, na kterém díky fotovoltaickému jevu dochází při dopadu fotonů s dostatečnou energií k uvolňování elektronů, které se hromadí v N vrstvě a zároveň se vzniklé díry hromadí ve vrstvě P. Ne vždy je obyčejný PN přechod nejvhodnější, například u amorfních křemíkových článků je přidána mezi P a N vrstvu ještě vrstva nedotovaného křemíku. Vzniká tak přechod PIN, kde k tvorbě párů elektron-díra dochází v prostřední vrstvě viz obr. 3. Aby byl foton schopen uvolnit elektron z valenční vrstvy a zanechal tak pár elektron-díra, je zapotřebí, aby měl dostatečnou energii. Například pro krystalické křemíkové články je nutné, aby foton měl energii alespoň 1,1 eV a pro amorfni křemíkový článek alespoň 1,77 eV. Pomocí rovnice (1.3) lze určit minimální vlnovou délku těchto fotonů, pro články krystalické 1 130 nm a pro amorfni 700 nm. [12]

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \text{ lze upravit na } E(\text{eV}) = \frac{1,24}{\lambda} (\text{nm}) \quad (1.3)$$



Obr. 3: Fotovoltaický efekt, převzato z [13]

Monokrystalický článek

Jeho výroba začíná obdobně jako výroba většiny polovodičů, a to výrobou čistého monokrystalu křemíku pomocí Czochralského metody kdy je z taveniny polykrystalického křemíku pomocí monokrystalického zárodka postupným otáčením a tažením vytvořen velký monokrystalický válec. Ten je následně rozřezán na tenké články 0,2 – 0,3 mm a dotováním je vytvořen přechod PN. Nevýhodou těchto článků je náročnost výroby, ale stále patří k nejpoužívanějšímu typu. Dosahovaná účinnost přeměny solární energie na elektrickou se pohybuje v rozmezí 15-18 %. [12] [14]

Polykrystalický článek

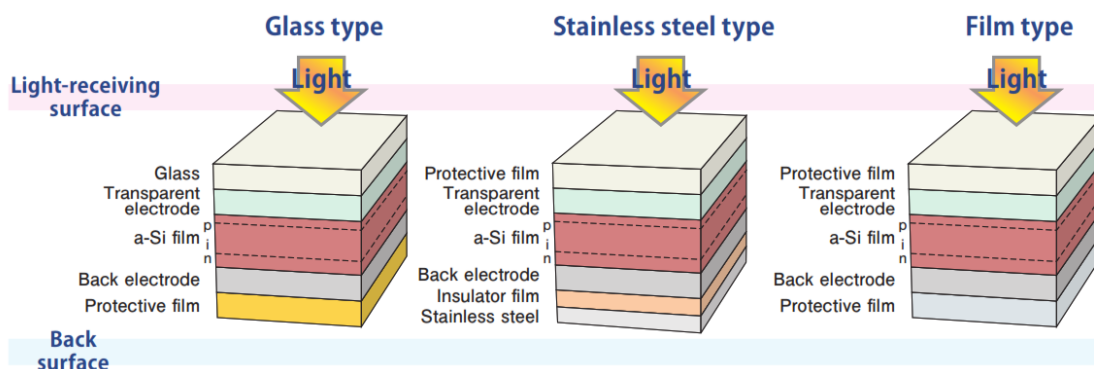
Na rozdíl od monokrystalického článku je vyráběn odléváním taveniny křemíku do forem a pomocí řízeného chladnutí je dosaženo odsunu nečistot na okraj. Vzniklý odlitek se sestává z náhodně orientovaných monokrystalů různých velikostí řádově, milimetry až centimetr, viditelné na obr. 4 vlevo. Výhodou těchto článků je snazší výroba, ale nedosahují takové účinnosti jako monokrystalické. Účinnost polykrystalických se pohybuje v rozmezí 13-16 %. [12] [14]



Obr. 4: Polykrystalický (vlevo) a monokrystalický článek

Amorfní křemíkové články

Výroba těchto článků je odlišná od předchozích zmiňovaných. Vznikají nanášením vhodných vrstev na podkladový materiál, kterým může být sklo, plast či kov, viz obr. 5. Jednotlivé vrstvy se nanášejí napařováním v ochranné atmosféře, díky tomu je zapotřebí menšího množství materiálu. Tloušťky jednotlivých vrstev jsou v řádu μm , což umožňuje vytvářet i články schopné ohybu. Nevýhodou těchto článků je menší účinnost pohybující se kolem 5-7 %. [12] [13] [14]



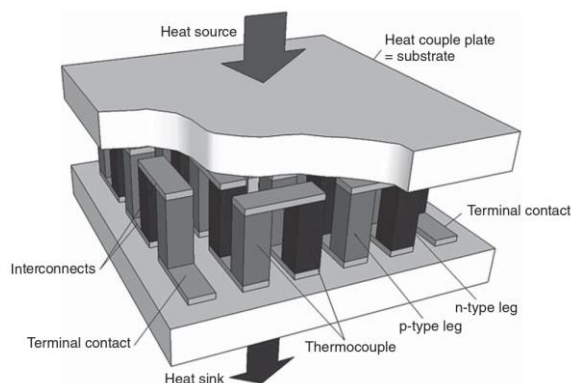
Obr. 5: Ukázka vrstvení amorfních článků a možných podkladových materiálů, převzato z [13]

1.4.2 Tepelná energie

Přebytečnou tepelnou energii, v případě dostatečného tepelného rozdílu, lze přeměnit na energii elektrickou za pomoci termoelektrického článku, se kterým se pojí tři jevy: Thomsonův, Seebeckův a Peltierův. Seebeckův jev říká, že jsou-li spojeny dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a mají-li spoje různou teplotu, protéká obvodem elektrický proud. Opakem je Peltierův jev, tedy protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje Seebeckovým obvodem, pak vzniká teplotní rozdíl mezi oběma spoji. Poslední, Thomsonův jev, nepotřebuje spojení dvou různých materiálů, ale stačí pouze teplotní gradient na jednom vodiči. Na jeho koncích pak lze naměřit nepatrné napětí.

Termoelektrické články využívají spojení N a P polovodičů uspořádaných do série, jak je naznačeno na obr. 6. výsledné napětí na prázdko lze určit podle rovnice (1.4), kde n odpovídá počtu termočlánků, α_p, α_n jsou Seebeckovy koeficienty jednotlivých materiálů a ΔT rozdíl teplot. Maximálního výkonu lze dosáhnout, pokud odpor zátěže odpovídá vnitřnímu odporu generátoru. [11]

$$V_{oc} = n \cdot (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T \quad (1.4)$$



Obr. 6: Termoelektrický generátor, převzato z [11]

1.4.3 Kinetická energie

Pro získávání energie z vibrací se nabízejí tři technologie pro jejich přeměnu na elektrickou energii: piezoelektrické, elektromagnetické a elektrostatické generátory. Zdrojem vibrací mohou být průmyslové stroje, doprava ale i pohyb lidského těla. Z těchto zdrojů lze získat výkony až do jednotek mW.

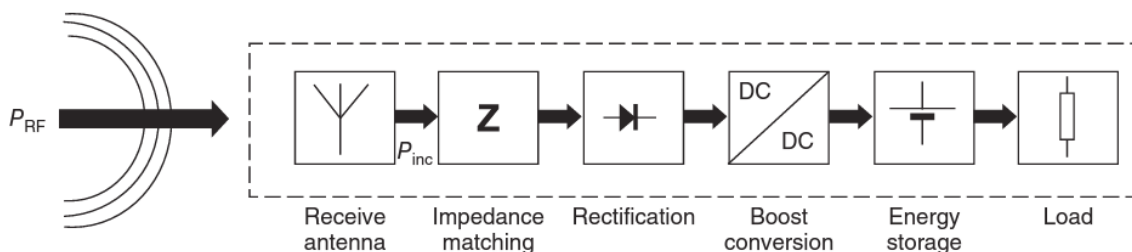
Piezoelektrické generátory je nutné přímo mechanicky namáhat, generují malé proudy při vysokých napětích na základě piezoelektrického jevu.

Elektromagnetické generátory se obvykle sestávají z magnetu umístěném na pružném závěsu a cívky, ve které dochází k indukci napětí.

Elektrostatické generátory fungují na principu změny kapacity kondenzátoru, kde jedna z elektrod je umístěna na pružném závěsu a mění svou vzdálenost vůči druhé, pevně umístěné elektrodě, obdobně jako piezoelektrické generátory generují vyšší napětí ale při malých proudech. [15]

Energie z elektromagnetického pole

Jednou z dalších možností získávání energie z prostředí je využití vyzařované energie z bezdrátových komunikačních technologií. Zařízení získávající energii se obvykle sestává z přijímací antény následované přizpůsobovacím obvodem a usměrňovačem, který následuje DC/DC měnič pro nabíjení baterie nebo kondenzátoru pro následné využití, viz obr. 7.



Obr. 7: Blokové schéma napájení pomocí RF energie, převzato z [11]

1.5 POUŽITÉ OBVODY

1.5.1 STM32L031

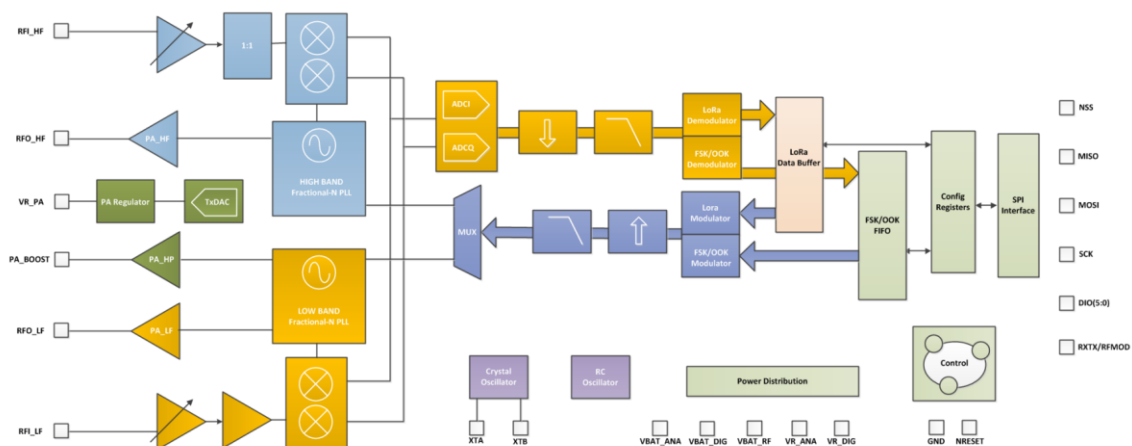
Na obsluhu radiového modulu a vyhodnocování dat ze senzorů byl zvolen mikrokontrolér od STMicroelectronic z řady STM32L0 určené pro aplikace s nízkou spotřebou. Konkrétně mikrokontrolér STM32L031 obsahující jádro architektury ARM Cortex-M0+, 32 KB paměti FLASH, 8 KB paměti RAM a 1KB paměti EEPROM. Dále je k dispozici pětice komunikačních rozhraní (USART, UART, 2x SPI, I2C), 12bitový AD převodník, dvojice napěťových komparátorů nebo RTC nezávislý na běhu jádra. Jako zdroj hodin lze využít vnitřních RC oscilátorů nebo externí krystalový oscilátor, jak pro jádro, tak obvody RTC.

Vzhledem k tomu že mikrokontrolér je určen pro aplikace s nízkou spotřebou, nabízí hned několik režimů provozu s nižší spotřebou:

- *Sleep mode* – Pouze jádro je uspáno a periferie pokračují v činnosti. K probuzení jádra lze využít přerušení od periférií.
- *Low-power run mode* – Jádro je taktováno pomocí vnitřního RC oscilátoru maximálně na frekvenci 131 kHz. Vnitřní napěťový regulátor je přepnut do režimu nízkého výkonu, čímž dojde k omezení dostupnosti některých periférií.
- *Low-power sleep mode* – obdobný sleep módu, kde vnitřní regulátor je přepnut do režimu nízkého výkonu.
- *Stop mode with RTC* – Jádro je deaktivováno, většina oscilátorů vypnuta, kromě oscilátoru pro RTC. Dochází však k uchování obsahu paměti RAM, stavu registrů a reálného času. K probuzení lze využít kterýkoliv GPIO pin, RTC, USART/I2C/LPUART/LPTIMER či napěťový komparátor. Spotřeba v tomto režimu je $0,68 \mu\text{A}$.
- *Stop mode without RTC* – Obdoba výše zmíněného režimu s deaktivovaným RTC, spotřeba $0,38 \mu\text{A}$.
- *Standby mode* – Režim s nejnižší spotřebou, nedochází k uchování obsahu paměti RAM, ani většiny registrů. Probuzení je možné pomocí několika vyhrazených GPIO, případně RTC, pokud je aktivováno. Spotřeba v případě neaktivního RTC činí $0,23 \mu\text{A}$. [16]

1.5.2 Ai-Thinker RA-02

Pro komunikaci bylo využito LoRa modulu od společnosti Ai-Thinker využívajícího transceiver SX1278 od společnosti SEMTECH. Je schopen pracovat v rozmezí 410-525 MHz a podporuje modulace FSK, OOK a LoRa. Může pracovat jako přijímač s citlivostí až -148 dBm nebo jako vysílač s maximálním výkonem až 18 dBm. Komunikace s modulem probíhá pomocí rozhraní SPI, je schopen pracovat v rozsahu napájecího napětí 2,5-3,7 V a při vysílání odebírat až 120 mA. [17]



Obr. 8: Blokové schéma sx1278, převzato z [3]

Zjednodušené blokové schéma je znázorněno na obr. 8. Je-li obvod v režimu příjmu, je signál přicházející na vstupní pin RFI_LF zesílen pomocí nízkošumového zesilovače, poté pomocí směšovače převeden na fázovou a kvadraturní složku na mezifrekvenci, která je následně navzorkována pomocí AČ převodníku. Následné zpracování a demodulace pak probíhá již zcela digitálně.

V režimu vysílání, je digitálně řízen blok s fázovým závěsem, jehož výstup je přiveden do jednoho ze RF zesilovačů (PA_LF, PA_HP). Světle modré bloky (_HF) určené pro zpracování signálů od frekvence 779 MHz nejsou v této variantě obvodu SX1278 aktivní. [3]

1.5.3 Texas Instruments TPS7A03

Pro regulaci napájení byl zvolen lineární regulátor s nízkým úbytkem napětí (LDO), kde hlavním požadavkem byl nízký klidový proud. Zvolen byl regulátor řady TPS7A03 od firmy Texas Instruments, konkrétně TPS7A0333DBVR, s výstupním napětím 3,3 V, klidovým proudem 200 nA a úbytkem napětí 270 mV, schopný pracovat se vstupním napětím až 6 V a do zátěže dodat proud 200 mA. [18]

1.5.4 Senzory prostředí

Pro sběr informací o intenzitě osvětlení byl použit senzor LTR-329ALS-01 od firmy Liteon, obsahující dvojici fotodiód, jednu pro infračervené a druhou pro viditelné spektrum. Senzor je schopen zpracovat intenzitu osvětlení až do 64 000 lx, komunikuje pomocí I2C rozhraní a odběr v aktivním režimu se pohybuje kolem 250 μ A. [19]

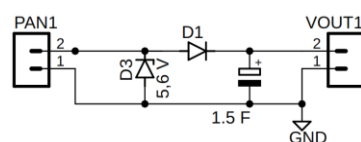
Jako senzor meteorologických dat slouží obvod HS3004 od firmy Renesas, obsahující senzory teploty s přesností $\pm 0,3$ °C a relativní vlhkosti s přesností $\pm 3,5$ %. Komunikace probíhá opět pomocí rozhraní I2C a senzor je vnitřně kompenzován již od výroby. Není tedy nutná žádná další úprava vyčítaných dat. Výrobce udává průměrný odběr 25 μ A při jednom měření s maximálním rozlišením za dobu jedné sekundy, kdy samotné měření trvá 17 ms. [20]

2 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

2.1 NÁVRH ZAPOJENÍ SENZOROVÉHO UZLU

Vzhledem k tomu, že zařízení využívá energie získané ze solárního panelu a musí být schopno periodického snímání a přenosu meteorologických údajů ve stanoveném rozmezí intervalů. Byly realizovány dvě varianty pro ukládání energie, a to do trojice Ni-MH článků velikosti AAA, zapojených v sérii a superkondenzátoru.

Díky tomu, že Ni-MH lze dlouhodobě udržovat maximálně proudem odpovídajícím 0,025C [21] [22], lze část obstarávající nabíjení baterie ze solárního článku při dodržení podmínky, že maximální proud, který je schopen solární článek generovat nepřekročí 0,025C, realizovat jednoduchým obvodem sestávajícím se pouze z diody zabraňující případnému zpětnému odběru. V případě nabíjení superkondenzátoru je zapotřebí nepřekročit nejvyšší přípustné napětí na které je konstruován. Schéma nabíjecího obvodu pro superkondenzátor je uvedeno na obr. 9.



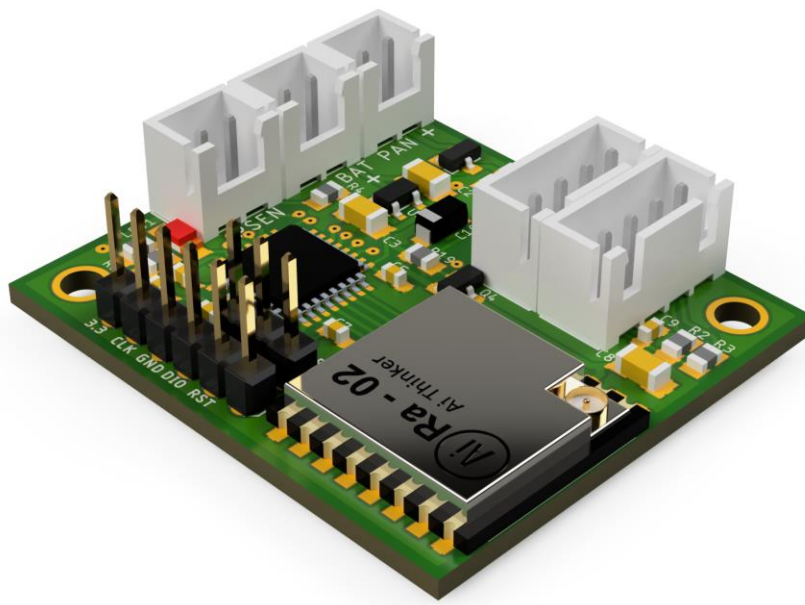
Obr. 9: Obvod pro omezení napětí na superkondenzátoru

Napětí na baterii/supercapacitoru lze monitorovat pomocí děliče R15/R16 doplněného o kondenzátor C7 kompenzující vysokou impedanci samotného děliče [23, s. 48]. Kompletní schéma uzlu je uvedeno v příloze I. *Schéma zapojení.*

Pro regulaci napětí baterie na vhodné pro napájení mikrokontroléru, senzorů a rádiového modulu byl použit lineární regulátor TPS7A0333DBVR popsany v kapitole 1.5.3. Jedná se o variantu v pouzdře SOT-23-5. Napájení rádiového modulu RA-02, popsaného v kapitole 1.5.2 je vzhledem k nutnosti minimalizovat spotřebu v režimu spánku spínáno pomocí tranzistoru Q4 ovládaného mikrokontrolérem. Rádiový modul je tedy napájen pouze tehdy, pokud dochází k vysílání. To samé platí i pro napájení senzorů, ty jsou ale napájeny přímo z jednoho z výstupních pinů mikrokontroléru.

Řízení celého uzlu obstarává mikrokontrolér STM32L031K6T6TR, kap. 1.5.1, v pouzdře LQFP32. Mikrokontrolér je jako jediný nepřetržitě napájen, taktován je vnitřním RC oscilátorem nastaveným na frekvenci 4 MHz. Ale v případě, že je mikrokontrolér v režimu STOP, je tento oscilátor neaktivní a běží pouze RC oscilátor pro RTC obvod na frekvenci 37 kHz.

Vizualizaci výsledné DPS, pro jejíž návrh bylo využito softwaru Eagle od společnosti Autodesk, lze vidět na obr. 10, případně v příloze II. *Vykreslené soubory gerber pro výrobu DPS, v následující kapitole je poté zobrazeno výsledné provedení včetně obalu.*



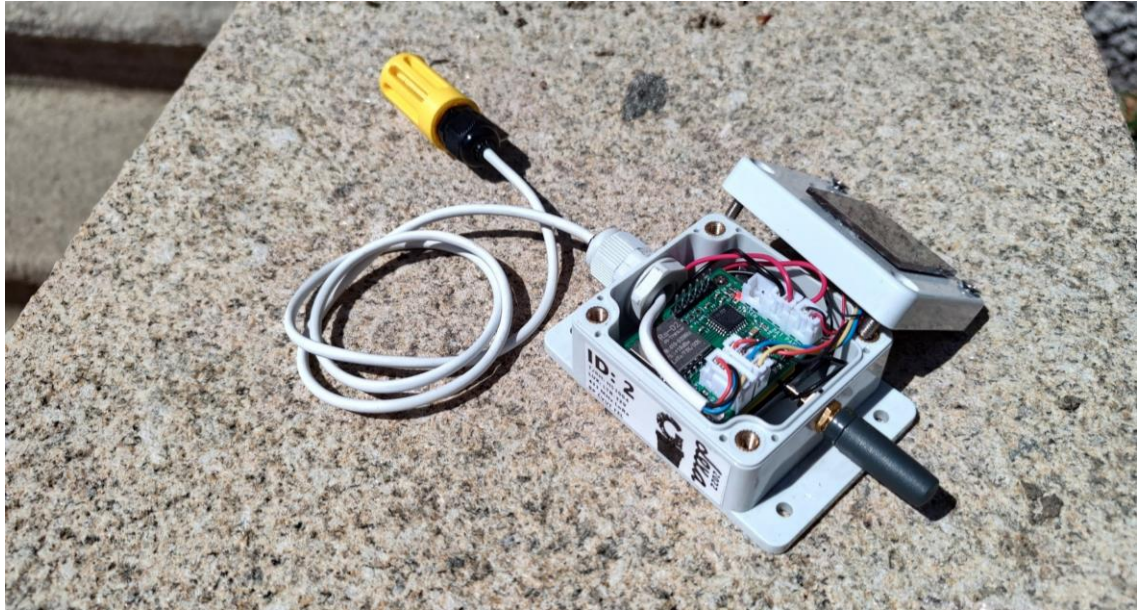
Obr. 10: Vizualizace osazené DPS

2.2 KONSTRUKČNÍ PŘEVEDENÍ UZLU

Vzniklá DPS společně s baterií byla umístěna do konstrukční krabičky o rozměrech 63x58x35 mm, na jejíž víčko je připevněn solární panel společně se senzorem osvětlení. Sensor teploty a relativní vlhkosti je poté zabudován uvnitř ochranného krytu zhotoveného pomocí 3D tisku a k hlavní části uzlu připojen pomocí čtyřvodičového kabelu. Vnitřní uspořádání krytu senzoru lze vidět v příloze III. Výsledná podoba je zachycena na obr. 11. Na obr. 12 se nachází pohled na vnitřní uspořádání samotného uzlu, kde pod DPS je umístěn superkondenzátor či případně držák článků velikost AAA, který rozhodl o výsledné velikosti zvolené krabičky. A nakonec obr. 13 zachycuje uzel na svém finálním místě uvnitř fóliovníku.



Obr. 11: Celkové provedení



Obr. 12: Pohled na vnitřní uspořádání



Obr. 13: Umístění uzlu uvnitř fóliovníku

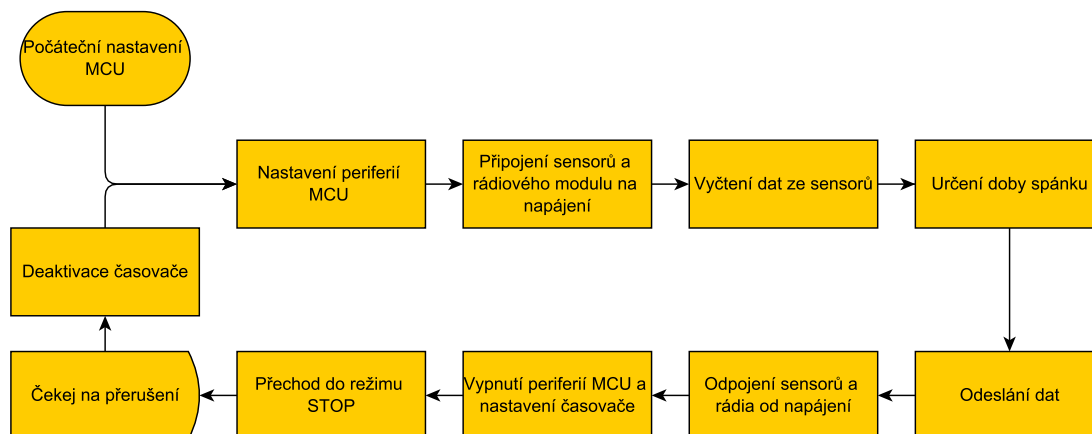
2.3 PROGRAM SENZOROVÉHO UZLU

Pro vývoj firmwaru bylo využito vývojového prostředí STM32CubeIDE, kód je psán v jazyce C s využitím HAL knihoven poskytnutých výrobcem. A pro obsluhu modulu RA-02 je využito knihovny Tiny LoRa [24].

Tab. 4: Konfigurace vysílače SX1278

Parametr	Hodnota
<i>SF – Koeficient rozprostření</i>	7
<i>BW – Šířka pásma (kHz)</i>	125
<i>Frekvence (MHz)</i>	433
<i>CR – Kódovací rychlost</i>	4/5
<i>Synchronizační slovo</i>	0x12
<i>Vysílací výkon (dBm)</i>	18

Na obr. 14 je popsán průběh programu běžícím na mikrokontroléru. Po prvotním oživení dojde k nastavení základních periférií, jako jsou vnitřní oscilátory a děličky, poté zbylých využívaných periférií. Následuje sepnutí napájení pro senzory a rádiový modul, společně s jeho počátečním nastavením dle tab. 4 a aktivaci generátoru kontrolního součtu pro přenášené datové zprávy. Po vyčtení dat ze senzorů dochází k určení optimální doby spánku na základě algoritmu popsáném v následujícím odstavci. Po dokončení odesílání dat jsou senzory i rádiový modul odpojeny od napájení, dojde k deaktivaci většiny periférií MCU pro dosažení co nejmenší možné spotřeby. Nastaví se RTC časovač na hodnotu odpovídající době spánku a mikrokontrolér přejde do režimu STOP. Po uplynutí nastaveného času dojde k přerušení a cyklus se opakuje opětovným nastavením dříve deaktivovaných periférií.



Obr. 14: Vývojový diagram firmwaru pro senzorový uzel

Určování optimální doby spánku t_s pro efektivní využití dostupné energie uložené v superkondenzátoru je řešeno následujícím postupem. Při každém cyklu měření dojde ke změření napětí U na superkondenzátoru a pomocí rovnice (2.1) je určeno množství dostupného náboje z využitelného rozsahu napětí, tedy po hranici 3,3 V.

$$q_{\text{dostup}} = C \cdot (U - 3,3) \quad (2.1)$$

Následně je díky znalosti potřebného náboje na jeden cyklus měření q_{mer} a na celý den spánku q_{spa} určen aktuální možný počet měření za jeden den N_{akt} do vybití superkondenzátoru dle rovnice (2.2).

$$N_{\text{akt}} = \frac{q_{\text{dostup}} - q_{\text{spa}}}{q_{\text{mer}}} \quad (2.2)$$

Pro zajištění plynulé změny doby spánku je počítán klouzavý průměr N_{prum} z N_{akt} po dobu jednoho dne a z něho poté určen vhodný čas spánku mezi měřeními podle (2.3).

$$t_s = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60}{N_{\text{prum}}} \quad (2.3)$$

V případě napájení pomocí baterie Ni-MH nabíjené pomocí solárního panelu je určování vhodné doby spánku vzhledem k nelinearitám jak nabíjení baterie, tak výkonu článku v závislosti na intenzitě a napětí baterie problematické. Proto je doba spánku volena ve dvou krocích, a to 5 minut v případě, že průměrná denní intenzita překročí 1000 lx a 10 minut pro intenzity nižší.

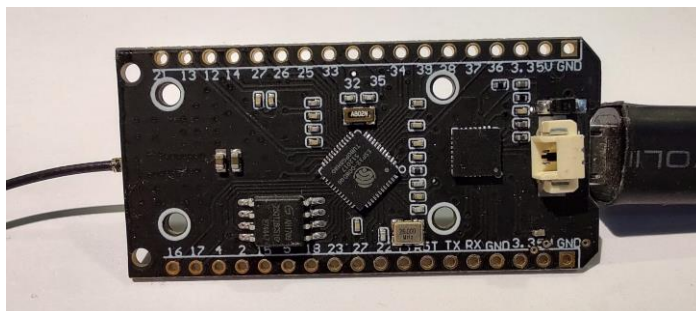
Formát výsledné odeslané zprávy obsažené v paketu generovaném obvodem SX1278 se skládá z 18 bajtů složených z 8 bitů. jejichž rozdělení je popsáno v tab. 5.

Tab. 5: Rozdělení datové zprávy

Bajt	Účel
0	Identifikace uzlu
1	Společná identifikace
2-3	Teplota
4-5	Vlhkost
6-7	Tlak / nevyužito
8-9	N_{prum} / debug informace
10-11	Intenzita infračerveného spektra
12-13	Intenzita viditelného spektra
14-15	Doba spánku
16-17	Napětí baterie

2.4 SBĚRNÝ BOD

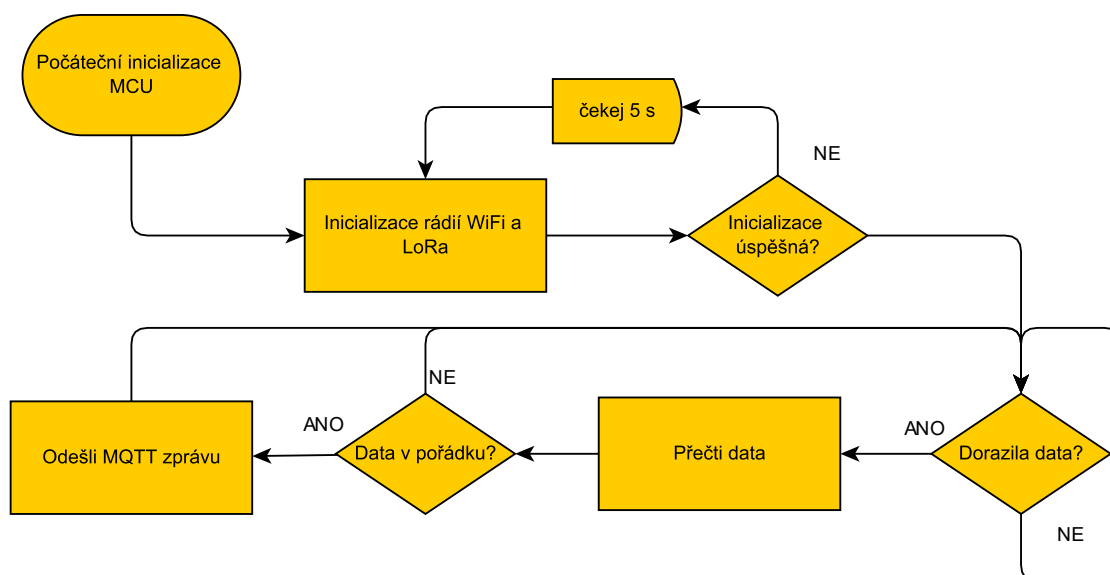
Pro koncentraci dat z uzlů bylo využito komerčně dostupného vývojové desky *LilyGO TTGO LoRa32*, viz obr. 15, obsahující rádiový obvod SX1278 a mikroprocesor ESP32, který umožňuje připojení do lokální sítě pomocí WiFi [25], čehož je využito pro následné přeposlání získaných dat ze sensorových uzlů s pomocí protokolu MQTT do centrálního bodu, který je provozován na lokálním serveru společně se systémem Home Assistant jež zajišťuje správu databáze, následnou vizualizaci a dlouhodobé ukládání do služby Thingspeak.



Obr. 15: Vývojová deska *LilyGO TTGO LoRa32*

K vývoji firmwaru sběrného bodu bylo využito, vzhledem k dostupnosti přehledně dokumentovaných knihoven, vývojového prostředí Arduino. Zdrojové kódy jak uzlu, tak přijímací stanice, jsou k dispozici v elektronické příloze.

Na obr. 16 je znázorněn průběh programu pro sběr a následný překlad do formy MQTT zprávy. Po úspěšném připojení k lokální síti dochází k opakovanému dotazování rádiového obvodu SX1278, zda nepřijal data. V případě, že přijal, jsou data vyčtena, zkontrolována jejich správnost a přeposlána ve formě MQTT zprávy na lokální server.



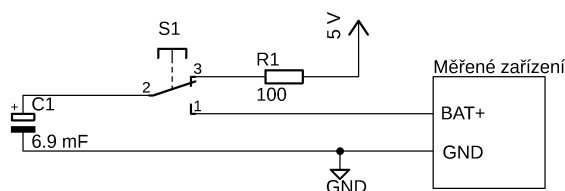
Obr. 16: Vývojový diagram firmwaru pro sběrný bod

Aktuální data z jednoho z uzlů jsou veřejně dostupná ve službě Thingspeak na adrese <https://thingspeak.com/channels/1692771>.

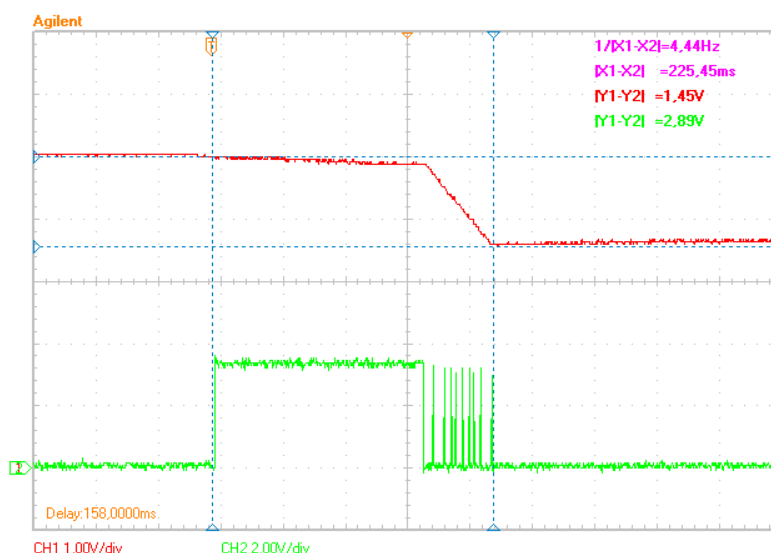
3 TESTOVÁNÍ A MĚŘENÍ

3.1 URČENÍ SPOTŘEBY UZLU

Pro účel měření energie potřebné pro jeden cyklus snímání a vysílání jako zdroj energie použit kondenzátor podle schématu na obr. 17 a pomocí osciloskopu zaznamenán průběh jeho napětí, viz obr. 18 (červený průběh). Pro jednoznačné určení začátku cyklu bylo využito signálu NSS rádiového modulu, který je aktivován ihned po spuštění mikrokontroléru (zelený průběh). Tlačítko S1 slouží k nabíjení kondenzátoru a při stisknutí přepojí kondenzátor k měřenému spotřebiči.



Obr. 17: Zjednodušené schéma pro měření spotřeby



Obr. 18: Průběh napětí na kondenzátoru (červená) a signálu NSS (zelená)

Energii spotřebovanou na jeden cyklus lze určit pomocí vztahu (3.1)

$$E = \frac{1}{2} C (U_1^2 - U_2^2), \quad (3.1)$$

kde U_1 je počáteční napětí kondenzátoru a U_2 konečné napětí kondenzátoru. Po dosažení hodnot $U_1 = 5 \text{ V}$, $U_2 = 3,55 \text{ V}$, $C = 6,9 \text{ mF}$, vychází energie potřebná na jeden cyklus odeslání 43 mJ. Odběr z baterie během spánku, měřený pomocí mikroampérmetru, se pohyboval v rozmezí 2–3 μA , tedy při napětí baterie pohybujícím se kolem 4 V a maximální době spánku 10 minut, je v režimu spánku spotřebováno přibližně 7 mJ. Celková energie potřebná na jeden desetiminutový cyklus je 50 mJ a průměrný proudový odběr ze zdroje je 19 μA .

Z obr. 18 lze pomocí rovnice (3.2) ještě odvodit odběr proudu při aktivním vysílání, který se pohyboval kolem 150 μA .

$$I = C \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (3.2)$$

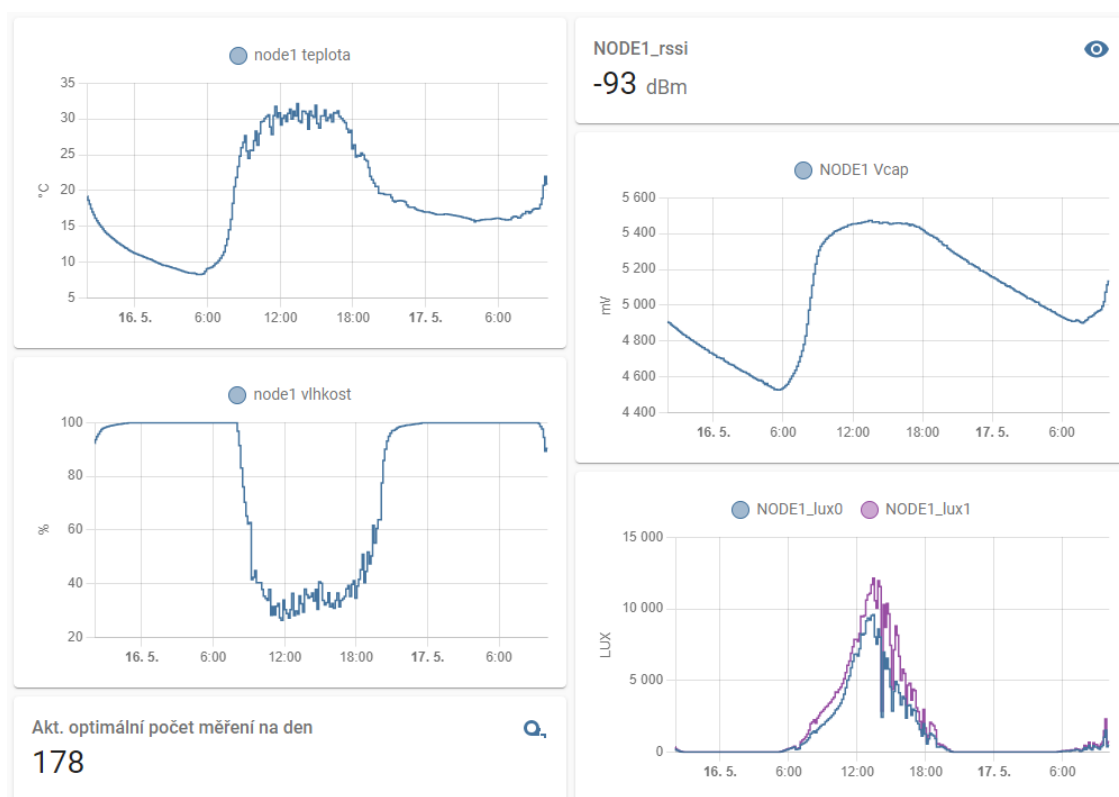
Pro účely určování optimální doby spánku při napájení uzlu ze superkondenzátoru je však vhodnější vyjádřit spotřebu v ampérsekundách. Vzhledem k tomu, že je použit lineární regulátor, a tedy proudový odběr se s klesajícím napětím téměř nemění. Poté na jeden cyklus měření a odeslání je zapotřebí $q_{\text{mer}} = 10 \text{ mAs}$ a na celý den spánku je zapotřebí $q_{\text{spa}} = 260 \text{ mAs}$. Tyto dvě hodnoty jsou poté využity k optimalizaci doby spánku viz kapitola 2.3.

3.2 TEST DOSAHU

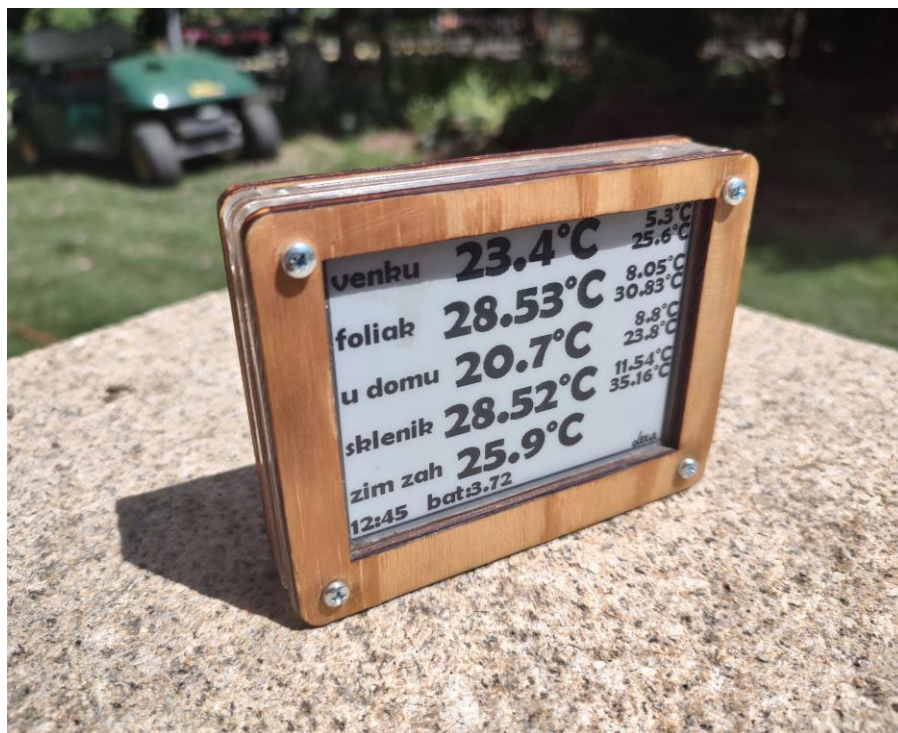
Testování dosahu bylo uskutečněno s nastavením vysílače a přijímače popsáním v tab. 4 a pomocí všesměrových antén se ziskem 2,15 dBi. Vysílač byl nastaven na odesílání zprávy každých 5 sekund a jako hranice přípustné chyby byla zvolena jedna nepřenesená zpráva z deseti. Měření na každé z lokalit probíhalo 5 minut. Největší vzdálenost splňující tuto podmínku byla naměřena 570 m s téměř přímou viditelností mezi vysílačem a přijímačem. Body, mezi kterými byl naměřen největší dosah, jsou vyneseny na mapě v příloze VII. *Měření maximální vzdálenosti přenosu dat.*

3.3 INTEGRACE DO STÁVAJÍCÍHO SYSTÉMU HOME ASSISTANT

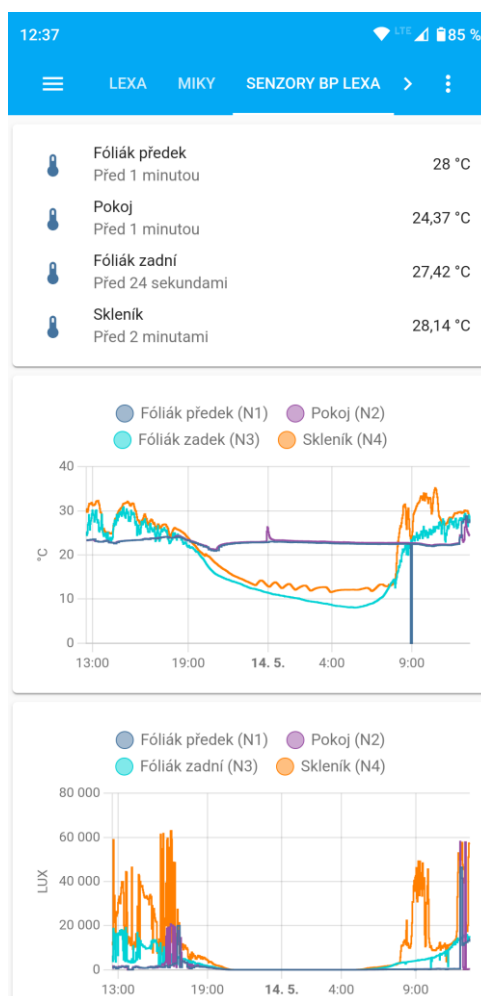
Integrace vzniklých uzlů do systému Home Assistant (HA) spočívá v zachytávání MQTT zpráv generovaných sběrným bodem. Pro každý uzel je vytvořena množina entit, které reprezentují jednotlivé naměřené údaje. Následná vizualizace získaných dat je možná prostřednictvím webového prohlížeče viz obr. 19, mobilní aplikace (obr. 21) anebo pomocí bezdrátového E-Ink displeje (viz obr. 20) vzniklého v rámci jednoho z předchozích školních projektů ve snaze umožnit odečty z pohodlí nočního stolku v průběhu kritických mrazivých jarních nocí.



Obr. 19: Ukázka možné vizualizace v systému HA



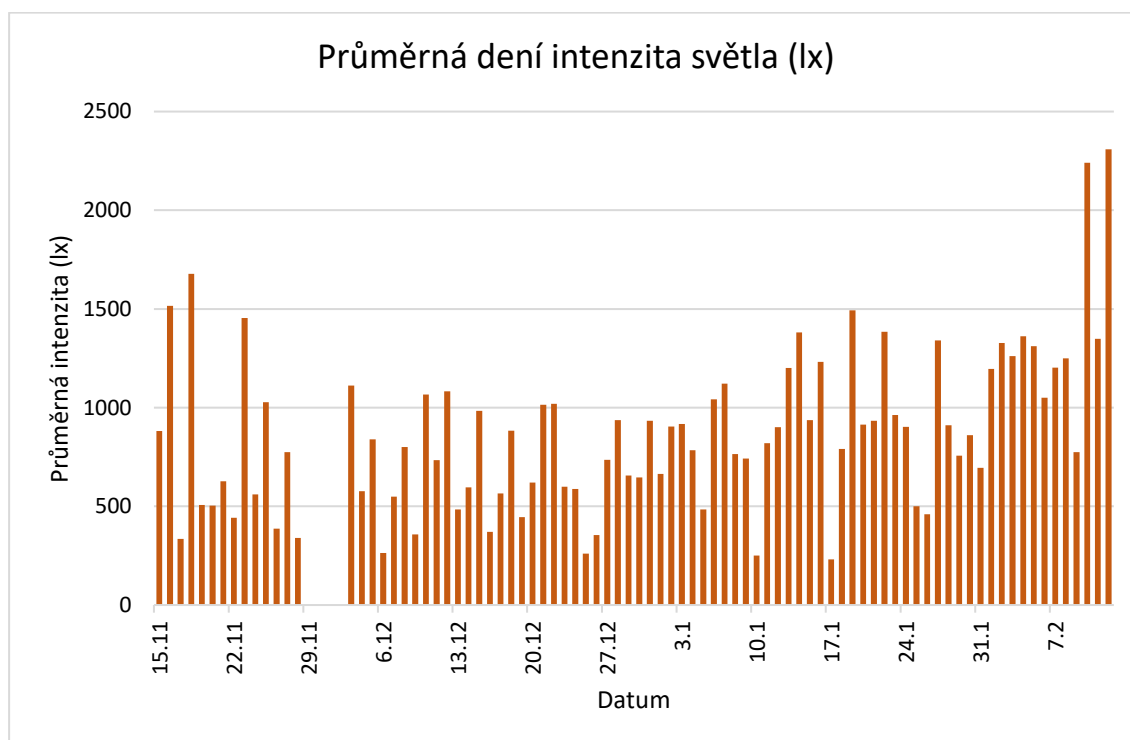
Obr. 20: Bezdrátový E-ink displej (údaje „foliak“ a „sklenik“ jsou získávány pomocí navržených uzlů)



Obr. 21: Vizualizace v mobilní aplikaci HA

3.4 MĚŘENÍ INTENZITY OSVĚTLENÍ V MÍSTECH NÁSLEDNÉHO NASAZENÍ SENZOROVÉHO UZLU

V rámci semestrálního projektu předcházející této práci, bylo provedeno měření intenzity slunečního záření uvnitř fóliovníku, které probíhalo téměř nepřetržitě¹ od poloviny listopadu 2021 do poloviny února 2022. K získání informace o intenzitě záření bylo využito v laboratoři naměřené závislosti zkratového proudu tenkovrstvého amorfního solárního panelu o rozměrech 53x53 mm na intenzitě osvětlení a následně sestaveno zařízení zaznamenávající tento proud každou minutu do datového souboru na SD kartu. Převod zkratového proudu na napětí pro AČ převodník mikrokontroléru bylo realizováno pomocí obvodu s operačním zesilovačem. Graf na obr. 22 zobrazuje naměřené průměrné denní intenzity, tedy průměrné, za období 24 hodin a v tab. 6 je vypsáno pět nejnižších naměřených průměrů. Kompletní data jsou přiložena v příloze IV. *Kompletní naměřené průměrné intenzity.*

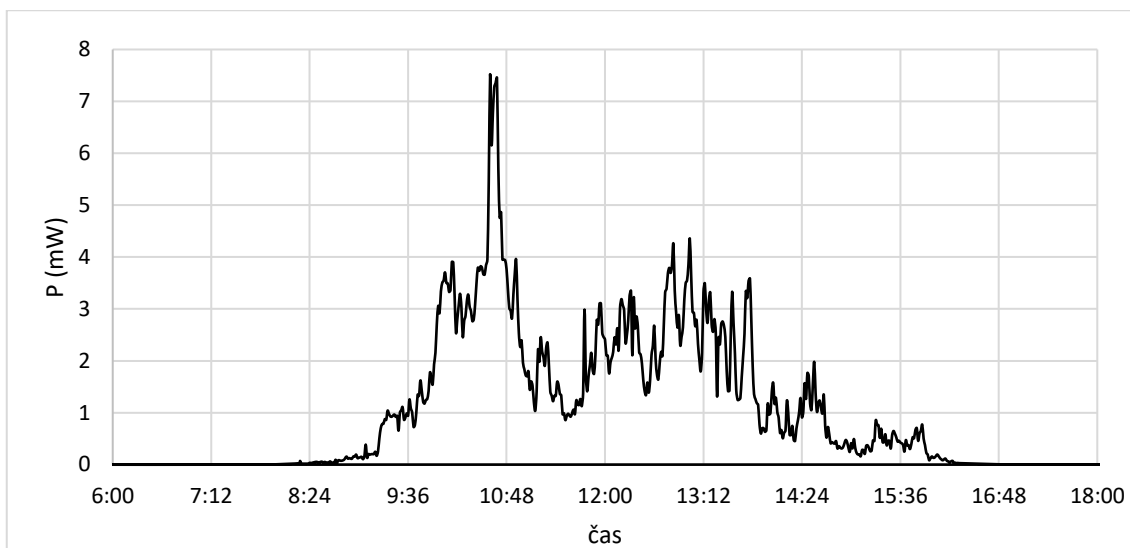


Obr. 22 Průměrné denní intenzity osvětlení

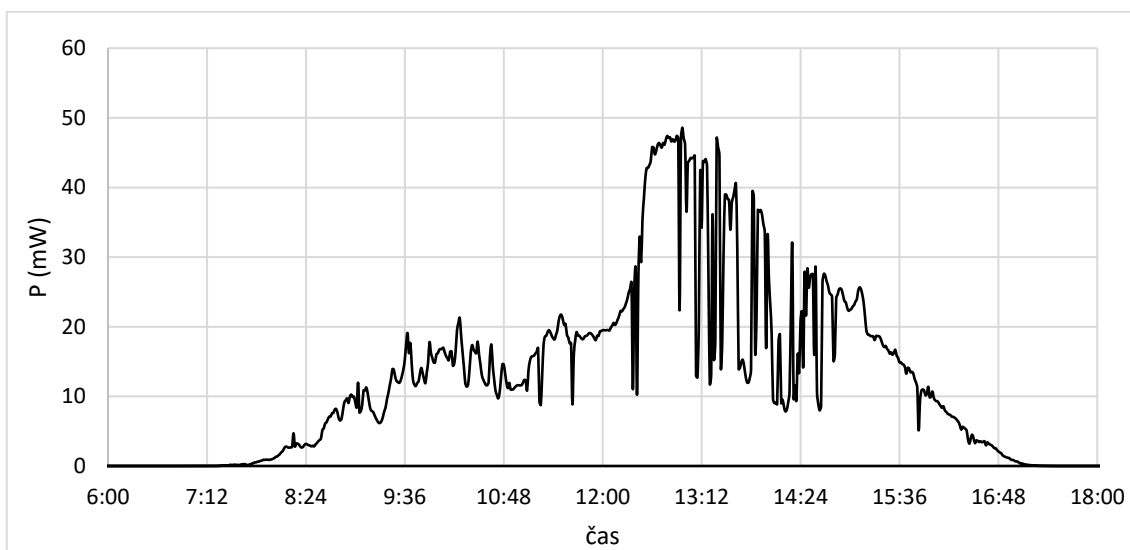
Tab. 6 Nejnižší naměřené průměrné hodnoty

<i>Datum</i>	<i>Průměrná intenzita světla (24 h) (lx)</i>
17.1.2022	231,4
10.1.2022	250,1
25.12.2021	259,9
6.12.2021	264,3
17.11.2021	335,6

¹ Data z období 29.11. až 2.12. 2021 nejsou bohužel z důvodu výpadku napájení měřícího přípravku k dispozici.



Obr. 23: Výkon panelu v průběhu zataženého dne 17.1.2022, průměr za celý den činí 0,53 mW



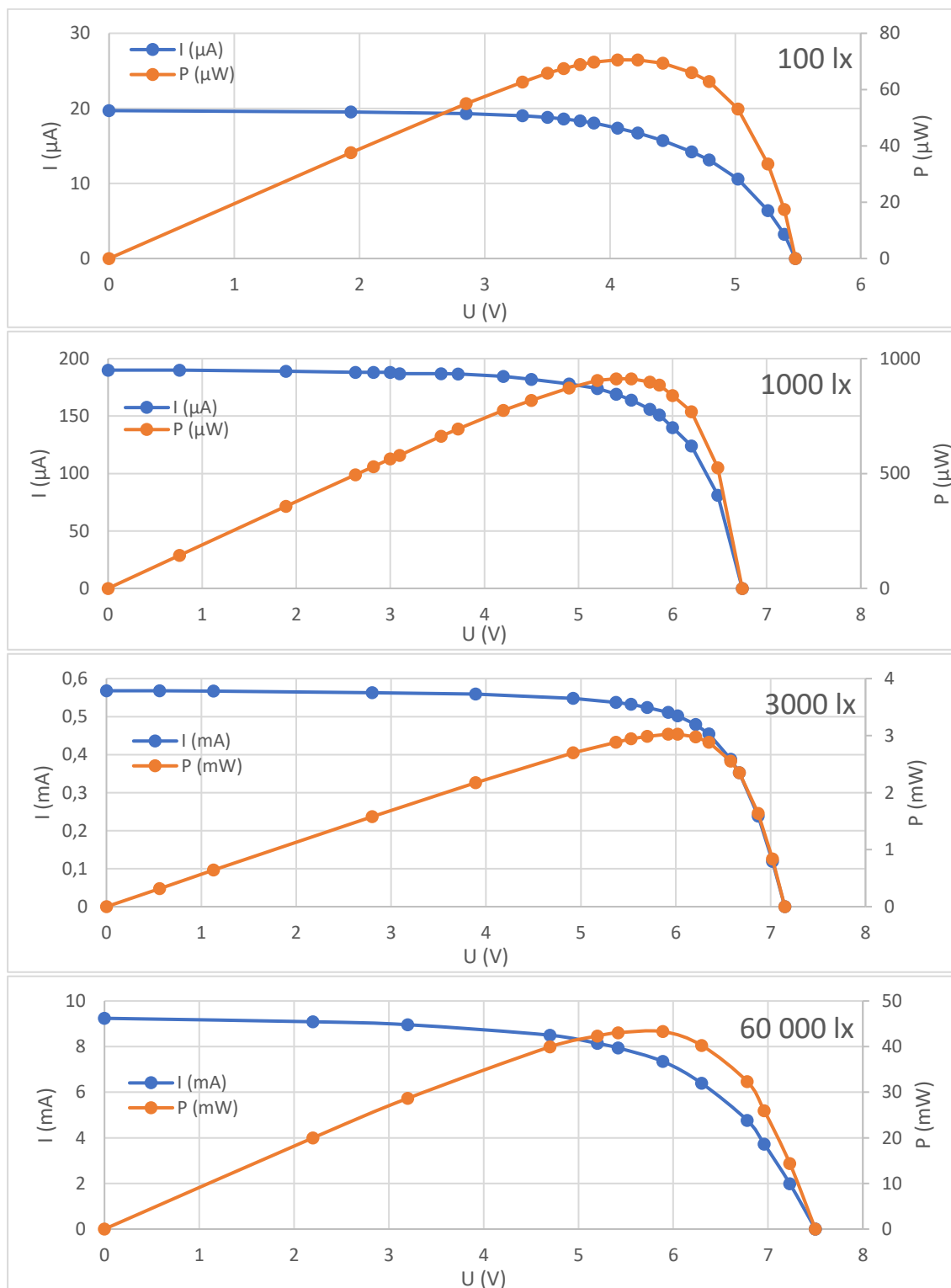
Obr. 24: Výkon panelu v průběhu převážně slunečného dne 12.2.2022

3.5 VÝBĚR SOLÁRNÍHO PANELU

Volba velikosti solárního panelu byla ovlivněna především velikostí krabičky a dostupnými panely. Zvolen byl solární panel Panasonic AM-5904, jedná se o tenkovrstvý amorfní křemíkový článek o rozměrech 40x33 mm, maximálním zkratovém proudu 10 mA a provozním napětí 5 V. Pro použité baterie o kapacitě 800 mAh je tedy splněna podmínka, že nabíjecí proud nepřesáhne 20 mA (0,025C). Jako ověření, že výkon panelu bude dostačující pro napájení uzlu, bylo využito naměřeného výkonu v nejhorším zaznamenaném dni (viz obr. 23). Vzhledem k tomu, že zvolený panel plochou odpovídá 47 % panelu použitého pro měření intenzit a obsahuje stejný počet článků, měl by být v tento nejhorší den schopný generovat průměrný výkon 0,24 mW. Uzel při cyklu opakujícím se každých 10 minut dosahuje průměrného odběru 19 μ A a jeho nejvyšší potřebný výkon odpovídá 0,105 mW při plně nabitém kondenzátoru na 5,5 V. Zbylá výkonová rezerva je poté dostačující na pokrytí neefektivity samotného nabíjení superkondenzátoru či případné baterie.

3.5.1 Charakterizace solárního panelu Panasonic AM-5904

Pro získání lepší představy o vlastnostech zvoleného panelu byla provedena charakterizace panelu při čtyřech úrovních osvětlení. Naměřené voltampérové charakteristiky společně s průběhy výkonu jsou uvedeny na obr. 25.



Obr. 25 Voltampérové charakteristiky panelu společně s průběhem výkonu při různých intenzitách osvětlení (100 lx; 1000 lx; 3000 lx; 60 000 lx)

MOŽNÁ VYLEPŠENÍ

Jako možné vylepšení se nabízí použití DC/DC měniče místo lineárního regulátoru, což by umožnilo využívat větší množství energie uložené v superkondenzátoru, obdobně by bylo možné vyřešit i samotné nabíjení.

Původně byl uzel konstruován s myšlenkou ukládání energie do nabíjecích článků, ale po úspěšné úpravě na ukládání energie do superkondenzátoru se tato varianta ukázala jako vhodnější. Ať už z hlediska stárnutí, či ceny. Kde superkondenzátor v obou případech překonává Ni-MH články. Proto v případě konstrukce dalších kusů by bylo vhodné upravit DPS tak aby superkondenzátor byl umístěn přímo na desce.

4 ZÁVĚR

V práci byly popsány metody pro sběr a přenos dat ze sensorových uzlů společně s možnostmi pro jejich napájení za pomoci volně dostupné energie z okolního prostředí. Na základě dlouhodobě naměřených intenzit slunečního záření v místě nasazení sensorového uzlu byl zvolen vhodný solární panel a dva způsoby ukládání energie pro zajištění nepřetržitého provozu, a to pomocí trojice Ni-MH akumulátorů anebo superkondenzátoru.

Před samotným návrhem DPS došlo k ověření zapojení a bezdrátové komunikace pomocí vývojové desky NUCLEO-64. Podoba tohoto prvotního prototypu je zachycena v příloze VI. Po následném návrhu DPS byla většina součástek napájena pomocí přetavení pájecí pasty na vyhřívané kontaktní pájecí desce. Následovala úprava prototypu programu pro obsluhu sensorů a rádiového modulu společně s odladěním správné konfigurace samotného mikrokontroléru s cílem dosáhnout co nejnižšího odběru v režimu STOP. Pro ochranu senzoru teploty a vlhkosti byl navržen a následně pomocí 3D tiskárny vytištěn kryt, ve kterém je umístěna druhá navržená DPS umožňující snadné napojení kabelu.

Vzniklé sensorové uzly byly sestaveny s využitím mikrokontroléru z řady STM32L0 určené pro aplikace s nízkou spotřebou a rádiovým modulem SX1278 umožňujícím komunikaci pomocí modulace LoRa. Průměrný proudový odběr navrženého uzlu činí 19 μA při periodě měření a odeslání dat 10 minut. U varianty napájené pomocí superkondenzátoru došlo navíc k implementaci systému pro optimalizaci doby mezi měřeními pro optimální využití získané energie. Maximální naměřený dosah mezi uzlem a sběrným bodem dosahoval 570 m, což je pro plánovaný účel sběru dat z pěstebních objektů na ploše 1 ha více než dostačující.

Za dobu, kterou je systém v provozu, se nevyskytly na straně navržených sensorových uzlů žádné závažné problémy, pouze na straně sběrného bodu ze začátku docházelo k problémům s rozpoznáním chybných dat a odesíláním MQTT zpráv. Avšak tyto problémy se následně úpravou programu sběrného bodu podařilo odstranit.

5 CITOVANÁ LITERATURA

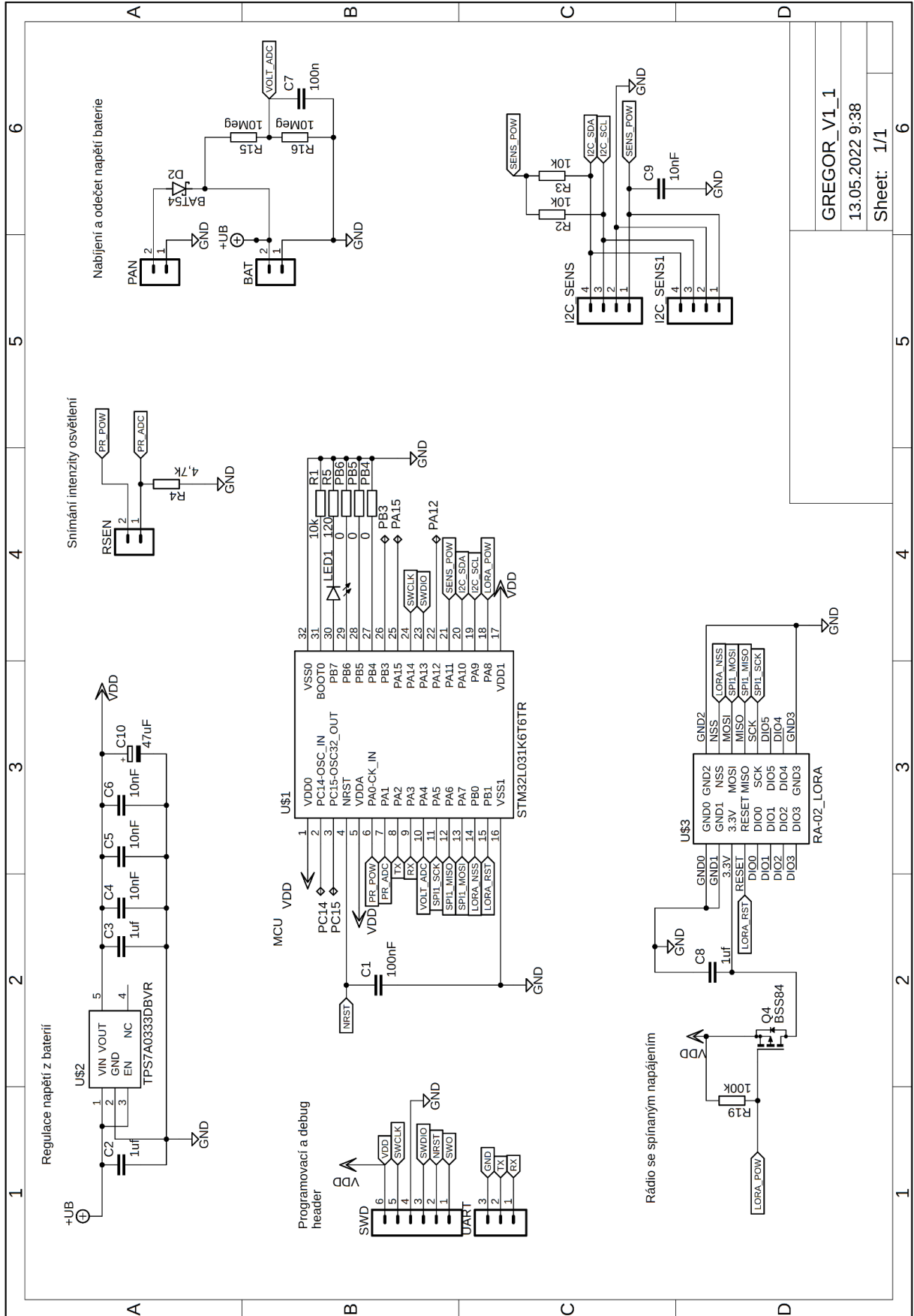
- [1] GARLÍK, Bohumír. *Inteligentní budovy*. Praha: BEN - technická literatura, 2012. ISBN 978-807-3004-408.
- [2] STANISLAV, Vítek. *Přístrojové sběrnice*. [přednáška]. Praha: ČVUT FEL, 2022. Dostupné také z: https://cw.fel.cvut.cz/b212/_media/courses/b0b37nsi/lectures/mam8.pdf
- [3] *SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver Datasheet* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf
- [4] *DecodingLora* [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://revspace.nl/DecodingLora>
- [5] TALLA, Vamsi, Mehrdad HESSAR, Bryce KELLOGG, Ali NAJAFI, Joshua SMITH a Shyamnath GOLLAKOTA. LoRa Backscatter. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies* [online]. 2017, **1**(3), 1-24 [cit. 2022-04-22]. ISSN 2474-9567. Dostupné z: doi:10.1145/3130970
- [6] *LoRa Modulation Basics* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1278>
- [7] AUGUSTIN, Aloÿs, Jiazi YI, Thomas CLAUSEN a William TOWNSLEY. A Study of LoRa. *Sensors* [online]. 2016, **16**(9) [cit. 2022-04-21]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s16091466
- [8] LIANDO, Jansen, Amalinda GAMAGE, Agustinus TENGOURTIUS a Mo LI. Known and Unknown Facts of LoRa. *ACM Transactions on Sensor Networks* [online]. 2019, **15**(2), 1-35 [cit. 2022-04-22]. ISSN 1550-4859. Dostupné z: doi:10.1145/3293534
- [9] *Bluetooth Technology Overview* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- [10] *How Bluetooth Technology Uses Adaptive Frequency Hopping to Overcome Packet Interference* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/blog/how-bluetooth-technology-uses-adaptive-frequency-hopping-to-overcome-packet-interference/>
- [11] BRIAND, Danick, Eric YEATMAN a Shad ROUNDY. *Micro Energy Harvesting*. 1. Berlin: John Wiley & Sons, Incorporated, 2015. ISBN 9783527672936. Dostupné také z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=1896062>
- [12] LABOURET, Anne a Michel VILLOZ. *Solar Photovoltaic Energy*. 4. UK: The Institution of Engineering and Technology, 2010. ISBN 978-1-84919-154-8.
- [13] *Panasonic Amorphous Silicon Solar Cells datasheet* [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://mediap.industry.panasonic.eu/assets/custom-upload/Energy%20&%20Building/Amorton/ca_amorton_solar_cells_en.pdf

- [14] MATUŠKA, Tomáš. *Fotovoltaika - základy*. [přednáška]. Praha: ČVUT FS. Dostupné také z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2020/04/AZE2-P6_FV_technologie.pdf
- [15] BEEBY, Stephen a Neil WHITE. *Energy Harvesting for Autonomous Systems* [online]. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2010 [cit. 2022-04-30]. ISBN 978-1-59693-718-5.
- [16] *STM32L031x6 Datasheet* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l031k6.pdf>
- [17] *Ra-02 LoRa Module* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://docs.ai-thinker.com/_media/lora/docs/c048ps01a1_ra-02_product_specification_v1.1.pdf
- [18] *TPS7A03 Nanopower IQ, 200-nA, 200-mA, Low-Dropout Voltage Regulator With Fast Transient Response* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a03.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1649148289132>
- [19] *Optical Sensor LTR-329ALS-01* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/239/liteon_LTR-329ALS-01-1175539.pdf
- [20] *High Performance Relative Humidity and Temperature Sensor HS300x Datasheet* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/products/sensor-products/humidity-sensors/hs3004-high-performance-relative-humidity-and-temperature-sensor>
- [21] *Standard vs Trickle Charging NiCd and NiMH Batteries* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.vencon.com/charging-nicd-nimh-batteries/>
- [22] *Nickel Metal Hydride (NiMH): Handbook and Application Manual* [online]. Energizer Battery Manufacturing Inc., 2020 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://data.energizer.com/wp-content/uploads/2020/11/nimhhandbook_ver2-2.pdf
- [23] *AN2834 Application note: How to get the best ADC accuracy in STM32 microcontrollers* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00211314-how-to-get-the-best-adc-accuracy-in-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf
- [24] BELYALOV, Konstantin. *Tiny LoRa library for STM32 HAL* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://github.com/belyalov/stm32-hal-libraries/blob/master/doc/lora.md>
- [25] *LILYGO® SX1278 LoRa ESP32 Bluetooth Wi-Fi Lora Internet Antena Development Board* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: http://www.lilygo.cn/prod_view.aspx?TypeId=50060&Id=1141&FId=t3:50060:3

SEZNAM TIŠTĚNÝCH PŘÍLOH

I. Schéma zapojení sensorového uzlu	37
II. Vykreslené soubory gerber pro výrobu DPS sensorového uzlu	38
III. Vykreslené soubory gerber pro výrobu DPS umožňujících napojení sensorů na vodiče a podoba krytu sensorů	39
IV. Kompletní naměřené průměrné intenzity osvětlení.....	40
V. Pájení SMD pomocí „kontaktní pájecí desky“	41
VI. Podoba prvotního prototypu pro ověření komunikace pomocí modulu SX1278.....	41
VII. Měření maximální vzdálenosti přenosu dat.....	42

I. Schéma zapojení sensorového uzlu

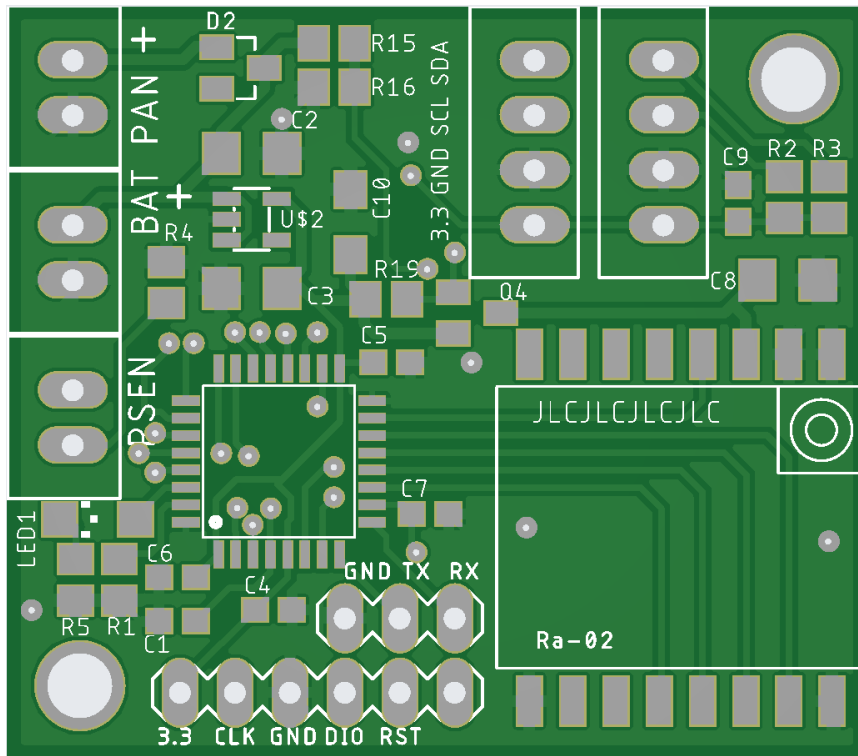


GREGOR_V1_1

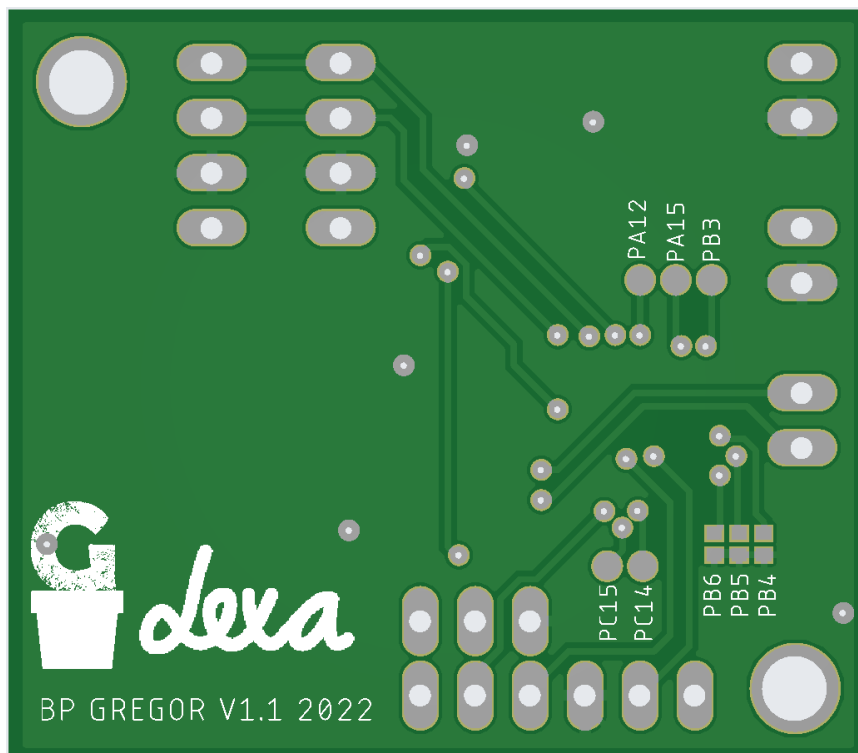
13.05.2022 9:38

Sheet: 1/1

II. Vykreslené soubory gerber pro výrobu DPS sensorového uzlu

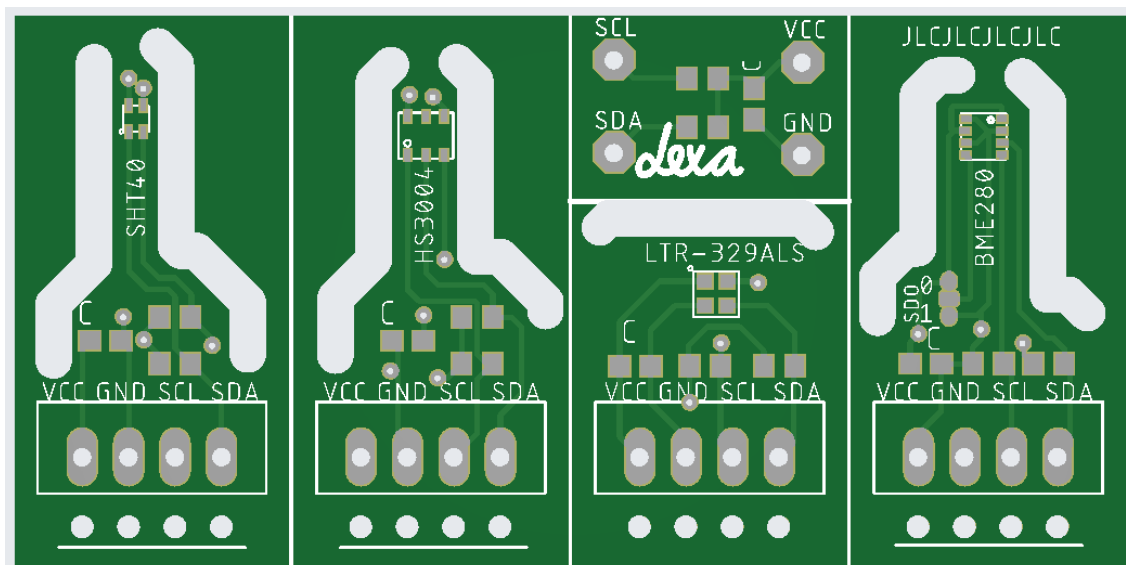


strana TOP

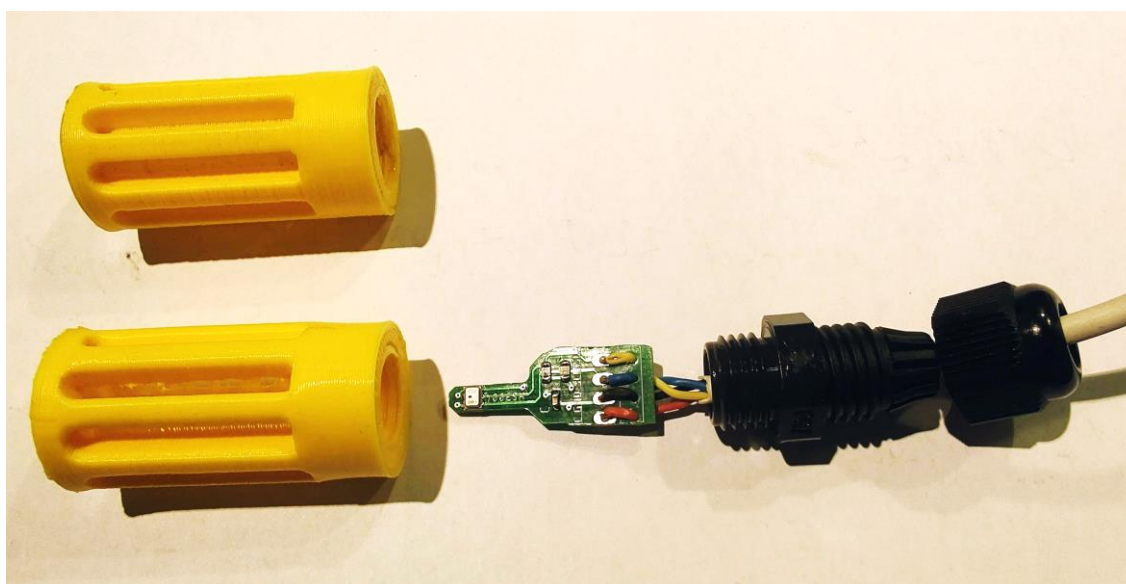


strana BOTTOM

III. Vykreslené soubory gerber pro výrobu DPS umožňujících napojení senzorů na vodiče a podoba krytu senzorů



(Využito bylo nakonec pouze adaptéru pro senzor HS3004 a LTR-329ALS.)

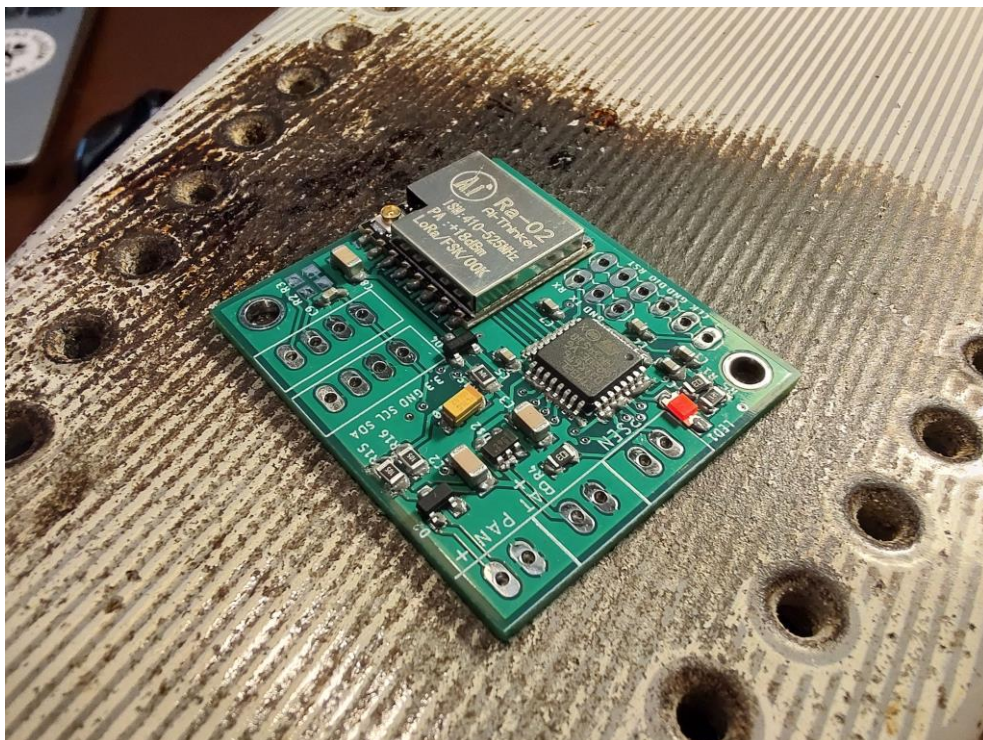


IV. Kompletní naměřené průměrné intenzity osvětlení

Měřeno uvnitř fóliovníku na souřadnicích 49.6578694 N, 15.1145931E. mapy.cz/s/nutojosala

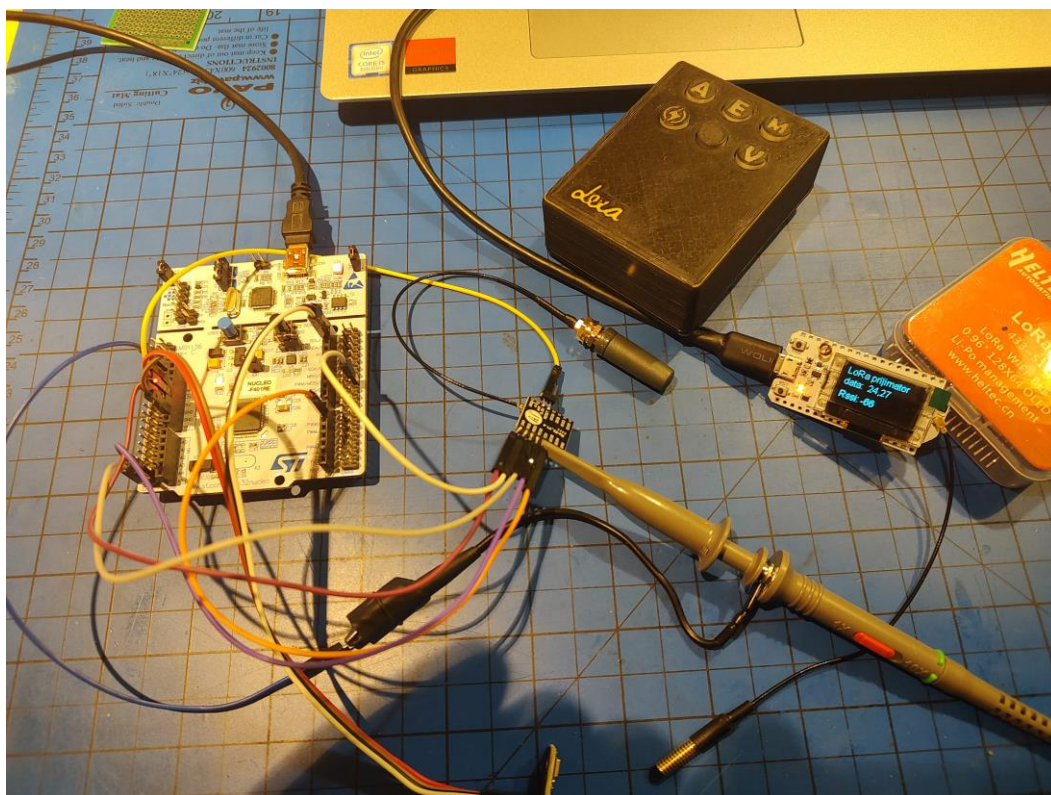
Datum	Průměrná intenzita světla (lx)		
15.11	881,8	1.1	663,5
16.11	1515,9	2.1	904,8
17.11	335,6	3.1	917,2
18.11	1678,4	4.1	784,4
19.11	507,0	5.1	483,7
20.11	504,2	6.1	1042,6
21.11	627,1	7.1	1122,4
22.11	442,2	8.1	764,4
23.11	1454,8	9.1	742,1
24.11	560,5	10.1	250,1
25.11	1027,0	11.1	820,7
26.11	386,2	12.1	900,4
27.11	774,9	13.1	1200,5
28.11	339,5	14.1	1381,7
3.12	1112,4	15.1	936,8
4.12	577,2	16.1	1232,0
5.12	839,9	17.1	231,4
6.12	264,3	18.1	790,2
7.12	549,4	19.1	1492,5
8.12	801,3	20.1	913,2
9.12	358,0	21.1	933,1
10.12	1066,7	22.1	1383,6
11.12	733,7	23.1	963,4
12.12	1082,5	24.1	903,5
13.12	484,1	25.1	501,0
14.12	596,8	26.1	459,4
15.12	983,7	27.1	1340,2
16.12	370,1	28.1	911,3
17.12	566,2	29.1	756,6
18.12	882,8	30.1	861,2
19.12	444,7	31.1	694,5
20.12	619,8	1.2	1196,1
21.12	1014,5	2.2	1328,4
22.12	1019,3	3.2	1261,9
23.12	599,4	4.2	1361,8
24.12	588,5	5.2	1311,6
25.12	259,9	6.2	1050,7
26.12	354,2	7.2	1202,9
27.12	735,2	8.2	1249,4
28.12	937,4	9.2	774,3
29.12	656,8	10.2	2240,6
30.12	646,7	11.2	1348,0
31.12	933,9	12.2	2309,3

V. Pájení SMD pomocí „kontaktní pájecí desky“



Jako pájecí deska je využito topného tělesa žehličky dovybaveného o PID regulátor teploty.

VI. Podoba prvotního prototypu pro ověření komunikace pomocí modulu SX1278



VII. Měření maximální vzdálenosti přenosu dat

Ruční měření

Úsek 1. Vzdálenost 570 m Součet 570 m Azimut 285°

Délka 570 m Plocha 0 m²

Kliknutím do mapy můžete pokračovat v měření

Výškový profil

0 m	145 m	290 m	435 m
447 m n. m.			443 m n. m.

0 50 100 150 m

Změnit mapu Z letadla Turistická 3D pohled

Nástroje Nahlásit chybu